





# Thèse de doctorat

de la Faculté des Sciences d'Agadir.

*Spécialité:*

Métrologie et Traitement de l'Information.

N° d'ordre :

*Présentée par :*

**Mr. Hicham LOTFI**

Pour obtenir le grade de docteur de la Faculté des Sciences d'Agadir.

*Titre de la thèse :*

---

**Contrôle ultrasonore de la prise d'un mortier et  
dimensionnement de tiges de fer enfouies dans le mortier.**

---

*Directeurs de thèse Mrs.*

**Bouazza FAIZ et Ali MOUDDEN.**

**Soutenue publiquement le samedi 20 Avril 2013 à l'amphi 5, Faculté des Sciences d'Agadir, devant  
le jury composé par messieurs:**

<b>Bouchta HLIMI</b>	Professeur à la Faculté des Sciences, Université Ibn Zohr, Agadir.	: <i>Président</i>
<b>Sougrati BELATTAR</b>	Professeur à la Faculté des Sciences Semlalia (FSSM), Marrakech.	:
<b>Lahoucine BOUHOUGH</b>	Professeur à l'École Supérieure de Technologie (EST), UIZ, Agadir.	: <i>Rapporteurs</i>
<b>Jamal CHAOUFI</b>	Professeur à la Faculté des Sciences, Université Ibn Zohr, Agadir.	:
<b>Abdellah AMGHAR</b>	Professeur à la Faculté des Sciences, Université Ibn Zohr, Agadir.	: <i>Examineur</i>
<b>Bouazza FAIZ</b>	Professeur à la Faculté des Sciences, Université Ibn Zohr, Agadir.	: <i>Directeurs de thèse</i>
<b>Ali MOUDDEN</b>	Professeur à la Faculté des Sciences, Université Ibn Zohr, Agadir.	

# *Dédicace*

À la mémoire de mon père,  
À ma mère,  
À mes frères et ma sœur,  
À ma femme,  
À ma fille Imane.

# Remerciements

Cette thèse de doctorat a été préparée au Laboratoire de Métrologie et Traitement de l'Information (LMTI) de la faculté des Sciences d'Agadir, sous l'encadrement des Messieurs **Bouazza FAIZ** et **Ali MOUDDEN** professeurs à la Faculté des Sciences d'Agadir. Je tiens à les remercier pour m'avoir proposé ce sujet de thèse à caractère expérimental qui m'a énormément appris. Merci pour leurs patiences, pour tout le temps consacré au suivi de ces travaux et pour leurs conseils sur l'orientation à suivre.

Je souhaite remercier Messieurs : **Sougrati BELATTAR** professeur à la Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech (FSSM), **Lahoucine BOUHOUCHE** professeur à l'École Supérieure de Technologie d'Agadir (ESTA) et **Jamal CHAOUFI** professeur à la Faculté des Sciences d'Agadir (FSA), pour avoir accepté d'être rapporteurs de la thèse et pour l'intérêt qu'ils ont porté au travail réalisé. Leur lecture de ce manuscrit et leurs remarques ont été très constructives.

Je me permets d'adresser mes remerciements et mes respects à Monsieur **Bouchta HLIMI** professeur à la Faculté des Sciences d'Agadir pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider ce jury.

Je remercie également Monsieur **Abdellah AMGHAR** professeur à la Faculté des Sciences d'Agadir, d'avoir accepté d'examiner cette thèse de doctorat.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur le Professeur **Abderrahman IBHI**, qui nous a aidé à faire l'analyse granulométrique de sable au laboratoire de département de Géologie.

Je tiens à remercier le directeur de l'usine **Ciment du Maroc d'Agadir** et le directeur de **Laboratoire d'Expertises, d'Études et d'Essais (LEEE)** d'Agadir de m'avoir accepté d'effectuer les stages.

Je voudrais également associer à mes remerciements tous les membres du Laboratoire de Métrologie et Traitement de l'Information d'Agadir professeurs et doctorants

## Résumé

Le travail présenté dans cette thèse de doctorat traite la durabilité des structures cimentaires. Les expériences réalisées dans le laboratoire sont effectuées de façon à savoir les paramètres responsables sur la structuration, la fissuration et l'endommagement des structures cimentaires. Pour étudier ces structures nous avons développé une technique de contrôle non destructif basée sur la rétrodiffusion des signaux ultrasonores par différentes échantillons analysées. Le protocole expérimental de cette technique est adapté à évaluer de manière précise les paramètres ultrasonores mesurés.

Les mortiers dont les rapports massiques ciment/sable ( $m_c/m_s=0,50$ ) et eau/ciment ( $m_e/m_c=0,65$ ) sont étudiés dans le but de distinguer les signatures correspondantes à la prise de mortier en étudiant l'effet de la microstructure du sable et l'influence de la température. La vitesse et l'atténuation ultrasonore mesurées donnent l'information sur l'état de durcissement de mortier, et l'impédance acoustique indique l'état de durcissement du mortier durant le processus d'hydratation.

La mesure de la vitesse du groupe des ondes circonférentielles, rétrodiffusées par des tiges cylindriques en fer enrobées par le mortier, permet de mesurer le diamètre et la profondeur de ces tiges dans les structures d'enrobage.

**Mots-clé:** Contrôle Non Destructif (CND), Mortiers, Vitesse ultrasonore, Béton armé, Tige en fer.

---

## Abstract

The work presented in this thesis treat the durability of cementitious structures. The experiments performed in the laboratory are carried to know the parameters responsible for the structuring, cracking and damage of cementitious structures. To study these structures we have developed a Non Destructive Technique (NDT) based on ultrasonic backscatter signals from the samples analyzed. The experimental protocol of this technique is adapted to evaluate the ultrasonic parameters measured.

Mortars whose mass ratios cement/sand ( $m_c/m_s=0,50$ ) and water/cement ( $m_e/m_c=0,65$ ) are studied in order to distinguish the signatures corresponding to the hardening by stading the effect of the microstructure of sand and the influence of temperature. The ultrasonic velocity and attenuation measurements gives information on the state of hardening of mortar, and the acoustic impedance indicates the state of hardening of the mortar during the process of hydration.

The determination of the group velocity of the wave backscattered by circumferential of cylindrical rods in iron coated with mortar, allows to measure the diameter and depth of these rods in coating structures.

**Key-Words:** Non Destructive Testing (NDT), Mortars, Ultrasonic velocity, Reinforced concrete, Iron rod.

# ملخص

العمل المقدم في هذه الأشرطة يعالج صلابة البنيات الإسمنتية. التجارب التي أنجزت في المختبر لتحديد البارامترات المسؤولة عن تصلب، تكسير وإتلاف هياكل البنيات الإسمنتية مكنتنا من تحديد خصائص هذه البنيات. للقيام بهذه المراقبة قمنا بتصوير تقنية غير مدمرة تعتمد بالأساس على انعكاس الموجات فوق الصوتية على العينات التي يتم تحليلها. العدة التجريبية المعتمدة في هذه التقنية ملائمة لتحديد و تقييم دقيق للبارامترات المقاسة.

قمنا بتحضير الخرسانة بالنسب الكتلية أسمنت/الرمل (0,50) والماء/الأسمنت (0,65)، من أجل تحديد تأثير دقائق الرمل وكذا درجة الحرارة على تصلب الخرسانة، فخلصنا إلى أن سرعة الموجات فوق الصوتية تمكن من إعطاء معلومات عن حالة تصلب الخرسانة، بينما المقاومة الصوتية تشير إلى تصلب الخرسانة عند نفاذ الماء فيها.

خلال هذه الدراسة قمنا كذلك بتحديد سرعة الموجات فوق الصوتية المرتدة من قضبان الحديد الأسطوانية والمكسوة بالخرسانة، وذلك بهدف تحديد قصر وعمق هذه الإحصارات الحديدية في بنية التعزير الإسمنتية.

**كلمات مفتاحية :** اختبار غير تدميري ، الخرسانة، سرعة الموجات فوق الصوتية، الخرسانة المسلحة، قضيب من الحديد.

# Nomenclatures et abréviations

Indice	Signification
$\vec{u}$	Vecteur de l'onde plane
U	Amplitude d'élongation de l'onde plane
CL	Vitesse de propagation longitudinale (m/s)
CT	Vitesse de propagation transversale (m/s)
f	Fréquence de l'onde ultrasonore (Hz)
L	Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )
T	Période de l'onde ultrasonore (s)
k	Vecteur de l'onde ultrasonore (rd/m)
Sij	Tenseur de déformation avec (i,j=1,2,3).
$\vec{F}$	Densité des forces extérieures par unité de volume
$\vec{p}$	Densité des forces extérieures par unité de surface
$\vec{n}$	Vecteur normal
Tij	Contrainte
Cijkl	Constantes élastiques de la rigidité du matériau
R	Coefficient de réflexion
T	Coefficient de transmission
uT	Vecteur rotationnel (transversal) ,
uL	Vecteur irrotationnel (longitudinal)
Vg	Vitesse de groupe de l'onde ultrasonore (m/s)
Zl	Impédance acoustique de l'onde ultrasonore dans le liquide ( $N.s/m^3$ )
ZL	Impédance acoustique de l'onde longitudinale dans le solide ( $N.s/m^3$ )
ZT	Impédance acoustique de l'onde transversale dans le solide ( $N.s/m^3$ )
f	La fréquence d'émission en Hz
P	la pression d'onde acoustique ( $kg.m^{-1}.s^{-2}$ )
$\lambda$ et $\mu$	Constantes de LAME (Pa)
$\phi$	Potentiel de l'onde longitudinale
$\Psi$	Potentiel de l'onde transversale
$\lambda$	La longueur de l'onde ultrasonore ( m )
$\alpha_L$	Angle d'incidence longitudinale
$\alpha_T$	Angle d'incidence transversale
$V_g$	Vitesse de groupe (m/s)
$\rho$	Masse volumique de solide ( $Kg/cm^3$ )
$\rho_{abs}$	Masse volumique absolue ( $Kg/m^3$ )
$\rho_{app}$	Masse volumique apparente ( $Kg/m^3$ )
$\rho_l$	Masse volumique de l'eau,
SSB	Surface Spécifique Blaine ( $cm^2/g$ )

# Nomenclatures et abréviations *(suite)*

$W$	La teneur en eau
$ES$	L'équivalent de sable
$PS$	Propreté superficielle
$f_c$	Résistance à la compression
$f_t$	Résistance à la traction
$\nu$	Module de poisson
$E$	Module d'Young (GPa)
$G$	Module de cisaillement (GPa)
$\Delta t$	Différence du temps de vol ( $\mu s$ )
$\Delta f$	Différence de fréquence entre deux modes (Hz)
$\Delta V$	Variation de l'amplitude crête à crête
$d$	Diamètre de la tige cylindrique
$a$	Rayon de la tige cylindrique
$C$	$CaO$
$A$	$Al_2O_3$
$F$	$Fe_2O_3$
$M$	$MgO$
$H$	$H_2O$
$N$	$Na_2O$
$K$	$K_2O$
$\underline{C}$	$CO_2$
$S$	$SiO_2$
$\underline{S}$	$SO_3$
$C_2S$	Silicate dicalcique
$C_3S$	Silicate tricalcique,
$C_3A$	Aluminate tricalcique
$C_4AF$	L'alumino-ferrite tétracalcique
$V_a$	Volumes de ciment anhydre
$V_e$	Volume de l'eau consommée
$m_c/m_s$	Rapport massique ciment/sable
$m_e/m_c$	Rapports massique eau/ciment
$m_e/m_s$	Rapport massique ciment/sable



# Table des matières

Dédicaces	i
Remerciement	ii
Résumé / Abstract	iii
ملخص	iv
Nomenclatures et abréviations	v
Table des matières	vii
Table des figures	xii
Liste des tableaux	xiv
Introduction générale	1

## Partie I : Étude Bibliographique

### Chapitre 1 : Propagation des ondes US et cheminement des "Rayons" à travers un cylindre plein.

1.1. Introduction .....	4
1.2. Utilisation des ondes ultrasonores .....	4
1.2.1. Génération des ondes ultrasonores .....	4
1.2.2. Détection des ondes ultrasonores .....	4
1.2.3. Propagation des ondes ultrasonores .....	5
1.3. Différents types des ondes ultrasonores .....	5
1.3.1. Ondes longitudinales (ondes L) .....	5
1.3.2. Les ondes transversales (ondes T) .....	5
1.3.3. Ondes de surface .....	6
1.3.4. Ondes de Lamb .....	6
1.4. Transducteurs piézoélectriques .....	7
1.4.1. Effet piézoélectrique .....	7
1.4.2. Céramiques piézoélectriques .....	7
1.5. Contrôle non destructif (CND) .....	8
1.5.1. Normalisation du CND .....	8
1.5.2. CND par ultrason .....	9
1.5.3. Montage expérimental CND sur échantillon en contact avec le transducteur .....	9
1.5.4. Montage expérimental CND sur échantillon immergé dans l'eau .....	10
1.5.5. Avantages et inconvénients du CND .....	11

1.5.5.1. Avantages .....	11
1.5.5.2. Inconvénients .....	11
<b>1.5.6. Paramètres caractéristiques du CND .....</b>	<b>11</b>
1.5.6.1. Vitesse ultrasonore.....	11
1.5.6.2. Atténuation .....	12
<b>1.6. Étude théorique de la diffusion acoustique.....</b>	<b>12</b>
<b>1.6.1. Propagation dans les solides et dans les liquides .....</b>	<b>12</b>
<b>1.6.2. Déformation et contrainte.....</b>	<b>12</b>
1.6.2.1. Loi de HOOK .....	14
1.6.2.2. Équation de propagation dans un corps isotrope .....	14
<b>1.6.3. Coefficients de réflexion et de transmission à une interface liquide / solide.....</b>	<b>15</b>
1.6.3.1. Position du problème .....	15
1.6.3.2. Équation de continuité .....	16
<b>1.6.4. Expressions des coefficients de réflexion et de transmission .....</b>	<b>17</b>
<b>1.7. Cheminement des " rayons " ultrasonores dans un cylindre plein.....</b>	<b>19</b>
<b>1.8. Introduction des modes (n, m) .....</b>	<b>20</b>
1.8.1. Équation des modes .....	21
1.8.2. Expressions de l'équation des modes en fonction de $\alpha$ .....	22
<b>1.9. Ou <math>f_0(\alpha)</math> est une fonction indépendante de <math>\phi</math> et <math>l</math> .....</b>	<b>23</b>
1.9.1. Calcul des temps d'arrivée des échos.....	23
1.9.2. Calcul de l'amplitude des échos .....	24
1.9.3. Facteur de réflexion – transmission $G_{nm}(\alpha_i)$ .....	24
<b>1.10. Conclusion.....</b>	<b>25</b>
<b>1.11. Références Bibliographiques.....</b>	<b>25</b>

## Chapitre 2 : Hydratation de ciment et comportement du béton

<b>2.1. Introduction.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2. Ciment.....</b>	<b>27</b>
2.2.1. Fabrication du ciment .....	27
2.2.2. Caractéristiques du ciment et de sa composition.....	29
2.2.3. Composition du ciment .....	29
2.2.3.1. Clinker.....	29
2.2.3.2. Sulfate de calcium.....	30
2.2.3.3. Ajouts éventuels .....	30
2.2.4. Principales catégories de ciment .....	31
2.2.5. Hydratation des minéraux de clinker pur.....	32
2.2.5.1. Hydratation de $C_3S$ .....	32
2.2.5.2. Hydratation du $C_2S$ .....	32
2.2.5.3. Hydratation du $C_3A$ .....	33
2.2.5.4. Hydratation du $CA_4F$ .....	34
2.2.6. Différents types de retraits .....	34
2.2.7. Concentration le Châtelier.....	34
<b>2.3. Béton.....</b>	<b>35</b>

<b>2.3.1. Propriétés mécaniques du béton à température ambiante .....</b>	<b>35</b>
2.3.1.1. Comportement en traction.....	35
2.3.1.2. Comportement en compression.....	37
<b>2.3.2. Béton endommagé .....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.3. Effet du rapport E/C sur le comportement du béton.....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.4. Béton renforcé par des fibres .....</b>	<b>39</b>
2.3.4.1. Mécanismes de fonctionnement des fibres dans le béton .....	39
2.3.4.2. Choix du type de fibres .....	39
2.3.4.3. Influence de l'orientation préférentielle des fibres .....	40
<b>2.4. Béton armé.....</b>	<b>41</b>
2.4.1. Enrobage des armatures (aciers) .....	41
2.4.2. Caractéristiques mécaniques de l'acier .....	41
<b>2.5. Méthodes d'évaluation des bétons .....</b>	<b>42</b>
2.5.1. Méthodes destructives .....	42
2.5.2. Mesures semi destructives .....	42
2.5.3. Méthode non destructives par ultrasons .....	43
<b>2.6. Conclusion.....</b>	<b>43</b>
<b>2.7. Références bibliographiques .....</b>	<b>44</b>

---

## *Partie II : Résultats Expérimentaux*

---

### *Chapitre 3 : Identification de ciment, des granulats et formulation de béton*

<b>3.1. Introduction.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2. Identification du ciment d'Agadir .....</b>	<b>46</b>
<b>3.2.1. Identification physique.....</b>	<b>46</b>
3.2.1.1. Masse volumique absolue .....	46
3.2.1.2. Masse volumique apparente.....	46
3.2.1.3. Mesure de SSB par perméabilité de Blaine .....	47
<b>3.2.2. Identification chimique .....</b>	<b>47</b>
3.2.2.1. Composition chimique .....	47
3.2.2.2. Composition potentielle .....	48
3.2.2.3. Normes caractéristiques .....	48
<b>3.2.3. Identification mécanique.....</b>	<b>49</b>
3.2.3.1. Analyse granulométrique du ciment .....	49
3.2.3.2. Résistance mécanique : Compression et flexion.....	49
<b>3.3. Caractéristiques de sable extrait d'Oued Souss .....</b>	<b>50</b>
<b>3.3.1. Analyse granulométrique de sable extrait d'Oued Souss.....</b>	<b>50</b>
<b>3.3.2. Identification physico-chimique de Sable extrait d'Oued Souss .....</b>	<b>51</b>
3.3.2.1. Classe granulaire du sable : Granulométrie .....	51

3.3.2.2. Masse volumique absolue et apparentes .....	51
3.3.2.3. Teneur en eau de sable .....	52
3.3.2.4. Equivalent de sable .....	52
3.3.2.5. Spectroscopie de fluorescence de sable .....	53
<b>3.4. Formulation du béton .....</b>	<b>53</b>
<b>3.4.1. Analyse granulométriques des gravillons <math>G_1</math> et <math>G_2</math>.....</b>	<b>53</b>
3.4.1.1. Classe granulaire des gravillons.....	54
3.4.1.2. Masse volumique absolue et apparente.....	54
3.4.1.3. Teneur en eau des gravillons.....	55
3.4.1.4. Propreté superficielle .....	55
<b>3.4.2. Tracé de la courbe granulaire de référence OAB.....</b>	<b>56</b>
3.4.2.1. Détermination de la compacité du béton.....	57
3.4.2.2. Volume absolu des granulats .....	58
3.4.2.3. Poids des granulats.....	58
<b>3.5. Mesure de la résistance par destruction d'échantillon .....</b>	<b>59</b>
<b>3.5.1. Résistance à la compression du béton.....</b>	<b>59</b>
<b>3.5.2. Résistance à la traction du béton .....</b>	<b>59</b>
<b>3.5.3. Préparation du mélange.....</b>	<b>60</b>
3.5.3.1. Confection des éprouvettes .....	60
3.5.3.2. Masse volumique des éprouvettes.....	60
3.5.3.3. Mesure de la résistance des éprouvettes .....	61
3.5.3.4. Estimation du module d'Young des bétons .....	63
3.5.3.5. Estimation du module de cisaillement du béton .....	64
<b>3.6. Conclusion.....</b>	<b>65</b>
<b>3.7. Références bibliographiques .....</b>	<b>66</b>

## *Chapitre 4* : Caractérisation des mortiers par les ondes ultrasonores

<b>4.1. Introduction .....</b>	<b>67</b>
<b>4.2. Présentation du montage de la technique expérimentale .....</b>	<b>67</b>
<b>4.3. Matériels et méthodologie .....</b>	<b>68</b>
<b>4.3.1. Choix de récipients .....</b>	<b>68</b>
<b>4.3.2. Préparation des échantillons .....</b>	<b>68</b>
<b>4.3.3. Méthode de mesure expérimentale .....</b>	<b>69</b>
4.3.3.1. Mesure de l'atténuation.....	70
4.3.3.2. Mesure de l'impédance acoustique .....	72
4.3.3.3. Mesure de la vitesse .....	72
4.3.3.4. Mesure du module de coefficient de réflexion R.....	73
<b>4.4. Effet de la microstructure du sable sur l'évolution des paramètres viscoélastiques .....</b>	<b>74</b>
<b>4.4.1. Histogrammes temporels .....</b>	<b>74</b>
<b>4.4.2. Histogrammes fréquentiels .....</b>	<b>77</b>
<b>4.4.3. Amplitude crête à crête .....</b>	<b>80</b>
<b>4.4.4. Coefficient de réflexion R .....</b>	<b>82</b>
<b>4.4.5. Vitesse ultrasonore .....</b>	<b>84</b>
<b>4.4.6. Impédance acoustique .....</b>	<b>86</b>

4.4.7. Atténuation ultrasonore .....	87
4.5. Effet de la température sur l'évolution des paramètres viscoélastiques .....	88
4.5.1. Vitesse ultrasonore .....	89
4.5.2. Impédance acoustique .....	90
4.5.3. Atténuation ultrasonore .....	91
4.6. Conclusion.....	92
4.7. Références bibliographiques .....	92

## *Chapitre 5* : Évaluation ultrasonore de la profondeur et le diamètre des tiges de fer enfouies dans mortier

5.1. Introduction.....	94
5.2. Préparation des échantillons .....	94
5.3. Principe de l'expérimentation.....	95
5.3.1. Montage expérimental.....	95
5.3.2. Technique de contrôle .....	96
5.4. Étude de la réponse ultrasonore des tiges immergées dans l'eau.....	98
5.4.1. Signal temporel .....	98
5.4.2. Spectre de rétrodiffusion .....	98
5.4.3. Vitesse du groupe $V_g$ .....	99
5.5. Application aux mortiers renforcés par les tiges en fer.....	99
5.5.1. Vitesse ultrasonore dans le mortier .....	100
5.5.1.1. Géométrie du problème.....	100
5.5.1.2. Détermination de la vitesse ultrasonore dans le mortier .....	101
5.5.2. Échos du signal rétrodiffusé par le mortier renforcé par le fer.....	101
5.5.3. Détermination de la profondeur de la tige .....	103
5.5.4. Amplitude spectrales de l'écho $E_2$ .....	104
5.5.5. Détermination de diamètre des tiges enrobées par le mortier .....	106
5.6. Conclusion.....	107
5.7. Références bibliographiques .....	107

Conclusion générale	109
---------------------	-----

# Table des figures

## Chapitre 1.

Figure 1. 1. Ondes longitudinales .....	5
Figure 1. 2. Ondes Transversales.....	5
Figure 1. 3. Ondes de RAYLEIGH.....	6
Figure 1. 4. Exemple de propagation des ondes de LAMB.....	6
Figure 1. 5. Effet piézoélectrique [4].....	7
Figure 1. 6. Lentille acoustique solide plongée dans deux fluides 1 et 2.....	8
Figure 1. 7. Propagation des impulsions ultrasonores dans un échantillon sans défauts.....	9
Figure 1. 8. Propagation des impulsions ultrasonores dans un échantillon contenant un défaut.....	10
Figure 1. 9. Montage expérimental pour CND sur échantillon immergé, par balayage de la surface.....	10
Figure 1. 10. Solide déformé sous l'action de forces extérieures.....	13
Figure 1. 11. Réflexion et transmission à une surface liquide/solide.....	16
Figure 1. 12. Réflexion et transmission normales à la surface entre des deux milieux.....	18
Figure 1. 13. Géométrie du problème. Parcours des rayons.....	20
Figure 1. 14. Modes (n, m), réflexions intérieures au cylindre .....	20

## Chapitre 2.

Figure 2. 1. Processus de fabrication du ciment.....	28
Figure 2. 2. Reflected light micrograph of RM 848 [3].....	30
Figure 2. 3. Mécanisme d'hydratation de C3S [7].....	32
Figure 2. 4. Structure représente modèle de l'Ettringite [11].....	33
Figure 2. 5. Présentation schématique de la concentration de la Châtelier.....	34
Figure 2. 6. Présentation du volume apparent et du volume absolu [17].....	35
Figure 2. 7. Comportement de béton en traction directe [18].....	36
Figure 2. 8. Courbe contrainte-déplacement dans un essai de traction sur éprouvette entaillée, d'après Phillips et al. [19].....	37
Figure 2. 9. Comportement de béton en compression simple d'après Ramtani [20].....	37
Figure 2. 10. Influence du rapport E/C sur la résistance à la rupture en compression simple du béton à différentes échéances [23].....	38
Figure 2. 11. Comportement en traction directe en fonction du pourcentage en fibres [24]. .....	39
Figure 2. 12. Différentes formes géométriques de fibres métalliques [25].....	40
Figure 2. 13. Influence de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion [26]. .....	40
Figure 2. 14. Diagramme expérimental $\sigma_s - \epsilon_s$ en traction simple et calcule à l'ELU [27].....	42

## Chapitre 3.

Figure 3. 1. Courbe d'analyse granulométrique du Sable Oued Souss.....	50
Figure 3. 2. Courbe granulométrique des gravillons G1 et G2.....	54
Figure 3. 3. Courbes granulométriques des gravillons, sable et de référence (OAB) .....	56
Figure 3. 4. Dosage en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité [1].....	58
Figure 3. 5. Évolution de $f_c$ en fonction du temps de conservation .....	62
Figure 3. 6. Évolution de $f_t$ en fonction du temps de conservation .....	62
Figure 3. 7. Évolution de module d'Young en fonction du temps de conservation.....	64
Figure 3. 8. Évolution de module de cisaillement en fonction du temps de conservation.....	65

## Chapitre 4.

Figure 4. 1. Montage monostatique.....	67
Figure 4. 2. Géométrie de problème.....	69
Figure 4. 3. Parcours des signaux rétrodiffusés par un récipient enfermant le mortier.....	69
Figure 4. 4. Type du signal rétrodiffusé par le récipient enfermant le mortier, 0,5MHz .....	70
Figure 4. 5. Détermination de la vitesse à partir de A2 et A3 .....	73
Figure 4. 6. Histogramme des signaux temporels rétrodiffusés par le mortier.....	75
Figure 4. 7. Zoom des échos A2 et A3 : Périodes d'hydratation du mortier.....	75
Figure 4. 8. Superposition des signaux rétrodiffusés par le mortier (0,200mm).....	76
Figure 4. 9. Superposition des signaux rétrodiffusés par le mortier (0,250mm).....	76
Figure 4. 10. Superposition des signaux rétrodiffusés par le mortier (0,315mm).....	77
Figure 4. 11. Superposition des signaux rétrodiffusés par le mortier (0,500mm).....	77
Figure 4. 12. Amplitude spectrale des échos A2 et A3, mi sont les modes de résonance. ....	78
Figure 4. 13. Superposition des amplitudes spectrales A2 et A3.....	78
Figure 4. 14. Histogramme des amplitudes spectrales des échos A2 et A3 (0,200mm).....	79
Figure 4. 15. Histogramme des amplitudes spectrales des échos A2 et A3 (0,250mm).....	79
Figure 4. 16. Histogramme des amplitudes spectrales des échos A2 et A3 (0,315mm).....	80
Figure 4. 17. Histogramme des amplitudes spectrales des échos A2 et A3 (0,500mm).....	80
Figure 4. 18. Évolution de l'amplitude crête à crête, périodes d'hydratation du mortier.....	81
Figure 4. 19. Évolution de l'amplitude crête à crête, différentes tailles à T=42°C.....	82
Figure 4. 20. Évolution du coefficient de réflexion, différentes tailles à T=42°C.....	83
Figure 4. 21. Variation du temps de prise en fonction des tailles des grains de sable.....	84
Figure 4. 22. Évolution de la vitesse, différentes tailles à T=42°C.....	85
Figure 4. 23. Stades caractérisant l'évolution de la vitesse .....	86
Figure 4. 24. Évolution de l'impédance acoustique, différentes tailles à T=42°C .....	87
Figure 4. 25. Évolution de l'atténuation, différentes tailles à T=42°C.....	88
Figure 4. 26. Évolution de la vitesse, différentes températures.....	90
Figure 4. 27. Évolution de l'impédance acoustique, différentes températures.....	91
Figure 4. 28. Évolution de l'atténuation, différentes températures.....	91

## Chapitre 5.

Figure 5. 1. Géométrie de l'échantillon.....	95
Figure 5. 2. Montage expérimental .....	96
Figure 5. 3. Onde circonférentielle sur un cylindre massif.....	97
Figure 5. 4. Type des signaux rétrodiffusés par la tige 6mm .....	97
Figure 5. 5. Signal temporel rétrodiffusé par la tige 6mm. ....	98
Figure 5. 6. Spectre rétrodiffusé par la tige 6 mm .....	99
Figure 5. 7. Parcours du signal dans le mortier.....	100
Figure 5. 8. Types des signaux rétrodiffusés par une structure de mortier. ....	101
Figure 5. 9. Signal rétrodiffusé par la tige 6mm enfouie dans le mortier, p=2cm .....	102
Figure 5. 10. Signal rétrodiffusé par la tige 6mm enfouie dans le mortier, p=4cm.....	102
Figure 5. 11. Signal rétrodiffusé par la tige 6mm enfouie dans le mortier, p=6cm .....	103
Figure 5. 12. Comparaison de la profondeur mesurée et choisie. ....	104
Figure 5. 13. Spectre rétrodiffusé (l'écho $E_2$ ), tige 6 mm enrobée par le mortier.....	105
Figure 5. 14. Variation de l'amplitude spectrale en fonction de la profondeur de la tige.....	106
Figure 5. 15. Diamètre déterminé $d_{det}$ en fonction de diamètre de la tige $d$ .....	107

# Liste des tableaux

## Chapitre 1.

Tableau 1. 1. Constantes de LAME de quelques matériaux [8] .....	14
Tableau 1. 2. Propriétés acoustiques dans les liquides [11] .....	19
Tableau 1. 3. Propriétés acoustiques dans les solides [11] .....	19

## Chapitre 3.

Tableau 3. 1. Masse volumique absolue et apparente du ciment CPJ 45.....	47
Tableau 3. 2. Composition chimique des produits initiaux du ciment CPJ 45.....	48
Tableau 3. 3. Composition potentielle de phase du ciment CPJ 45.....	48
Tableau 3. 4. Normes caractéristiques du ciment CPJ 45.....	49
Tableau 3. 5. Analyse granulométrique du ciment CPJ 45.....	49
Tableau 3. 6. Résistance à la compression et flexion de ciment CPJ 45.....	50
Tableau 3. 7. Analyse granulométrique du sable. ....	50
Tableau 3. 8. Classe des granulats [5] .....	51
Tableau 3. 9. Masse volumique absolue et apparente de sable.....	52
Tableau 3. 10. Teneur en eau de sable.....	52
Tableau 3. 11. Composition minéralogique de sable [6].....	53
Tableau 3. 12. Analyse granulométrique du gravillon G1 .....	53
Tableau 3. 13. Analyse granulométrique du gravillon G2.....	53
Tableau 3. 14. Classe granulaires des gravillons G1 et G2 .....	54
Tableau 3. 15. Masse volumique absolue et apparente des gravillons G1 et G2.....	55
Tableau 3. 16. Teneur en eau de gravillons G1 et G2 .....	55
Tableau 3. 17. Propreté superficielle de G1 et G2.....	55
Tableau 3. 18. Volume absolu des granulats en % .....	57
Tableau 3. 19. Volumes absolus des granulats en litre (l).....	58
Tableau 3. 20. Poids des granulats en Kg, pour préparer un mètre cube du béton, .....	58
Tableau 3. 21. Volume apparent des granulats pour m3 du béton, .....	59
Tableau 3. 22. Composition d'un mètre cube m3 du béton, .....	59
Tableau 3. 23. Masse volumique des éprouvettes.....	61
Tableau 3. 24. Les résistances à la compression et à la traction.....	61
Tableau 3. 25. Propriétés mécaniques des bétons, d'après Dreux et Festa [1]. ....	62
Tableau 3. 26. Modules d'Young ACI [8], Slate et al. [10] et EN 1992-1-1.....	63
Tableau 3. 27. Module du cisaillement $\mu$ .....	64



## Chapitre 4.

Tableau 4. 1. Caractéristiques de l'eau plexiglas et le verre. ....	68
Tableau 4. 2. Variations du temps du vol $\Delta t$ . ....	76
Tableau 4. 3. Variations de la fréquence $\Delta f$ . ....	79
Tableau 4. 4. Densité des mortiers à 24, 48 et 72h.....	87
Tableau 4. 5. Atténuation ultrasonore pour les temps de la prise 24, 48 et 72h.....	88

## Chapitre 5.

Tableau 5. 1. Caractéristiques mécaniques de fer.....	95
Tableau 5. 2. Vitesse du groupe $V_g$ de l'onde circonférentielle diffusée. Tige 6mm.....	99
Tableau 5. 3. Détermination de la profondeur de la tige dans la structure d'enrobage.....	104
Tableau 5. 4. Amplitude spectrale au voisinage de 0,5 MHz, tige 6mm .....	105
Tableau 5. 5. Diamètres déterminés quand les tiges sont enrobées. ....	106

# *Introduction générale*

<b>1. Contexte de l'étude.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Objectifs de l'étude .....</b>	<b>2</b>
<b>3. Plan de l'étude .....</b>	<b>3</b>
<b>4. Références bibliographiques .....</b>	<b>3</b>

---

## **1.Contexte de l'étude**

Une synthèse des travaux du début du siècle dernier montre les premiers dispositifs de la mesure de la prise qui sont principalement basés sur l'appareil de Vicat. L'étude de la prise a été ensuite abordée par d'autres techniques comme la microscopie électronique et la conductimétrie électrique qui sont fondées sur la mesure de dégagement de la chaleur induit par le processus d'hydratation. Actuellement le test de Vicat représente l'essai standard du suivi de la prise, mais le résultat obtenu par cet essai (temps de début et de fin de la prise) est largement insuffisant pour juger par exemple le temps pendant lequel le matériau est frais ou durci.

Les essais de contrôle des structures de ferrailages sont divers. On trouve la mesure de potentielle d'électrodes pour évaluer la corrosion des armatures, la mesure de la vitesse de corrosion pour évaluer la perte d'une section de l'acier en fonction du temps et le capacimètre électrique pour mesurer l'humidité et localiser la surface humide d'une armature. Les propriétés des bétons sont évaluées par la mesure de la résistance à la compression et à la flexion par des grandes machines à presses. Ces méthodes sont partiellement ou totalement destructives, car elles laissent des impacts et des trous dans les structures et les informations obtenus ne sont pas en situ. Nous développons donc une technique de contrôle non destructif (CND) basée sur la rétrodiffusion des ondes ultrasonores pour caractériser la prise des mortiers et évaluer le dimensionnement des tiges en fer enfouies dans le mortier (béton).

Les techniques de contrôle par les ondes ultrasonores sont employées comme une technologie d'évaluation non destructive utilisées dans différents domaine (médecine, aéronautique..), mais elles ne sont pas encours avancées dans le domaine de génie civil en termes de normalisation. Ces techniques de contrôle sont particulièrement faciles à mettre en œuvre car elles nécessitent des équipements relativement légers et sans danger pour les utilisateurs. Elles permettent aussi de satisfaire à une demande de performances renforcées en termes de caractérisation (mesure en profondeur, précision, rapidité,...). Ces dernières années, un certain nombre d'études ont été publiées concernant les ultrasons et la résistance des matériaux cimentaires. La dispersion et l'atténuation des ondes ultrasonores dans les mortiers frais et la comparaison entre les résultats expérimentaux

obtenus et ceux prédit théoriquement ont fait l'objet de plusieurs publications d'Aggelis [1-2]. Et récemment, *Philippidis et al.* ont développé une étude expérimentale sur la dispersion et l'atténuation des ondes ultrasonores dans le béton [3]. *del Rio et al* [4], ont aussi caractérisé l'hydratation des béton par des techniques ultrasonores. Idem un travail fait par *Philippidis et Aggelis* [5] sur une approche ultrasonique pour évaluer l'effet de rapport massique eau/ciment (E/C) sur la résistance du béton. Plusieurs études aussi ont été publiées par *T.Voigt* [6] sur l'application des ondes ultrasonores pour caractériser les matériaux cimentaire à très jeune âge.

## **2.Objectifs de l'étude**

Des études qui ont été effectuées jadis, ont montré que le rapport massique eau /ciment (E/C) joue un rôle important et prédominant dans l'augmentation de la rigidité des mortiers et influence sur les retraits des structures cimentaires. Également la nature du ciment influence sur le durcissement des structures des mortiers autant par sa composition chimique que par sa morphologie [7]. Pour pouvoir préciser correctement le comportement du mortier dans son utilisation, il est nécessaire de comprendre comment réagit ce matériau sous l'effet de la température et de la microstructure du sable. Les ouvrages en béton tiennent une grande part de leurs propriétés mécaniques et de leurs armatures. Le premier réseau de ferrailage se situe à quelques centimètres de profondeur sous la surface (entre 2 et 6cm). Le principal rôle de la couche de béton est d'assurer la protection de ces armatures en fer contre les agents agressifs venant du milieu ambiant entourant l'ouvrage (air, eau, ions, . . .) [8]. Il est donc important de déterminer les caractéristiques de cette couche de béton et les tiges en fer enrobées par le béton (mortier).

L'objectif principal de notre travail est de mieux comprendre les phénomènes de structuration des matériaux cimentiers (mortiers, béton et béton armé). Pour ce faire, une technique ultrasonique par réflexion a été mise au point pour le contrôle des matériaux cimentaire en évaluant les paramètres viscoélastiques des signaux rétrodiffusés par ces matériaux. Nous avons donc articulé notre étude autour de quatre axes relatifs à la structuration des mortiers et bétons armés:

- ⊖ Le premier axe est l'étude du processus de structuration et de la prise en temps réel des échantillons de mortier.
- ⊖ Le deuxième concerne l'étude de l'effet de la microstructure du sable et la température sur la prise des mortiers.
- ⊖ Le troisième est d'évaluer l'influence des diamètres des tiges cylindriques en fer sur la propagation ultrasonore (problème direct).
- ⊖ Le quatrième est de déterminer la profondeur et le diamètre des tiges en fer enfouies dans la couche de mortier d'enrobage (problème inverse).

### 3. Plan de l'étude

Cette thèse est organisée en cinq chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons fait dans sa première partie un rappel bibliographique sur les ondes ultrasonores et la propagation des ondes ultrasonores dans les solides et les liquides. Dans sa deuxième partie, nous avons présenté une étude sur le cheminement des "rayons" ultrasonores dans un cylindre plein.

Dans le deuxième chapitre, une revue bibliographique sur le processus de fabrication du ciment, les propriétés physico-chimiques des constituants principaux du ciment Portland et les mécanismes d'hydratation conduisant à la prise du ciment sont rappelés. Nous avons cité aussi une revue de la littérature sur les méthodes d'évaluation destructives et non destructives des matériaux cimentaires.

Dans le troisième chapitre, nous avons exposé les résultats expérimentaux obtenus de l'identification physique et chimique du ciment portland *CPJ 45* produit par la cimenterie d'Agadir et le sable extrait d'*Oued Souss*, puis nous avons étudié la formulation du béton par la méthode de *Dreux Gorisse*.

Dans le quatrième chapitre, nous avons expliqué la technique expérimentale utilisée dans cette étude, ensuite nous avons présenté les résultats expérimentaux obtenus en étudiant l'effet de la température et la microstructure du sable sur la qualité des mortiers par cette technique.

En fin dans le cinquième et dernier chapitre, nous avons évalué la réponse ultrasonore du dimensionnement des tiges en fer enfouies dans le mortier.

### 4. Références bibliographiques

- [1] D.G. Aggelis, D.Polyzos, T.P. Philippidis."Wave dispersion and attenuation in fresh mortar: theoretical predictions vs. Experimental results ".J. of Mechanics and Physics of Solids, Vol.53, P.857-883.(2005).
- [2] D. G. Aggelis, T. P. Philippidis " Ultrasonic wave dispersion and attenuation in fresh mortar ". NDT & E International, Volume 37, Issue 8, Pages 617-631. (2004).
- [3] T. P. Philippidis, D. G. Aggelis. «Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete" Ultrasonics, Volume 43, Issue 7, Pages 584-595. (2005).
- [4] L.M. del Rio et al. "Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing". Ultrasonics 42 ,527–530. (2004).
- [5] T.P. Philippidis, D.G. Aggelis "An acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete ". Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 4, ,Pages 525-538. (2003).
- [6] T.Voigt ,Guang Ye, Z.Sun, S.P. Shah and K.V. Breugel." Early age microstructure of Portland cement mortar investigated by ultrasonic shear waves and numerical simulation ". Cement and Concrete Research. 35, 858– 866. (2005).
- [7] Baroghel-Bouny V. and Kheirbek .A., " Effect of mix parameters on autogenous deformations of cement pastes microstructures on autogenous deformations", proceeding of the international RILEM work shop « Shrinkage 2000 » France,( 2000).
- [8] P.E. Grattan-Bellew. "Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes". *Construct. Build. Mat.* , 10(1) :3–16, (1996).

# *Partie I*

---

## *Étude Bibliographique*

---

<b>1.1. Introduction .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. Utilisation des ondes ultrasonores .....</b>	<b>4</b>
1.2.1. Génération des ondes ultrasonores .....	4
1.2.2. Détection des ondes ultrasonores .....	4
1.2.3. Propagation des ondes ultrasonores .....	5
<b>1.3. Différents types des ondes ultrasonores .....</b>	<b>5</b>
1.3.1. Ondes longitudinales (ondes L) .....	5
1.3.2. Les ondes transversales (ondes T).....	5
1.3.3. Ondes de surface.....	6
1.3.4. Ondes de Lamb .....	6
<b>1.4. Transducteurs piézoélectriques .....</b>	<b>7</b>
1.4.1. Effet piézoélectrique.....	7
1.4.2. Céramiques piézoélectriques .....	7
<b>1.5. Contrôle non destructif (CND).....</b>	<b>8</b>
1.5.1. Normalisation du CND.....	8
1.5.2. CND par ultrason .....	9
1.5.3. Montage expérimental CND sur échantillon en contact avec le transducteur .....	9
1.5.4. Montage expérimental CND sur échantillon immergé dans l'eau .....	10
1.5.5. Avantages et inconvénients du CND.....	11
1.5.5.1. Avantages .....	11
1.5.5.2. Inconvénients .....	11
1.5.6. Paramètres caractéristiques du CND .....	11
1.5.6.1. Vitesse ultrasonore.....	11
1.5.6.2. Atténuation .....	12
<b>1.6. Étude théorique de la diffusion acoustique.....</b>	<b>12</b>
1.6.1. Propagation dans les solides et dans les liquides .....	12
1.6.2. Déformation et contrainte.....	12
1.6.2.1. Loi de HOOK .....	14
1.6.2.2. Équation de propagation dans un corps isotrope .....	14
1.6.3. Coefficients de réflexion et de transmission à une interface liquide / solide.....	15
1.6.3.1. Position du problème .....	15
1.6.3.2. Équation de continuité .....	16
1.6.4. Expressions des coefficients de réflexion et de transmission .....	17
<b>1.7. Cheminement des " rayons " ultrasonores dans un cylindre plein .....</b>	<b>19</b>
<b>1.8. Introduction des modes (n, m) .....</b>	<b>20</b>
1.8.1. Équation des modes.....	21
1.8.2. Expressions de l'équation des modes en fonction de $\alpha$ .....	22
<b>1.9. Ou <math>f_0(\alpha)</math> est une fonction indépendante de <math>\varphi</math> et l.....</b>	<b>23</b>
1.9.1. Calcul des temps d'arrivée des échos.....	23
1.9.2. Calcul de l'amplitude des échos .....	24
1.9.3. Facteur de réflexion – transmission $G_{nm}(\alpha_i)$ .....	24
<b>1.10. Conclusion.....</b>	<b>25</b>
<b>1.11. Références Bibliographiques .....</b>	<b>25</b>

## **1.1. Introduction**

Une onde ultrasonore est une onde de pression qui se propage dans la matière, dont la fréquence est supérieure à celle de domaine audible de 20 KHz à 1 GHz. Les ondes ultrasoniques servent aux nombreuses applications dans les domaines de la médecine, de la défense, de l'aéronautique et des industries.

## **1.2. Utilisation des ondes ultrasonores**

L'utilisation des ondes ultrasonores à travers un milieu quelconque implique la génération, la propagation et la réception (ou la détection) de l'onde. Il est donc nécessaire de définir ces trois étapes qui caractérisent l'utilisation des ondes ultrasonores.

### **1.2.1. Génération des ondes ultrasonores**

La génération des ondes ultrasonores est réalisée dans le domaine de fréquence évoquée précédemment. De manière générale, tout dispositif capable de produire des vibrations mécaniques de fréquence ultrasonore est un générateur des ultrasons. Cela dit, il convient de distinguer le système qui fournit de l'énergie, de l'élément qui reçoit cette énergie et la transmet au milieu de propagation sous forme des vibrations mécaniques de hautes fréquences, cet élément est le transducteur. En d'autres termes, la génération ondes ultrasonores consiste à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et par conséquent en énergie acoustique. Cette dernière se transmet dans le milieu étudié. Il faut également ajouter que les transducteurs peuvent être utilisés comme émetteurs ou comme récepteurs et dans certaines applications comme émetteurs et récepteurs à la fois, c'est le cas que nous avons développé dans le cadre de ce travail de recherche.

### **1.2.2. Détection des ondes ultrasonores**

Contrairement au phénomène de génération des ultrasons, la détection consiste à transformer de l'énergie acoustique (mécanique) en énergie électrique. Les transducteurs qui jouent le rôle de détecteur d'ultrasons sont généralement appelés microphones quand ils sont utilisés dans l'air et hydrophones quand la détection est réalisée dans l'eau. Il existe différents transducteurs qui se basent sur différents effets comme par exemple l'induction électromagnétique et l'effet piézoélectrique. Les récepteurs par effet piézoélectrique sont constitués de la même façon que les émetteurs piézoélectriques. Après la réception des signaux il faut les analyser par des systèmes électroniques comme un oscilloscope, ou par des applications informatiques sur ordinateur.

### 1.2.3. Propagation des ondes ultrasonores

Le passage d'une onde sonore dans un milieu est caractérisé par des vecteurs d'onde, sa vitesse et la pression acoustique. Ce passage varie très fortement selon la nature du milieu et sa structure. Il faut également signaler que les ondes ultrasonores sont plus vite amorties dans des milieux poreux ou bien dans les structures contenant de l'air.

### 1.3. Différents types des ondes ultrasonores

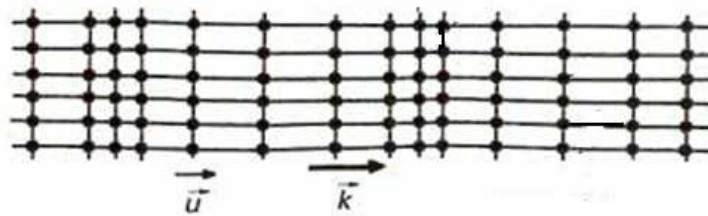
Dans le domaine de fréquence supérieure à 20kHz, trois principaux types d'ondes sont à considérer.

- *Les ondes longitudinales ou de compressions.*
- *Les ondes transversales ou de cisaillements.*
- *Les ondes de surface ou de RAYLEIGH.*

L'énergie de transmission des ondes ultrasonores dépend de la vibration des particules du milieu de transmission. En effet, chaque particule qui oscille affecte la particule voisine entraînant pour cette dernière une oscillation identique mais déphasée dans le temps.

#### 1.3.1. Ondes longitudinales (ondes L)

Les particules constituant le milieu se déplacent parallèlement à la direction de propagation, ce qui provoque des contraintes de compression et de traction (figure 1.1):

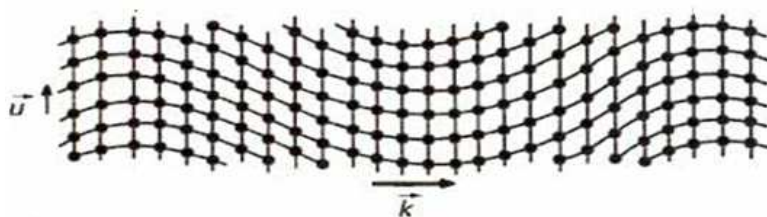


**Figure 1. 1. Ondes longitudinales**

Avec  $\vec{k}$  est le vecteur d'onde (sens de propagation)  
et  $\vec{u}$  est le déplacement des particules

#### 1.3.2. Les ondes transversales (ondes T)

Le mouvement des particules est perpendiculaire au sens de propagation, les contraintes provoquées sont donc de cisaillement (figure 2.2). Seuls les solides présentent une rigidité permettant la transmission des ondes transversales.



**Figure 1. 2. Ondes Transversales**



### 1.3.3. Ondes de surface

À la surface d'un milieu isotrope une onde à deux composantes peut se propager, elle porte le nom de Rayleigh qui l'a découverte en 1885. Les composantes longitudinale et transversale contenues dans le plan (défini par la normale à la surface et le vecteur d'onde) sont déphasées de  $\pi/2$ , d'où la polarisation est de forme elliptique, et les amplitudes de ces composantes décroissent différemment avec la profondeur. Le passage de l'onde provoque une ondulation de la surface qui se fait sentir jusqu'à une profondeur de l'ordre de la longueur d'onde (figure 1.3).

Les applications de ce type d'ondes sont diverses, elles sont utilisées pour la détection des défauts débouchant ou situés à proximité de la surface d'examen, et elles sont particulièrement adaptées pour le contrôle des tôles et des plaques.

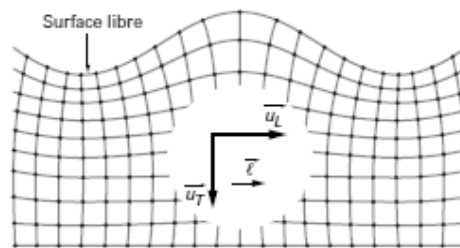


Figure 1. 3. Ondes de RAYLEIGH

### 1.3.4. Ondes de Lamb

Les ondes de LAMB se produisent par la transmission d'ondes transversales dans une pièce mince dont tout le volume participe à la vibration. Ce type d'ondes se développe uniquement dans les matériaux de faible épaisseur, et elles sont considérées comme le résultat de deux ondes longitudinales et de deux autres transversales. Suivant la façon dont la plaque vibre, on distingue les ondes symétriques et les ondes antisymétriques (figure 1.4).

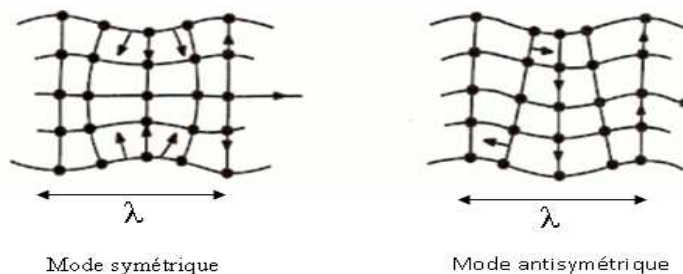


Figure 1. 4. Exemple de propagation des ondes de LAMB

## 1.4. Transducteurs piézoélectriques

Les transducteurs piézoélectriques sont des capteurs électromécaniques qui convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement. Ils sont les appareils qui ont la fonction d'émettre les ondes ultrasonores et de les recevoir. Dans de nombreuses applications il ne convient pas de réaliser directement la génération des ultrasons depuis l'élément piézoélectrique jusqu'au milieu, il faut donc prendre en considération la nécessité d'adaptation des impédances, la réduction de la fréquence, la largeur de la bande d'émission, etc. ...

Pour des applications à hautes fréquences, se sont les transducteurs piézoélectriques qui sont utilisés. La piézoélectricité est la propriété qu'ont certaines substances à se polariser électriquement lorsqu'elles sont soumises à des contraintes mécaniques. Ce phénomène est généralement dû à une dissymétrie du réseau cristallin et parfaitement réversible et il se présente sous deux aspects :

- *L'effet piézoélectrique direct se traduit par l'apparition d'un champ électrique entre les deux faces opposées du cristal lorsqu'il subit une déformation*
- *L'effet piézoélectrique inverse se traduit par l'apparition d'une déformation du cristal lorsqu'une différence de potentiel est appliquée.*

Notons que les déformations engendrées sont de faible amplitude, c'est à dire qu'elle ne dépasse pas la limite d'élasticité du matériau.

### 1.4.1. Effet piézoélectrique

En appliquant un courant alternatif sur un cristal piézoélectrique, le cristal se comprime et se décomprime alternativement et par conséquence il émet une onde ultrasonore. Cette excitation de cristal est réalisée par une impulsion électrique (figure 1.5). Le cristal entre alors en résonance et émet des ultrasons dont la fréquence dépend de l'épaisseur du cristal, pour des fréquences élevées l'épaisseur des cristaux est d'autant très mince. Le fonctionnement et la structure détaillée des transducteurs ultrasonores sont indiquée par plusieurs auteurs [1-2-3].

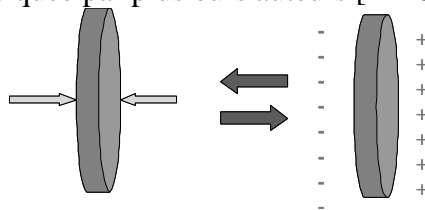


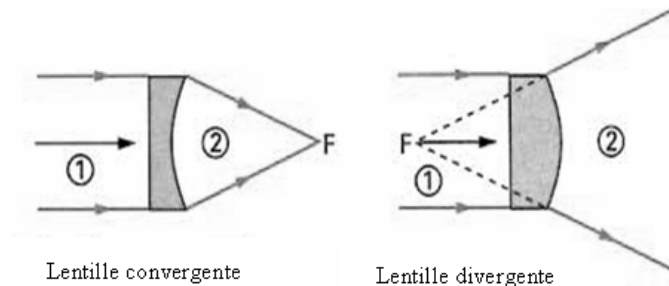
Figure 1. 5. Effet piézoélectrique [4]

### 1.4.2. Céramiques piézoélectriques

Le Titanate de Baryum de formule  $\text{BaTiO}_3$  est une substance polycristalline qui n'est pas naturellement piézoélectrique. Cette substance doit être spécialement traitée pour pouvoir présenter des caractéristiques piézoélectriques. Les transducteurs en Titanate de Baryum, dont l'utilisation est

très répandue pour la production et la détection des ultrasons sont fabriqués par mouture d'un mélange de Titanate et de Carbonate de Baryum, puis par chauffage à une température entre 1300 et 1400°C dans un moule de forme choisie.

Tous les céramiques piézoélectriques peuvent être fabriqués suivant n'importe quelle forme (rectangle, disque, cylindre plein, cylindre creux, coupelle, etc.). Un transducteur à Titanate de Baryum peut être polarisé suivant n'importe quelle direction de manière à sélectionner la bonne orientation pour la vibration ultrasonore. Le Titanate de Baryum a une impédance électrique très basse comparée à celle du quartz, de telle sorte que pour une même puissance acoustique fournie il supporte une tension électrique 100 fois plus faible. Les blocs de Titanate de Baryum sont bien adaptés pour un usage de lentilles ultrasonores. Quand ils sont moulés sous forme de lentille concave, ils focalisent très efficacement le faisceau acoustique. Inversement une céramique convexe produirait un faisceau ultrasonore divergent (figure 1.6).



**Figure 1. 6. Lentille acoustique solide plongée dans deux fluides 1 et 2**

## **1.5. Contrôle non destructif (CND)**

Le contrôle non destructif (CND) est l'une des méthodes émergentes les plus utilisées afin de garantir la qualité des produits. Par comparaison avec les anciennes méthodes de contrôle qui présentaient l'énorme inconvénient d'être destructives, dans la majorité des cas ont été amené à sélectionner des échantillons par morceau et pratiquer des tests destructifs pour en tirer le degré de conformité. Puis le résultat obtenu est généralisé pour le reste des unités du morceau en question, d'où une fiabilité très réduite.

Le contrôle non destructif n'endommage pas l'échantillon et assure son intégrité extérieure. Le CND est à base de plusieurs méthodes, dont le choix dépend de la géométrie, la composition, les propriétés physiques à mettre en valeur, le coût et l'encombrement de l'installation,....

### **1.5.1. Normalisation du CND**

Ces dernières années le CND est devenu une pratique à grand rendement couramment employé dans divers domaines, l'industrie, la médecine, l'aéronautique. Dans ce contexte les normes

internationales ne se sont pas attardées à organiser et normaliser l'installation et l'utilisation de cette technique.

Depuis ISO2400 (1972) qui fait référence aux tests ultrasons, le CND est l'objet d'une large citation des autres normes internationales. Bien que les types d'essais du CND soient très diversifiés, leur application reste restreinte pour la plupart des laboratoires et institutions. Parmi celles qui connaissent un aboutissement professionnel on signale :

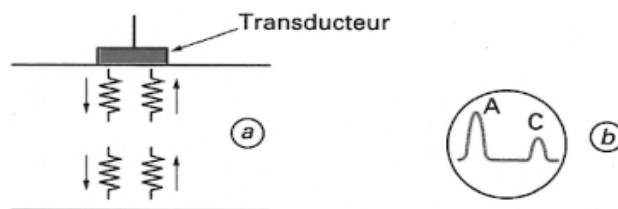
- *CND par courant de Foucault,*
- *CND par ondes électromagnétiques et rayons X,*
- *CND par résonance (vibrations mécaniques),*
- *CND par émission acoustique (ultrasons).*

### 1.5.2. CND par ultrason

Le principe repose sur la transmission d'une impulsion ultrasonore générée par effet piézoélectrique, dans la structure examinée à travers un émetteur-récepteur ultrasonore fixé à proximité. Dans le cas des CND, on utilise principalement des ondes acoustiques longitudinales de fréquence comprise entre 1 et 10 MHz produites par un transducteur agissant, à la fois, comme émetteur et détecteur.

### 1.5.3. Montage expérimental CND sur échantillon en contact avec le transducteur

Considérons un échantillon avec deux surfaces planes et parallèles et le transducteur monté sur l'une d'elles. L'impulsion électrique de départ va produire le pic A sur l'oscilloscope. Dans le cas où l'échantillon ne contient pas de défauts (figure 1.7a), on voit apparaître sur l'écran le motif de la figure 1.7b. Le pic C correspondant à la réflexion sur la face extrémité de l'échantillon. La situation décrite à la figure 1.7b est en fait très simplifiée, car il existe une série d'échos correspondants à des allers et retours successifs et dont l'amplitude décroît exponentiellement. Connaissant donc la vitesse ultrasonore dans le matériau et le retard temporel entre A et C, on peut déduire facilement l'épaisseur de la plaque.

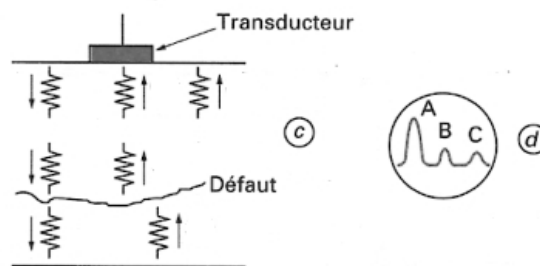


**Figure 1. 7. Propagation des impulsions ultrasonores dans un échantillon sans défauts**

Supposons maintenant que l'échantillon contienne un défaut sur le passage du faisceau acoustique (figure 1.8c). Celui-ci donnera lieu à un écho supplémentaire B dû à la réflexion sur le défaut (figure 1.8d). La profondeur du défaut est mesurable à partir de la position relative des pics

A, B, C. Si le défaut est beaucoup plus grand que la section du faisceau acoustique, cela peut être mis en évidence en déplaçant le transducteur le long de la surface de contact. Si le défaut fait un angle avec la direction des plans d'ondes acoustiques, une grande partie de l'énergie acoustique réfléchie n'est pas récupérée par le récepteur. La hauteur du pic C est alors une meilleure indication de la nature du défaut que celle du pic B.

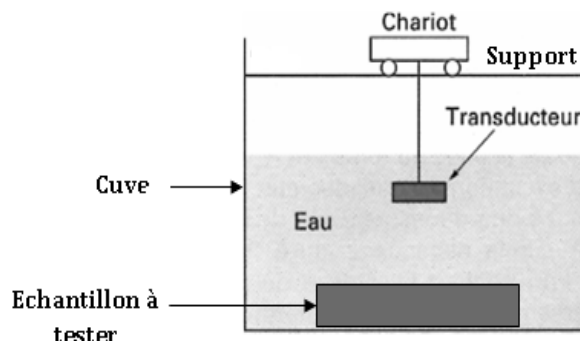
Le balayage du transducteur le long de la surface de contact avec l'échantillon, permet de localiser les différents défauts. Ce contact peut être manuel et dans ce cas on utilise un lubrifiant pour faire glisser le transducteur.



**Figure 1. 8. Propagation des impulsions ultrasonores dans un échantillon contenant un défaut**

#### **1.5.4. Montage expérimental CND sur échantillon immergé dans l'eau**

Pour un contrôle automatique, il est préférable qu'il n'y ait pas de contact direct avec l'échantillon. On utilise alors une technique d'immersion qui a l'avantage de supprimer la variation dans l'amortissement du transducteur. L'échantillon et le testeur sont tous deux immergés dans un liquide, le plus souvent est l'eau, et sont séparés par une distance verticale et constante (figure 1.9). Dans ce type de montage un pic supplémentaire A' apparaît, qui correspond à la réflexion sur la surface supérieure de l'échantillon immergée, ce pic est toujours à la même position.



**Figure 1. 9. Montage expérimental pour CND sur échantillon immergé, par balayage de la surface.**

### 1.5.5. Avantages et inconvénients du CND

#### 1.5.5.1. Avantages

Les contrôles non destructifs présentent plusieurs avantages dans leurs utilisations, parmi ces avantages nous rappelons

- **La rapidité d'exécution** : Le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce.
- **Le coût** : Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure.
- **La reproductibilité** : La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.
- **La fiabilité** : Le contrôleur doit remplir son cahier de charge indépendamment des conditions de contrôle.
- **La sensibilité** : La sensibilité est le rapport des variations de la mesure. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.
- **La résolution** : La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté,

#### 1.5.5.2. Inconvénients

- Grande expérience des opérateurs est nécessaire pour les contrôles « manuels »
- Méthode impliquant un très haut niveau de technicité
- Sensible à la géométrie (forme, rugosité, zones mortes)
- "Éblouissement" sous la surface (zone de silence)
- Sensible aux effets structure / anisotropie
- Soumis à un couplage produit/transducteur
- Nécessite absolument l'utilisation de blocs de référence
- Technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle)

### 1.5.6. Paramètres caractéristiques du CND

#### 1.5.6.1. Vitesse ultrasonore

La vitesse des ondes ultrasonores dans un milieu isotrope est une fonction des coefficients de LAME et de la densité du matériau. Elle évolue avec un certain nombre de paramètres tels que la nature et la quantité des constituants, l'âge et l'endommagement de l'échantillon, le taux d'humidité, la température, la forme de l'échantillon et la fréquence de l'onde.

La mesure de la vitesse sur un échantillon pose également le problème des ondes guidées. Si les dimensions de la perpendiculaire de l'échantillon à la direction de la propagation de l'onde sont près de la longueur d'onde, l'échantillon peut vibrer radialement.

### 1.5.6.2. Atténuation

L'atténuation de l'onde ultrasonore dépend de trois principaux facteurs qui sont : La dispersion, l'absorption par le matériel et la diffusion pendant les interactions avec les diffuseurs sur le cheminement de l'onde ultrasonore tel que des grains, des pores, des fissures, la forme et la densité. L'atténuation dans un milieu hétérogène est déterminée grâce à la longueur d'onde  $\lambda$ , la fréquence  $f$  et les tailles des diffuseurs  $d$ . Trois domaines peuvent être définis entre la longueur d'onde  $\lambda$  et les tailles des diffuseurs  $d$ :

- *Domaine de RAYLEIGH* si  $\lambda \gg d$
- *Domaine stochastique* si  $\lambda = d$
- *Domaine géométrique* si  $\lambda < d$

Pour le calcul de l'atténuation, deux échos successifs rétrodiffusés par l'échantillon sont nécessaires. Mais expérimentalement difficile à les obtenir pour certains types des matériaux, car pour les ondes de haute fréquence elles se trouvent très atténuées et ne peuvent pas renvoyer les deux échos. Pour les ondes de basses fréquences ont une durée trop longue qui rend impossible la séparation facile des deux échos successifs de l'onde.

## 1.6. Étude théorique de la diffusion acoustique

### 1.6.1. Propagation dans les solides et dans les liquides

Nous nous intéressons dans cette partie à la propagation des ondes harmoniques dans un milieu continu, élastique, homogène et isotrope. Les équations fondamentales de l'élasticité linéaire rappelées dans ce paragraphe permettent d'obtenir l'équation de mouvement dans un solide ou dans un liquide. Pour déterminer cette équation, nous considérons d'une part le principe fondamental de la dynamique [5-6], et d'autre part la loi de HOOK exprimant la proportionnalité entre les contraintes et les déformations.

### 1.6.2. Déformation et contrainte

Sous l'action de forces extérieures, un solide subit une déformation si ses particules se déplacent relativement les unes par rapport aux autres. Soit  $u_i(x_j)$  le déplacement dans un repère orthonormé du point matériel de coordonnées  $x_j$  au repos ( $i, j=1,2,3$ ). Dans le cas pratique où les composantes  $\partial u_i / \partial x_j$  du gradient des déplacements sont très petites devant 1. La variation de la distance  $dx$  séparant deux points infiniment voisins s'exprime par l'équation (1.1) selon *Dieulesaint et Royer* [7] :

$$(dx')^2 - (dx)^2 = 2 \frac{\partial u_i}{\partial x_j} dx_i dx_j \quad (1.1)$$

Les déformations à l'intérieur du corps sont définies par le tenseur de rang deux symétrique, appelé tenseur des déformations, elles sont données par l'équation (1.2).

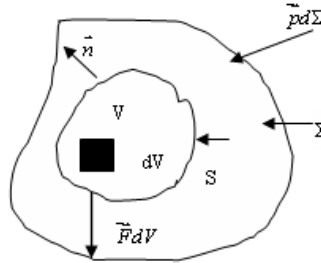
$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.2)$$

Dans un solide déformé par des forces extérieures, agissant sur son volume V et sur sa surface S avec des densités respectivement  $F_i$  et  $p_i$ , apparaissent des contraintes dues aux forces moléculaires qui tendent à le ramener dans son état de repos (figure 1.10). Les efforts exercés par la matière entourant ce volume, qui se transmettent de proche en proche par les liaisons entre les molécules ont un rayon d'action très petit du point de vue macroscopique. Leur résultante s'exprime donc par l'intégralité sur la surface S délimitant le volume V de forces élémentaires  $T_i(\vec{n})ds$ . Le vecteur  $T_i(\vec{n})$  appelé tension mécanique, dépend de  $x_i$  et de t mais aussi de l'orientation de l'élément de surface  $dS$ . Le vecteur unitaire  $\vec{n}$  est normal à S et dirigé vers l'extérieur. Compte tenu des forces en volume, la condition d'équilibre du volume V est exprimée par *Dieulesaint et Royer* [7] par l'équation (1.3):

$$\int_S T_i(\vec{n})dS + \int_V F_i dV = 0 \quad (1.3)$$

D'après le théorème de *Green*,  $-F_i$  est la divergence d'un tenseur  $T_{ij}$  de rang deux, appelé tenseur des contraintes :

$$F_i = - \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (1.4)$$



**Figure 1. 10. Solide déformé sous l'action de forces extérieures**

- $\vec{F}$  Densité des forces extérieures par unité de volume
- $\vec{n}$  Vecteur normal
- $\vec{p}$  Densité des forces extérieures par unité de surface

La transformation de l'intégrale de volume de surface montre que la tension mécanique exercée par la matière située de côté de la normale  $n_j$  à l'élément de surface est égale :

$$T_i(\vec{n}) = T_{ij} n_j \quad (1.5)$$

Il s'ensuit que  $T_{ij}$  est la  $i^{\text{ème}}$  composante de la force agissant sur l'unité de surface perpendiculaire à l'axe  $x_j$ . Les contraintes sont soit normales ( $T_{ii}$ ), soit tangentielles ( $T_{ij}$  avec  $i$  diffère de  $j$ ).



### 1.6.2.1. Loi de HOOK

La relation linéaire entre déformation et contrainte et qui généralise la loi de HOOK s'écrit pour un solide anisotrope, ou isotrope par l'équation (1.6).

$$T_{ij} = C_{ijkl} S_{kl} \quad (1.6)$$

Les éléments du tenseur de rang quatre  $C_{ijkl}$ , sont les constantes élastiques de la rigidité du matériau, et  $T_{ij}$  et  $S_{kl}$  étant symétriques c'est à dire.  $C_{ijkl} = C_{jilk}$  et  $C_{ijkl} = C_{ijlk}$

Dans le cas d'un solide isotrope, le nombre de coefficients indépendants se réduit à deux et la matrice des constantes élastiques est donnée par la relation (1.7).

$$[C_{ijkl}] = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Les deux coefficients indépendants  $\lambda$  et  $\mu$  (exprimés en GPa) sont appelés les constantes de LAME, et donc la loi de HOOK s'écrit sous la forme algébrique suivant :

$$T_{ij} = \lambda \delta_{ij} S_{kk} + 2\mu S_{ij} \quad (1.8)$$

Où  $\delta_{ij}$  est le symbole de KRONECKER qui vaut 1 si  $i = j$  et 0 si  $i \neq j$ . Dans le tableau ci-dessous nous donnons les valeurs des constantes de LAME de quelques matériaux.

Matériau	$\lambda$ (GPa)	$\mu$ (GPa)	Masse volumique $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )
Acier	121	75	7800
Verre	58	26	2700
Silice	16,1	31,2	2200

**Tableau 1. 1. Constantes de LAME de quelques matériaux [8]**

### 1.6.2.2. Équation de propagation dans un corps isotrope

L'équation de propagation d'une onde dans un solide isotrope est étudiée par plusieurs chercheurs [5-9], elle est exprimée par l'égalité suivante :

$$\rho \ddot{u} = (\lambda + 2\mu) \text{grad} (\text{div}(u)) - \mu \text{rot} (\text{rot}(u)) \quad (1.9)$$

Avec  $\rho$  est la masse volumique de solide et  $\mu$  et  $\lambda$  sont les coefficients de LAME. La solution de cette équation peut être divisée à la somme de deux vecteurs un vecteur rotationnel  $u_r$  et d'un vecteur irrotationnel  $u_L$  :  $u = u_L + u_r$  (1.10), Avec :  $\text{rot} u_L = 0$  (1.11) et  $\text{div} u_r = 0$  (1.12)

Pour la composante longitudinale  $u_L$ , l'équation de propagation devient :  $\ddot{u}_L = (\lambda + 2\mu/\rho) \Delta u_L$  (1.13)

En posant  $\lambda + 2\mu/\rho = c_L^2$  On obtient donc  $\ddot{u}_L = c_L^2 \Delta u_L$  (1.14)

La solution de l'équation (1.14) est une onde plane, elle est exprimée par :

$$u_L = A_L \exp j(\omega t - k_L r)$$

Avec  $\mathbf{r}(x_1, x_2, x_3)$  et  $k_L$  le vecteur d'onde incident indiquant la direction de propagation, son expression est  $|k_L|^2 = \omega^2 / c_L^2$ , avec  $\omega$  étant la pulsation.

À partir de  $\text{rot } u_L = 0$ , on obtient  $k_L \wedge A_L = 0$ , c'est-à-dire  $k_L$  et  $A_L$  sont donc colinéaires et le mouvement des particules est parallèle à la direction de propagation. On déduit que les ondes liées à  $u_L$  sont des ondes progressives planes à polarisation longitudinale (ondes de compression) se déplaçant avec une célérité  $c_L$ .

Pour la composante rotationnelle  $u_T$  de  $\mathbf{u}$ , l'équation de propagation s'écrit :  $\ddot{u}_T = (\mu/\rho) \Delta u_T$

En posant :  $\mu/\rho = c_T^2$  On obtient :  $\ddot{u}_T = c_T^2 \Delta u_T$  (1.15)

Une solution particulière est l'onde plane sous la forme :  $u_T = A_T \exp j(\omega t - k_T r)$

$k_T$  étant le vecteur d'onde caractérisant la direction de propagation, tel que :  $|k_T|^2 = \omega^2 / c_T^2$ .

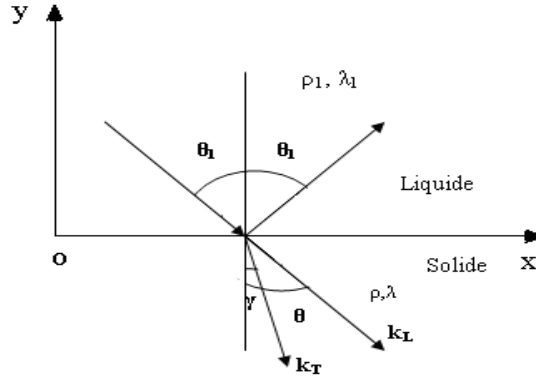
De  $\text{div } u_T = 0$ , on déduit que  $k_T \cdot A_T = 0$ , et donc que  $k_T$  et  $A_T$  sont deux vecteurs perpendiculaires. Le mouvement des particules est donc perpendiculaire à la direction de propagation. Les ondes décrites par  $u_T$  sont des ondes progressives planes à polarisation transversale (ondes de cisaillement) se déplaçant avec une célérité  $c_T$ . Notons que dans un milieu donné  $c_T < c_L$ .

### 1.6.3. Coefficients de réflexion et de transmission à une interface liquide / solide

#### 1.6.3.1. Position du problème

On considère une interface plane séparant un milieu fluide caractérisé par sa masse volumique  $\rho_1$ , son coefficient de LAMÉ  $\lambda_1$  ( $\mu_1 = 0$ ) et par sa vitesse de phase  $c_1$ , et un milieu solide de masse volumique  $\rho$ ,  $\lambda$  et  $\mu$  pour les coefficients de LAMÉ,  $c_L$  pour la vitesse de phase longitudinale et  $c_T$  pour la vitesse de phase transversale [10]. L'interface se trouve dans le plan  $z = 0$  et ses dimensions sont supposées infinies dans les directions Ox et Oy. La géométrie du problème est schématisée dans la figure 1.11.

### 1.6.3.2. Équation de continuité



**Figure 1. 11. Réflexion et transmission à une surface liquide/solide.**

Dans le cas d'un problème plan, on suppose que toutes les grandeurs à définir ne dépendent que des coordonnées  $x$  et  $z$ . Ainsi, seules les composantes  $u_x$  et  $u_z$  du vecteur déplacement sont non nulles, de même seule les composantes normale  $T_{zz}$  et tangentielle  $T_{xz}$  de la contrainte sont non nulles [5-10]. Les ondes longitudinales et transversales se propageant dans le solide peuvent être décrites par les potentiels  $\phi$  et  $\psi$ . Le potentiel vecteur  $\psi$  est choisi tel que seule sa composante suivant Oy soit non nulle [10], elle est notée  $\psi$ . Les potentiels  $\phi$  et  $\psi$  satisfont aux équations de propagation suivantes.  $\Delta\phi = -k_L^2\phi$  (1.16) et  $\Delta\psi = -k_T^2\psi$  (1.17)

Dans le liquide, il suffit d'un potentiel scalaire  $\phi_1$  pour décrire les seules ondes longitudinales qui se propagent à la vitesse de phase  $c_1$ . Le potentiel satisfait l'équation de propagation suivante :

$$\Delta\phi_1 = -k_1^2\phi_1 \quad (1.18)$$

Les composantes du déplacement et de la contrainte s'expriment en fonction des potentiels, elles sont exprimées par les formules suivantes :  $u_x = \frac{\partial\phi}{\partial x} - \frac{\partial\psi}{\partial z}$  et  $u_z = \frac{\partial\phi}{\partial z} + \frac{\partial\psi}{\partial x}$

$$T_{xz} = \mu \left( \frac{\partial^2\phi}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} \right) \quad \text{et} \quad T_{zz} = (\lambda + 2\mu)\Delta\phi + 2\mu \left( \frac{\partial^2\psi}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} \right)$$

Les conditions de continuité à l'interface liquide/solide sont au nombre de trois. Elles doivent vérifier la continuité de la composante normale du déplacement  $u_z$ , la continuité de la composante normale de la contrainte  $T_{zz}$ , et de sa composante tangentielle  $T_{xz}$ . Pour la composante tangentielle  $T_{xz}$ , il suffit qu'elle soit nulle à l'interface [10-12]. Ces conditions de continuités sont regroupées dans le système (1.19)

$$\begin{cases} u_{z1} = u_z \\ T_{xz1} = T_{xz} = 0 \\ T_{zz1} = T_{zz} \end{cases} \quad (1.19)$$

Dans ces expressions les composantes indicées par 1 concernent le liquide, et celle non indicées concernant le solide.

#### 1.6.4. Expressions des coefficients de réflexion et de transmission

On considère une onde plane monochromatique de pulsation  $\omega$  provenant du milieu fluide 1. Elle arrive sur l'interface liquide/solide sous un angle d'incidence  $\theta_1$ . L'onde plane incidente est décrite par le potentiel scalaire :  $\phi_i = \exp j(\sigma x - \alpha_1 z) \exp -j\omega t$ , où  $\sigma = k_1 \sin \theta_1$  et  $\alpha_1 = k_1 \cos \theta_1$  sont les composantes tangentielle et normale à l'interface du vecteur d'onde incident  $k_1$ , de norme  $k_1 = \omega/c_1$ .

Le potentiel de l'onde réfléchie peut se mettre sous la forme :  $\phi_r = R \exp j(\sigma x + \alpha_1 z) \exp -j\omega t$ , avec  $R$  est le coefficient de réflexion. Le potentiel total dans le fluide est donnée par :

$$\phi_i = \phi_i + \phi_r = (\exp(-j\alpha_1 z) + R \exp(j\alpha_1 z)) \exp(j\sigma x).$$

Le terme de dépendance temporelle est négligé par la suite car il s'élimine dans les équations de continuité. Dans le milieu solide une onde longitudinale et une onde transversale sont générées, elles peuvent être respectivement décrites par les potentiels suivants :

$$\phi = A \exp j(\sigma x - \alpha z) \quad \text{et} \quad \psi = B \exp j(\sigma x - \beta z)$$

où :  $\alpha = k_L \cos \theta$  est la composante normale du vecteur d'onde de l'onde longitudinale,

$\beta = k_T \cos \gamma$  est la composante normale du vecteur d'onde de l'onde transversale.

D'après la loi de *Snell-DESCARTES*, les composantes tangentielles des vecteurs d'onde des ondes longitudinales et transversales sont égales à celles du vecteur d'onde de l'onde incidente, soit donc :  $\sigma = k_1 \sin \theta_1 = k_L \sin \theta = k_T \sin \gamma$

À l'interface  $z = 0$  les potentiels vérifiant les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_i}{\partial z} &= \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad \text{et} \quad \mu \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right) = 0 \\ \lambda_1 \Delta \phi_i &= (\lambda + 2\mu) \Delta \phi + 2\mu \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) \end{aligned} \quad (1.20)$$

D'autre part, on a par définition.  $\lambda_1 = \rho_1 c_1^2 = \rho_1 \frac{\omega^2}{k_1^2}$ ,  $\lambda + 2\mu = \rho c_L^2 = \rho \frac{\omega^2}{k_L^2}$  et  $\mu = \rho c_T^2 = \rho \frac{\omega^2}{k_T^2}$

D'après les équations de propagation (1.16) et (1.17) on a :  $\Delta \phi = -k_L^2 \phi$  et  $\Delta \phi_i = -k_1^2 \phi_i$

Si l'on pose  $m = \frac{\rho}{\rho_1}$ , Les équations de continuité peuvent s'écrire

$$\begin{aligned} (R-1)k_1 \cos \theta_1 &= -Ak_L \cos \theta + Bk_T \sin \gamma \\ Ak_L^2 \sin(2\theta) + Bk_T^2 \cos(2\gamma) &= 0 \\ (1+R) \frac{1}{m} &= A \left( 1 - 2 \frac{k_L^2}{k_T^2} \sin^2 \theta \right) - B \sin(2\gamma) \end{aligned}$$

La résolution de ce système homogène de trois équations à trois inconnues  $A$ ,  $B$  et  $R$  conduit à l'expression suivante pour le coefficient de réflexion  $R$  :

$$R = \frac{Z_L \cos^2 \gamma + Z_T \sin^2 \gamma - Z_1}{Z_L \cos^2 \gamma + Z_T \sin^2 \gamma + Z_1} \quad (1.21)$$

Avec  $Z_1 = \rho_1 c_1 / \cos \theta_1$ ,  $Z_L = \rho c_L / \cos \theta$  et  $Z_T = \rho c_T / \cos \gamma$  sont respectivement les impédances acoustiques des ondes ultrasonores dans le liquide et celles des ondes longitudinales et transversales dans le solide.

Il est à noter que le coefficient de réflexion est indépendant de la fréquence, en incidence normale,  $\theta_1 = \theta = \gamma = 0^\circ$ , le coefficient de réflexion s'écrit simplement en fonction des impédances dans le liquide et dans le solide sous la forme :  $R = \frac{Z_L - Z_1}{Z_L + Z_1}$  (1.22)

Et le coefficient de transmission est donné par :  $T = \frac{2Z_1}{Z_L + Z_1}$  (1.23)

Considérons deux milieux 1 et 2 d'impédances acoustiques respectivement  $Z_1$  et  $Z_2$ . Il est clair, selon l'expression du coefficient de transmission, que pour  $Z_1/Z_2 < 1$  ou  $Z_1/Z_2 > 1$ ,  $R$  est voisin de 1, il y a donc peu d'énergie transmise. Par contre, si  $Z_1/Z_2$  est proche de 1,  $R \approx 0$  et la transmission est voisine de 100 %. On dit que les deux milieux sont adaptés acoustiquement. La figure 1.12 représente les allures de  $R$  et de  $T$  en fonction du rapport  $Z_1/Z_2$ .

Coefficients de réflexion  $R$  et de transmission  $T$

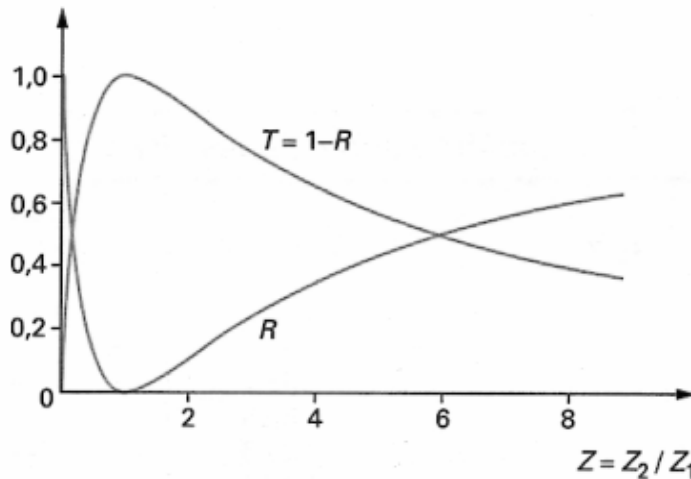


Figure 1. 12. Réflexion et transmission normales à la surface entre des deux milieux

Nous présentons respectivement dans les tableaux 1.2 et 1.3 quelques propriétés acoustiques dans les liquides et solide [11].

<i>liquide</i>	<i>Vitesse C (m/s)</i>	<i>Impédance acoustique (<math>10^6 \text{ N.s/m}^3</math>)</i>
<i>Eau distillée</i>	<i>1 482</i>	<i>1.48</i>
<i>Eau de mer</i>	<i>1 510</i>	<i>1.56</i>
<i>Mercure</i>	<i>1 454</i>	<i>19.7</i>
<i>Huile d'olive</i>	<i>1 400</i>	<i>1.3</i>

**Tableau 1. 2. Propriétés acoustiques dans les liquides [11]**

<i>Solide isotrope</i>	<i>Vitesse longitudinale <math>C_L</math> (m/s)</i>	<i>Vitesse transversale <math>C_T</math> (m/s)</i>	<i>Impédance acoustique longitudinale <math>Z_L = \rho C_L</math> (<math>10^6 \text{ N.s/m}^3</math>)</i>
<i>Ardoise</i>	<i>4 500</i>	<i>----</i>	<i>16</i>
<i>Bois</i>	<i>1 000 à 4 000</i>	<i>-----</i>	<i>0.5 à 3.5</i>
<i>Brique</i>	<i>3 700</i>	<i>-----</i>	<i>9</i>
<i>Plexiglas</i>	<i>2 680</i>	<i>-----</i>	<i>3.16</i>
<i>Verre</i>	<i>3 700 à 5 000</i>	<i>3 400</i>	<i>à 20</i>
<i>Fer et acier</i>	<i>5900</i>	<i>3220</i>	<i>46.6</i>

**Tableau 1. 3. Propriétés acoustiques dans les solides [11]**

## 1.7. Cheminement des " rayons " ultrasonores dans un cylindre plein

La composante géométrique du champ diffusé est formée de l'onde réfléchie, ainsi que des ondes transmises longitudinales ou transversales qui subissent de multiples réflexions internes à la surface du cylindre. Lorsque ces ondes atteignent la surface de la cible cylindrique, elles génèrent des ondes longitudinales et transversales par réflexion interne. Les auteurs cités dans les références [13-14-15] ont montré que les ondes longitudinales et transversales obéissent aux lois de l'optique géométrique et que les parcours des rayons sont déterminés par les positions des cols. De plus, les amplitudes des ondes réfléchies et transmises sont déterminées par les coefficients de réflexion et transmission.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la géométrie de rétrodiffusion étudiée par Welton *et al.*[16], où l'émetteur et récepteur sont confondus, puis au cas général, géométrie bistatique étudiée par Quentin *et al* [17]. Nous commencerons par le cas simple où les axes des transducteurs émetteurs et récepteurs sont situés dans le plan perpendiculaire à l'axe du cylindre et coupent cet axe [18]. La figure 1.13 est à la base de notre raisonnement dans ce paragraphe et ceux qui suivent. Elle représente une coupe transversale du cylindre, dans le plan passant par les deux axes des transducteurs, qui est aussi un plan de symétrie du cylindre. L'émetteur (E) est assimilé à une source ponctuelle située au point S. Les rayons émanant de S atteignent le cylindre suivant des angles d'incidence  $\alpha$  variant de 0 à 90°. Seuls les rayons pour lesquels  $\alpha < \alpha_{IT}$  ( $\alpha_{IT}$  : angle d'incidence limite pour les ondes transversales) donnent naissance, à l'intérieur du cylindre 1 ou 2 rayons transmis selon la valeur de l'angle  $\alpha$ . Lorsque  $\alpha < \alpha_{IL}$  ( $\alpha_{IL}$  : angle

d'incidence limite pour les ondes longitudinales) deux rayons sont transmis, dans l'autre cas  $\alpha_{IL} \leq \alpha < \alpha_{IT}$ , un seul rayon est généré à l'intérieur du cylindre. Au sein même du cylindre, les rayons subissent plusieurs réflexions au cours desquelles, dans le cas  $\alpha < \alpha_{IL}$ , par exemple, prennent naissance dans le cylindre deux rayons réfléchis de polarisation longitudinale et transversale, et un rayon transmis dans le fluide du type L.

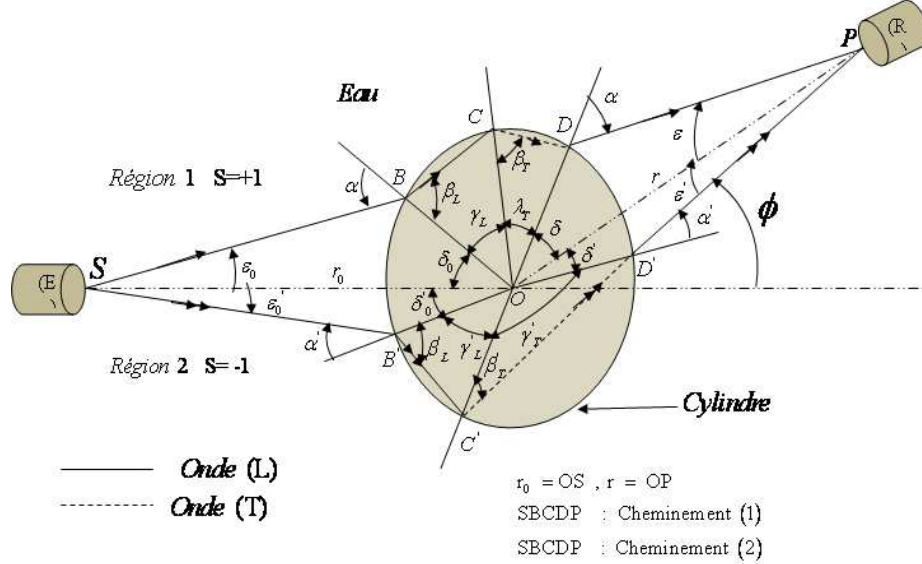


Figure 1. 13. Géométrie du problème. Parcours des rayons

Ainsi, un rayon incident sur le cylindre donne à lui seul autant de rayons diffusés dans le cylindre qu'il subit de réflexions intérieures au cylindre avant de s'éteindre par atténuation. Ceci est illustré sur figure 1.14.

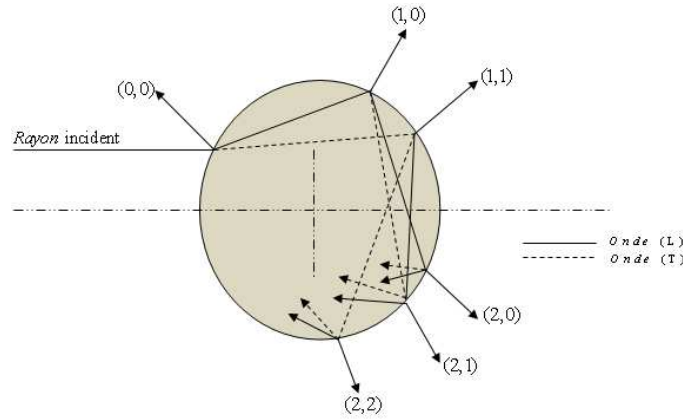


Figure 1. 14. Modes (n, m), réflexions intérieures au cylindre

## 1.8. Introduction des modes (n, m)

Le cheminement suivi par un rayon ultrasonore à l'intérieur du cylindre est donc constitué d'une succession de parcours rectilignes entre les différents points de réflexion, chaque trajet étant caractérisé par la polarisation de l'onde. On désignera par n le nombre total de parcours rectiligne

entre le point d'incidence (passage fluide-solide) et le point d'émergence (passage solide -fluide) du rayon ultrasonore considéré. Parmi ces  $n$  parcours, il y en a  $m$  qui sont effectués avec une polarisation transversale. Dans la suite, on utilisera la terminologie suivante :

- *parcours longitudinal : parcours effectué par un rayon ayant une polarisation longitudinale (parcours L)*
- *parcours transversal : parcours effectué par un rayon ayant une polarisation transversale (parcours T).*
- *Ainsi est introduit le mode  $(n,m)$  correspondant à  $(n-m)$  parcours L et  $m$  parcours T à l'intérieur du cylindre (Figure 1.14)*

### 1.8.1. Équation des modes

Le transducteur émetteur est à une distance  $r_0$  du centre O du cylindre. Le récepteur, en configuration bistatique, se trouve au point P, pointé vers O, à une distance  $r$  de O, et reçoit les rayons diffusés sous l'angle d'observation  $\phi$  (figure 1.13). on se propose de trouver alors la condition nécessaire et suffisante pour qu'un mode  $(n,m)$  donnée, soit observé au point P. Dans ce but, en se référant à la figure 1.13. On écrira les relations reliant les différents angles représentés sur la figure 1.13. Ensuite, on déduira la condition sur l'angle d'incidence  $\alpha$ . Ceci exige que le plan de la figure 1.13 soit divisé en deux demi-plans séparés par l'axe (SO) (régions 1 et 2) afin de mettre en évidence la dissymétrie du système quand  $\phi$  diffère de  $0^\circ$  et  $180^\circ$ . La région 1 est le demi-plan de bord (SO) et contenant le point d'observation P. Deux cas sont possibles :

- *le rayon incident est dans le demi-plan 1, et le trajet suivi est cheminement 1 (ch.1) : SBCDP.*
- *Ou bien il situe dans la région 2 et suivra donc le cheminement (Ch.2) : SB'C'D'P*

Considérons les angles définis sur la figure 1.13 ayant pour sommet le point O, centre du cylindre on peut écrire les deux égalités suivantes :

$$\delta_0 + \gamma_L + \gamma_T + \delta = \pi - \phi \quad \text{Ch.1} \quad (1.24)$$

$$\delta_0 + \gamma_L + \gamma_T + \delta = \pi + \phi \quad \text{Ch.2} \quad (1.25)$$

Ces deux équations correspondent en fait au mode particulier  $n=2$  et  $m=1$  : deux parcours dans le cylindre dont un parcours T. Dans le cas général d'un mode  $(n, m)$  quelconque, correspondant à  $m$  parcours T et à  $(n-m)$  parcours L, il suffit, pour obtenir les deux équations des modes de multiplier  $\gamma_T$  et  $\gamma_L$  respectivement par  $m$  et  $(n-m)$ .

$$\delta_0 + (n-m)\gamma_L + m\gamma_T + \delta = \pi - \phi[2\pi] \quad \text{Ch.1} \quad (1.26)$$

$$\delta_0 + (n-m)\gamma_L + m\gamma_T + \delta = \pi + \phi[2\pi] \quad \text{Ch.2} \quad (1.27)$$

On n'a plus d'égalités strictes mais plutôt deux congruences modulo  $2\pi$ . En effet lorsque  $n$  devient grand le rayon peut effectuer plusieurs tours autour de O à l'intérieur du cylindre avant



d'émerger. Le nombre de tours est directement lié à  $n$  et à l'angle d'incidence  $\alpha$ . Cependant on peut majorer ce nombre de tours qu'on notera  $l$  en n'utilisant que le paramètre  $n$ , car  $\alpha$  est justement à déterminer.

Les angles  $\delta_0$  et  $\delta$  sont indépendants de  $n$  et  $m$  à  $\alpha$  constant (on verra que  $\delta_0 \approx \delta \approx \alpha$ ) ; leur somme est majorée par  $2\alpha_T$  qui est inférieur à  $2 \times 30^\circ$ . Dans le cas du cylindre en aluminium qui est généralement le matériau étudié, donc  $(\delta_0 + \delta)$  reste toujours quelques soit  $n, m$   $\alpha$  et inférieur à  $60^\circ$  (1/6 de tour) pour l'aluminium et à  $180^\circ$  (1/2 de tour) dans le cas général. On peut conclure ainsi que le nombre de tours  $l$  ne dépend que de  $(n-m)\gamma_L$  et  $m\gamma_T$ .

On a quelque soit  $\alpha \in [0, \alpha_T]$  :  $\gamma_L \leq \pi$  et  $\gamma_T \leq \pi$

Le cas d'égalité correspond à  $\alpha = 0$  donc :  $(n-m)\gamma_L + m\gamma_T \prec (n-m)\pi + m\pi = n\pi = \frac{n}{2} \text{trs}$  (1.28)

Avec :  $1 \leq \frac{n}{2}, l \in \mathbb{N}$

Ainsi, on peut de nouveau obtenir deux équations des modes sous forme de deux égalités strictes :

$$\delta_0 + (n-m)\gamma_L + m\gamma_T + \delta - 2\pi l = \pi - \phi \quad \text{Ch.1} \quad (1.29)$$

$$\delta_0 + (n-m)\gamma_L + m\gamma_T + \delta - 2\pi l = \pi + \phi \quad \text{Ch.2} \quad (1.30)$$

### 1.8.2. Expressions de l'équation des modes en fonction de $\alpha$

Les angles  $\delta_0, \delta, \gamma_L$  et  $\gamma_T$  peuvent être exprimés en fonction de la variable  $\alpha$ . Considérons le triangle OBS (figure.1.14) on a :

$$\begin{aligned} \delta_0 &= \alpha - \varepsilon_0 \quad \text{et} \quad \frac{\sin \varepsilon_0}{a} = \frac{\sin(\pi - \alpha)}{r_0} \\ \text{Soit} \quad \sin \varepsilon_0 &= \frac{a}{r_0} \sin \alpha = \frac{\sin \alpha}{R_0} \quad \text{avec} \quad R_0 = \frac{r_0}{a} \\ \text{D'où :} \quad \delta_0 &= \alpha - \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{R_0}\right) \quad (1.31) \end{aligned}$$

De même dans le triangle ODP le rayon émergeant évidemment sous le même angle  $\alpha$  on a avec  $R = \frac{r}{a}$  :

$$\varepsilon = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{R}\right), \quad \delta = \alpha - \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{R}\right) \quad (1.32)$$

Dans les triangles OBC et OCD, on a :  $\gamma_L = \pi - 2\beta_L$  et  $\gamma_T = \pi - 2\beta_T$

La loi de la réfraction permet d'écrire :  $\frac{\sin \alpha}{C} = \frac{\sin \beta_L}{C_L} = \frac{\sin \beta_T}{C_T}$  (1.33)

$$\text{D'où :} \quad \left\{ \begin{array}{l} \beta_L = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{\zeta_L}\right) \\ \beta_T = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{\zeta_T}\right) \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} \gamma_L = \pi - 2\sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{\zeta_L}\right) \\ \gamma_T = \pi - 2\sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{\zeta_T}\right) \end{array} \right.$$

Où  $\zeta_L = C/C_L$  et  $\zeta_T = C/C_T$  sont inférieurs à 1.

On a :

$$\delta_0 + (n-m)\gamma_L + m\gamma_T + \delta = \alpha - \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{R_0}\right) + \alpha - \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{R}\right) \\ + (n-m)\left[\pi - 2\sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{\zeta_L}\right)\right] + m\left[\gamma_T = \pi - 2\sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{\zeta_T}\right)\right] = g(\alpha) \quad (1.34)$$

Soit :

$$g(\alpha) = 2\alpha - \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{R_0}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{R}\right) \\ - 2(n-m)\sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{\zeta_L}\right) - 2m\sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{\zeta_T}\right) + n\pi \quad (1.35)$$

Les deux équations des modes s'écrivent alors comme suit :

$$g(\alpha) - 2\pi l = \pi - \phi \quad \text{Ch.1} \quad (1.36)$$

$$g(\alpha) - 2\pi l = \pi + \phi \quad \text{Ch.2} \quad (1.37)$$

On note que si :

- $\alpha = \alpha_0$  est solution de la première équation quand  $\phi = \phi_0$ .
- $\alpha = \alpha_0$  est solution de la deuxième équation quand  $\phi = -\phi_0$ .

Ceci est facile à constater sur la figure 1.14, le chemin (1) aurait la même géométrie que le chemin (2) si  $\phi$  est changé en  $-\phi$ . On peut regrouper les deux équations (1.36) et (1.37) en une seule, en introduisant un paramètre  $s$  caractérisant le cheminement suivi :  $s = \pm 1$  :

$$s = +1 \text{ Pour ch.1} \quad \text{et} \quad s = -1 \text{ Pour ch.2,} \quad \text{D'où :} \quad g(\alpha) - 2\pi l = \pi - s\phi$$

Soit  $f_s(\alpha, \phi, l) = g(\alpha) - (2l + 1)\pi + s\phi = 0$ , avec  $s = \pm 1$  (1.38)

En remplaçant  $g(\alpha)$  par son expression obtenue ci-dessus, l'équation des modes s'écrit sous la forme simplifiée :

$$f_s(\alpha, \phi, l) = f_0(\alpha) + (n - 2l + 1)\pi + s\phi = 0 \quad (1.39).$$

## 1.9. Ou $f_0(\alpha)$ est une fonction indépendante de $\phi$ et $l$

$$f_0(\alpha) = 2\alpha - \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{R_0}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{R}\right) - 2(n-m)\sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{\zeta_L}\right) - 2m\sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{\zeta_T}\right) \quad (1.40)$$

Pour un mode donnée  $(n, m)$ , l'existence d'une solution  $\alpha$  de l'équation (1.39) signifie que le mode considéré est effectivement observé sous l'angle  $\varepsilon$  au point d'observation P, et que le rayon acoustique correspondant entre et émerger du cylindre sous le même angle  $\alpha$ . En faisant varier  $l$  et 0 à sa valeur maximale  $E(\frac{n}{2})$ , on peut obtenir plusieurs solutions  $\alpha$  pour les mêmes valeurs de  $n$  et  $m$ .

$[E(x)] = \text{partie entière de } x$ . Donc à un même mode  $(n, m)$  correspondent plusieurs échos relatifs à chacune des solutions. Ces échos arrivent à des instants différents et sont expérimentalement observés distinctement comme on le verra lors du calcul des temps d'arrivée.

### 1.9.1. Calcul des temps d'arrivée des échos

Le calcul des temps d'arrivée est le même pour les deux cheminements (1) et (2). Considérons de nouveau la figure 1.13. Les longueurs parcourues par les ultrasons sont :

- ❖ Dans l'eau SB et DP,

❖ A l'intérieur du cylindre :

- *Parcours avec polarisation (L) : BC*
- *Parcours avec polarisation (T) : CD*

Par la suite en prenant comme origine des temps l'instant d'émission de l'impulsion ultrasonores par la source s, le temps d'arrivée de l'écho (n, m,  $\alpha$ ) est :

$$t(n,m,\alpha) = \frac{SB}{C} + (n-m) \frac{BC}{C_L} + m \frac{CD}{C_T} + \frac{DP}{C} \quad (1.41)$$

En appliquant la règle des sinus dans les triangles SBO et PDO, on obtient :

$$SB = a(\sqrt{R_0^2 - \sin^2 \alpha_i} - \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_i}) \quad \text{et} \quad PD = a(\sqrt{R^2 - \sin^2 \alpha_i} - \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_i})$$

Pour les autres parcours on obtient les expressions suivantes :

$$BC = 2a \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha_i}{\xi_L}\right)^2} \quad \text{et} \quad CD = 2a \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha_i}{\xi_T}\right)^2}$$

Ce qui nous permet d'aboutir à l'équation donnant le temps (n, m,  $\alpha_i$ ) de parcours de l'écho correspondant :

$$t(n,m,\alpha) = \frac{a}{c} [\sqrt{R_0^2 - \sin^2 \alpha_i} + \sqrt{R^2 - \sin^2 \alpha_i} - 2\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_i} + 2(n-m)\sqrt{\xi_L^2 - \sin^2 \alpha_i} + 2m\sqrt{\xi_T^2 - \sin^2 \alpha_i}] \quad (1.42)$$

Cette expression se simplifie légèrement lorsque  $R=R_0$  et l'on obtient :

$$t(n,m,\alpha) = \frac{2a}{c} [\sqrt{R_0^2 - \sin^2 \alpha_i} - 2\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_i} + 2(n-m)\sqrt{\xi_L^2 - \sin^2 \alpha_i} + 2m\sqrt{\xi_T^2 - \sin^2 \alpha_i}] \quad (1.43)$$

### 1.9.2. Calcul de l'amplitude des échos

L'amplitude d'un écho donné est gouvernée par quatre facteurs :

- *A la rencontre d'une interface il y a perte d'énergie soit par réflexion soit par transmission et nous introduirons pour rendre compte globalement de ces pertes dans le cas de l'écho (n,m, $\alpha$ ) le coefficient  $G_{nm}(\alpha_i)$ .*
- *En l'absence d'atténuation durant la propagation l'énergie acoustique contenue dans un tube de rayons se conserve*
- *En présence d'atténuation important sur le parcours du rayon celle-ci doit être prise en compte par l'intermédiaire d'un terme que nous noterons  $A_{nm}(\alpha_i)$*
- *Enfin dans le cas de transducteurs réels il est nécessaire de tenir compte de la directivité de l'émetteur et du récepteur.*
- *Il est possible de tenir compte successivement de ces différents facteurs qui affectent l'amplitude des échos.*

### 1.9.3. Facteur de réflexion – transmission $G_{nm}(\alpha_i)$

Pour un écho donné la séquence de réflexions internes peut se produire de manière différente correspondant chacune à un parcours différent des rayons dans le cylindre. Ces parcours sont obtenus en permutant l'ordre des rayons à polarisation longitudinale et transversale. Le coefficient

$G_{nm}(\alpha_i)$  est obtenu en prenant le produit des coefficients et de transmission selon chacun de ces parcours et en sommant ces produits. Le mode de calcul est détaillé par Gespa, Préface de H.UBERALL [19]. On obtient

$$G_{nm}(\alpha_i) = \sum_{p=1}^m (D(\alpha_i) [\prod_{j=1}^{n-1} R_j(\alpha_i)] D'(\alpha_i)) p \quad (1.44)$$

Où  $p$  désigne le parcours considéré  $D(\alpha_i)$  le coefficient de transmission à l'entrée dans le cylindre  $D'(\alpha_i)$  le coefficient de transmission à la sortie du cylindre et  $R_j(\alpha_i)$  les coefficients de réflexion (avec ou sans changement de mode) aux différents points où le rayon acoustique frappe la surface du cylindre. Ces coefficients sont calculés en utilisant les formules classiques pour une onde plane incidente sur une interface fluide-solide élastique.

## 1.10. Conclusion

La théorie de la diffusion acoustique permet de décrire l'interaction entre les ondes ultrasonores qui se propagent dans un milieu solide et les contraintes appliquées. Les expressions des vitesses de propagation longitudinale et transversale des ondes ultrasonores sont exprimées en fonction des constantes de LAME ces expressions ont été obtenu par l'écriture des tenseurs de déformations et contraintes on appliquant la loi de HOOK. Ainsi les expressions des coefficients de réflexion et transmission ont été déterminées en appliquant loi de SNELL DESCARTES entre une interface liquide / solide.

L'étude de la diffusion acoustique par un cylindre élastique pour des fréquences élevées permet l'emploi de la théorie de l'optique géométrique, afin de prévoir de façon satisfaisante l'analyse temporelle des échos observés. Elle met en évidence l'existence d'échos «remarquables» caractéristiques du cylindre et indépendants de la géométrie du problème.

## 1.11. Références Bibliographiques

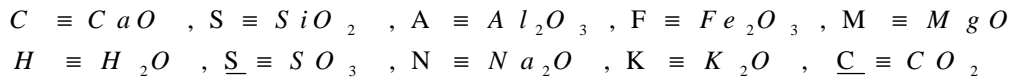
- [1] M. Ezzaidi " Etude et réalisation de transducteurs ultrasonores focalisant en PVDF. Application à la mesure d'épaisseur ponctuelle d'objet élastique". Thèse Univ. IBN ZOHR, Agadir (1995).
- [2] T. None "Design of ultrasonic transducers with multiple acoustic matching layers for medical applications" . IEEE Trans, Ultrasonic, control. Vol. UFFC 34n°1, pp 8-15, (1987).
- [3] J.C. Saolacroup, Hia sainte anne-Toulon, N.Grenier,G.H.Pellegrin, Tripode Bordeaux, "imagerie ultrasonore".
- [4] P. Barthez, l'image ultrasonore : formation de l'image année, p5, (2003)
- [5] E. Dieuliesaint, D. Royer, "Ondes élastiques dans les solides" Massan, paris, (1974).
- [6] A.lambert, Y.Pralus et J.Rivenez,"Propagation des ondes ultrasonores"CETIM, SENLIS, (1993).

- [7] E. Dieulesaint, D. Royer, "Propagation et génération des ondes élastiques". Technique de l'ingénieur, traite électronique, E 3210 , (2000).
- [8] E. Dieulesaint, D. Royer, "Acoustique - Propagation dans un solide". Technique de l'ingénieur, traite électronique, AF 3814 p3, (2001).
- [9] B. Faiz " Thèse : Contrôle ultrasonore de la prise en masse d'un yaourt et d'une résine époxy" Université Ibnou Zohr, (1995).
- [10] L. M. Brekhovskikh "Waves in Layered Media "Academic Press, New York, (1980).
- [11] J. Sapriel, "Ultrason", Technique de l'ingénieur, traite électronique, E1910, p5, (1994).
- [12] FOLDS D. L., LOGGINS C. D.J. Acoust. Soc. Am., 62, 1102-1109, (1977).
- [13] D.Brill and H.Uberall." Acoustic waves transmitted through solide elastic cylinders ". *J.Acoust.Soc.Am.* 50,pp.921-939 .(1971).
- [14] J. W. Dickey et H. Uberall, J. Acoust. Soc. Amer .,66, , p . 277-283 . (1979).
- [15] A . Derem, Revue du Cethedec, NS 80-1, ,p . 221-244. (1980).
- [16] P.J.Welton,M.De Billy, A.Hayman and G.Quentin." Backscattering of short ultrasonic pulses by solid elastic cylinders at large  $ka$  ". *J.Acousti.Soc.Am.*,67. pp.470-476. (1980).
- [17] G.Quentin, M.De Billy and A.Hayman. "Comparison of backscattering of short pulse by solid and cylinder at large  $ka$ ". *J.Acousti.Soc.Am.*,70. pp.870-878 .(1981)
- [18] G.Quentin."Approximation of Geometrical optics", *Préface de H.UBERALL* pp.283-310 (1998).
- [19] N.Gespa." La diffusion acoustique par des cibles élastiques de forme géométrique simple théories et expériences". *Préface de H.UBERALL*.

<b>2.1. Introduction.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2. Ciment.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.1. Fabrication du ciment.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2. Caractéristiques du ciment et de sa composition .....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.3. Composition du ciment .....</b>	<b>29</b>
2.2.3.1. Clinker .....	29
2.2.3.2. Sulfate de calcium.....	30
2.2.3.3. Ajouts éventuels.....	30
<b>2.2.4. Principales catégories de ciment .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.5. Hydratation des minéraux de clinker pur.....</b>	<b>32</b>
2.2.5.1. Hydratation de $C_3S$ .....	32
2.2.5.2. Hydratation du $C_2S$ .....	32
2.2.5.3. Hydratation du $C_3A$ .....	33
2.2.5.4. Hydratation du $CA_4F$ .....	34
<b>2.2.6. Différents types de retraits .....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.7. Concentration le Châtelier .....</b>	<b>34</b>
<b>2.3. Béton.....</b>	<b>35</b>
<b>2.3.1. Propriétés mécaniques du béton à température ambiante.....</b>	<b>35</b>
2.3.1.1. Comportement en traction. ....	35
2.3.1.2. Comportement en compression. ....	37
<b>2.3.2. Béton endommagé .....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.3. Effet du rapport E/C sur le comportement du béton.....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.4. Béton renforcé par des fibres .....</b>	<b>39</b>
2.3.4.1. Mécanismes de fonctionnement des fibres dans le béton .....	39
2.3.4.2. Choix du type de fibres .....	39
2.3.4.3. Influence de l'orientation préférentielle des fibres .....	40
<b>2.4. Béton armé.....</b>	<b>41</b>
<b>2.4.1. Enrobage des armatures (aciers) .....</b>	<b>41</b>
<b>2.4.2. Caractéristiques mécaniques de l'acier .....</b>	<b>41</b>
<b>2.5. Méthodes d'évaluation des bétons .....</b>	<b>42</b>
<b>2.5.1. Méthodes destructives.....</b>	<b>42</b>
<b>2.5.2. Mesures semi destructives .....</b>	<b>42</b>
<b>2.5.3. Méthode non destructives par ultrasons .....</b>	<b>43</b>
<b>2.6. Conclusion.....</b>	<b>43</b>
<b>2.7. Références bibliographiques .....</b>	<b>44</b>

## 2.1. Introduction

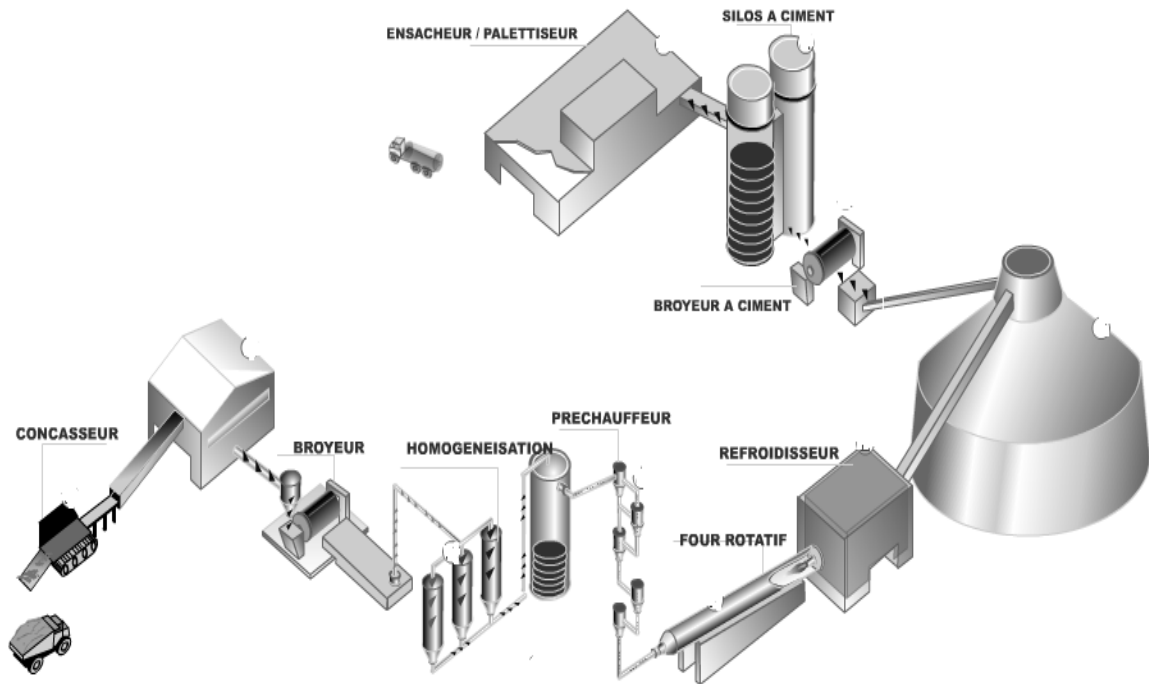
La structure du ciment fraîche se présente comme un système dispersé constitué d'un réseau de particules dans une phase aqueuse, ces particules étant elles-mêmes des grains microscopiques de plusieurs cristallins. Le ciment Portland artificiel est composé de quatre phases minérales majeures ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ), et de sulfate de calcium. Les grains de ciments ont des formules chimiques qui sont le plus souvent exprimées sous forme de sommes d'oxydes. La notation des cimentiers est résumée ci-dessous :



## 2.2. Ciment

### 2.2.1. Fabrication du ciment

Les ciments entrent dans la famille des liants hydrauliques, ils sont des poudres constituées de sels minéraux anhydres instables. Ils s'hydratent en présence d'eau formant une pâte qui se consolide progressivement. Les matériaux Pouzzolaniques sont souvent utilisés en tant qu'additifs à ces liants, mais peuvent aussi être utilisés séparément. Le liant hydraulique le plus utilisé est le ciment Portland. La matière première est constituée de 80% de Calcaire et 20% d'Argile (silicoaluminates). Des correcteurs comme le minerai de fer sous forme d'oxydes  $Fe_2O_3$ , la bauxite ( $Al_2O_3$ ) ou le sable ( $SiO_2$ ) sont ajoutés pour atteindre la composition souhaitée. La matière première est broyée pour obtenir le "cru" composé de  $CaCO_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  et  $Fe_2O_3$  qui est mis à la cuisson jusqu'à fusion partielle de ce mélange vers  $1450^\circ C$  pour former le clinker. Celui-ci est ensuite broyé avec assemblage de gypse et divers constituants : Laitiers, pouzzolanes, cendres volantes, fillers et fumée de silice. Ces produits ont la propriété de fixer  $Ca(OH)_2$  formé lors de l'hydratation du ciment en donnant des composés hydratés stables et permettent aussi de réguler la cinétique de la prise. Les cendres volantes sont récupérées dans les centrales thermiques à charbon et les laitiers (silico-aluminates de calcium) proviennent des hauts fourneaux. Dans la figure 2.1, nous schématisons le processus de fabrication du ciment Portland.



**Figure 2. 1. Processus de fabrication du ciment**

- **Concasseur** : Les blocs par dumpers sont fragmentés en un ou plusieurs étages dans des concasseurs à marteaux ou à mâchoires. La matière concassée transportée par des bandes vers des halls éventuellement muni de dispositif de pré-homogénéisation afin d'obtenir une plus grande régularité de composition.
- **Broyeur** : Des broyeurs à boulets ou à galets réduisent la matière à la finesse requise pour la cuisson après l'avoir séchée en utilisant les gaz chauds du four. Des dispositifs automatiques permettent de vérifier en continu que les proportions des diverses matières premières conduisent à l'analyse chimique recherchée.
- **Homogénéisation** : La farine stockée dans des silos de grandes dimensions est homogénéisée par brassage à l'air comprimé.
- **Préchauffage** : La farine mélangée 4 à 5 fois aux gaz de l'étage inférieur puis séparée dans des cyclones s'échauffe en progressant vers le bas jusqu'à 850°C environ.
- **Four rotatif** : La fin des réactions est réalisée dans un four cylindrique tournant et la température de flamme atteint 1500°C. Les fours disposent également d'un système dit "précalcinateur".
- **Refroidisseur** : Le clinker est amené à la température ambiante au travers d'un refroidisseur par soufflage d'air.
- **Broyage en ciment** : Le broyage du clinker est effectué dans des broyeurs à boulets dont la rotation provoque par chocs et écrasement la réduction en grains fins de quelques dizaines de microns. Une quantité de 3 à 5 % de gypse ou anhydrite sont co-broyés afin de régulariser la prise du ciment. Des ajouts de constituants secondaires tels que des laitiers, des cendres volantes de centrales thermiques, du calcaire ou de la fumée de silice sont ajoutés pour obtenir des propriétés spécifiques et qualités recherchées.



- **Silos à ciment** : Le ciment stocké dans des silos de plusieurs milliers de tonnes est livré soit en vrac soit en sac
- **Ensacheur** : L'ensachage du ciment s'effectue sur des machines rotatives à 16 becs dont la capacité peut atteindre en automatique 5000 sacs par heure. Les sacs à valve se ferment d'eux même, un palettiseur les place sur palette par lots de 1,5 tonne sans intervention manuelle.

### 2.2.2. Caractéristiques du ciment et de sa composition

Le ciment est caractérisé par sa composition chimique et par ses caractéristiques physiques (la forme et la finesse des grains). Les grains de ciment sont hétérogènes et polyphasés, au contact de l'eau, ils donnent naissance à des produits dont la composition chimique est variable. L'analyse de la microstructure des ciments est fondamentale pour comprendre précisément les matériaux cimentaires et leurs comportements.

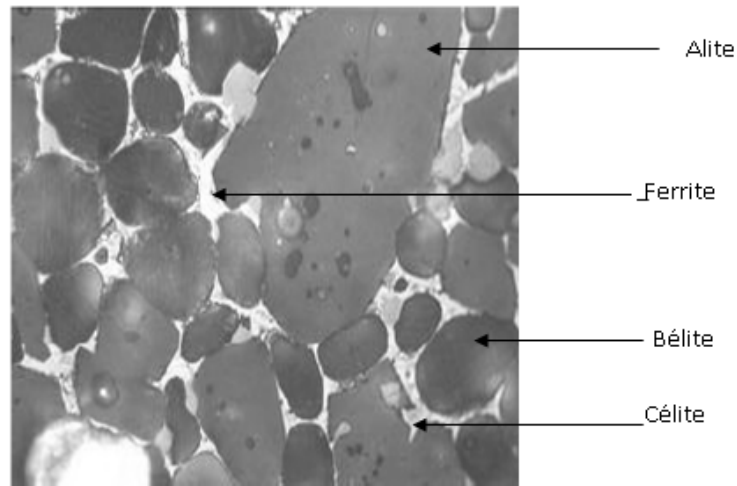
### 2.2.3. Composition du ciment

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute les autres constituants associés au clinker grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques. Les constituants principaux du ciment et les additions sont décrits dans les sous paragraphes ci dessous.

#### 2.2.3.1. Clinker

On appelle clinker le produit qui sort du four de cimenterie avant broyage. Après broyage, l'ajout de sulfate de calcium conduit au ciment Portland artificiel. Le ciment contient un certain nombre de constituants dont la teneur varie suivant sa catégorie. Le clinker contient encore en faible quantité sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), de la magnésie ( $\text{MgO}$ ) et diverses traces de métaux [1-2]. La teneur en magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durci. À l'aide du microscope, on peut distinguer la structure minérale du clinker en trois phases (figure 2.2).

- *A = alite (Phase cristallisée), se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grands (grains anguleux foncés) de l'ordre de  $50\mu$ .*
- *B = bélite (Phase vitreuse), se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).*
- *C = Céliste (phase vitreuse légèrement foncée et claire), se trouve dans le clinker sous forme impure et de phase vitreuse.*



**Figure 2. 2. Reflected light micrograph of RM 848 [3]**

#### **2.2.3.2. Sulfate de calcium**

Le sulfate de calcium se présente sous forme de gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ou d'anhydrite  $\text{CaSO}_4$ . Le gypse qui se présente généralement sous forme de roches, peut aussi se rencontrer dans la nature sous forme de roches des sables. La propriété qui se caractérise le sulfate de calcium c'est qu'on l'ajoute au ciment pour réguler la prise.

#### **2.2.3.3. Ajouts éventuels**

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse (sulfate de calcium) destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute les autres constituants associés au clinker grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques. Ces constituants sont ajoutés au ciment pour des raisons économiques et/ou pour leurs propriétés Hydrauliques ou Pouzzolaniques. Les ajouts éventuels les plus utilisés sont décrit dans la littérature [4-5].

- ***Laitiers granulé de haut fourneau***

Ils sont des sous-produits de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Les laitiers contenant des oxydes métalliques sont essentiellement des silicates, des aluminates et de la chaux, qui sont formés en cours de fusion ou d'élaboration de métaux par voie liquide. Ils sont obtenus par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

- ***Cendres volantes***

Elles sont les produits pulvérulents de grande finesse provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue entre, les cendres volantes siliceuses qui ont des

propriétés Pouzzolaniques, et les cendres volants calciques qui ont des propriétés hydrauliques et parfois Pouzzolaniques.

▪ ***Pouzzolanes naturelles***

Les pouzzolanes sont composées essentiellement de  $\text{SiO}_2$  réactif et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , le reste contient de l'oxyde de fer  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et d'autres oxydes avec des proportions de  $\text{CaO}$  réactif est négligeable. Les pouzzolanes naturelles sont des substances d'origine volcaniques ou des roches sédimentaires (des schistes activés thermiquement) ayant une composition appropriée. Les pouzzolanes ont des propriétés hydrauliques intrinsèques. Les matériaux Pouzzolaniques doivent être convenablement préparés, c'est-à-dire il faut qu'ils soient sélectionnés, homogénéisés, séchés ou traités thermiquement et réduits en poudre en fonction de leur état à la production ou à la livraison.

▪ ***Fillers***

Ils sont des constituants secondaires des ciments, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent jamais excéder 5% en masse dans la composition du ciment. Ils sont aussi des matières minérales naturelles ou artificielles qui agissent par granulométrie sur les propriétés physiques des liants.

▪ ***Fumées de silice***

Elles sont des sous-produits de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre de l'ordre de  $0,1\mu\text{m}$ . Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent comporter au moins 85%(en masse) de silice amorphe et avoir une surface massique supérieure à  $15 \text{ m}^2/\text{g}$  [1]. Les fumées de silice ont aussi des propriétés Pouzzolaniques.

▪ ***Calcaires***

Les calcaires sont des roches sédimentaires composées majoritairement de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  et de carbonate de magnésium  $\text{MgCO}_3$ . Ils sont considérés comme un des constituants principaux du ciment, mais ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  supérieure à 75% en masse.

#### **2.2.4. Principales catégories de ciment**

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale. Les ciments produits par Ciments du Maroc sont constitués de clinker et des constituants secondaires classés par la norme NM 10.1.004. On distingue alors le ciment CPJ 35 qu'est un ciment Portland composé résultant de la mouture de 65% de Clinker et 35% d'un où plusieurs constituants secondaires tels que les fillers, pouzzolane ou les cendres définis par la norme et

également le gypse pour régulariser la prise. Les cimentières du Maroc produisent aussi Le CPJ 45 qui est un ciment portland composé résultant de la mouture de 70% Clinker et 30% d'un ou plusieurs constituants secondaires tels que les fillers, pouzzolane ou les cendres définies par la norme et éventuellement du gypse pour régulariser la prise.

### 2.2.5. Hydratation des minéraux de clinker pur

L'hydratation d'un ciment Portland peut se résumer dans une approche simple par l'hydratation des quatre constituants de clinker ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  et  $C_4AF$ ). Dans ce paragraphe, nous étudierons premièrement les mécanismes d'hydratation des silicates ( $C_3S$  et  $C_2S$ ), des aluminates ( $C_3A$  et  $C_4AF$ ). Ensuite, nous aborderons les différents types des retraits. Enfin, nous exposerons la méthode de la détermination de la concentration le *Châtelier*.

#### 2.2.5.1. Hydratation de $C_3S$

Le  $C_3S$  est le constituant majeur du ciment Portland artificiel, il peut constituer de 60% à 85% du volume total du ciment. De plus, le  $C_3S$  joue un rôle important dans la formation des hydrates et la résistance mécanique des structures cimentaires. Le processus d'hydratation du  $C_3S$  reste compliqué et non totalement expliqué [6]. À l'aide du microscope électronique à balayage *Glasser et al.* [7] ont observé une croissance en forme d'oursins du C-S-H, type I ( $C/S = 1$ ), puis ils ont constaté que les cristaux de Portlandite apparaissent simultanément en fin de la période dormante. Le mécanisme d'hydratation de C-S-H est représenté dans la figure 2.3.

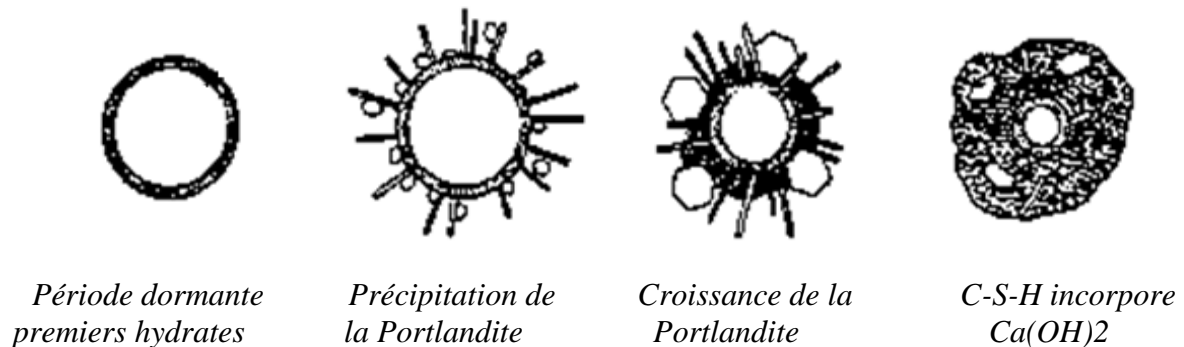


Figure 2. 3. Mécanisme d'hydratation de  $C_3S$  [7]

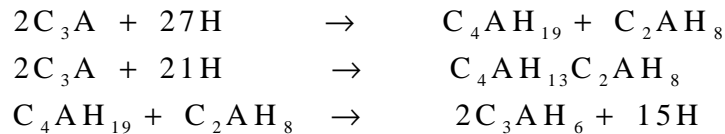
#### 2.2.5.2. Hydratation du $C_2S$

L'hydratation de  $C_2S$  est identique à celle du  $C_3S$ , mais avec une cinétique différente. La cinétique d'hydratation du  $C_2S$  est beaucoup plus lente que celle du  $C_3S$ . Les études réalisées par *Matte* [8] sur des bétons à poudres réactives (BPR) ont montré que le  $C_2S$  n'est pas pratiquement hydraté par rapport au  $C_3S$  lorsque le matériau n'évolue plus. En bref, les silicates hydratés formés proviennent donc majoritairement du  $C_3S$  qui a un rôle supérieur dans l'augmentation de la

résistance des matériaux cimentaires à court terme. Par conséquent, l'hydratation est plus lente du  $C_2S$ , mais après une période de 28 jours elle conduit à une meilleure résistance à long terme.

### 2.2.5.3. Hydratation du $C_3A$

La grande réactivité de  $C_3A$  peut, comme dans le cas de  $C_3S$ , être rattachée à l'irrégularité des liaisons Ca-O et à la présence de sites vacants selon *Mondal et al.* [9]. Une pâte contenant uniquement de l'aluminate tricalcique perd rapidement toute sa maniabilité, ce qui correspond à une prise rapide de la pâte qui due principalement à la formation de phases hydratées intermédiaires  $C_4AH_{19}$ ,  $C_4AH_{13}$ ,  $C_2AH_8$  [10-11]. Ces phases évoluent ensuite vers une phase plus stable  $C_3AH_6$  à une vitesse qui dépend fortement de la température, du rapport liquide/solide et de la taille des grains. D'une manière générale, l'hydratation du  $C_3A$  est grandement influencée par les conditions et le milieu d'hydratation. Les réactions chimiques d'hydratation de  $C_3A$  peuvent se présenter comme suit [10-11]:



Pour sauver au phénomène d'hydratation de fausse prise, les cimentiers incorporent une source de sulfates par l'intermédiaire du gypse. Si cette quantité est bien dosée, ce gypse réagit avec les aluminates pour former des hydrates de sulfoaluminate de calcium. Le tri-sulfoaluminate de calcium connu aussi sous le nom d'Ettringite. Dans la figure 2.4, nous donnons le schéma d'une structure qui représente le modèle de l'Ettringite proposé par *Jochen Stark et al.* [11]. L'équation bilan de l'hydratation de l'aluminate tricalcique en présence de gypse est donnée par :

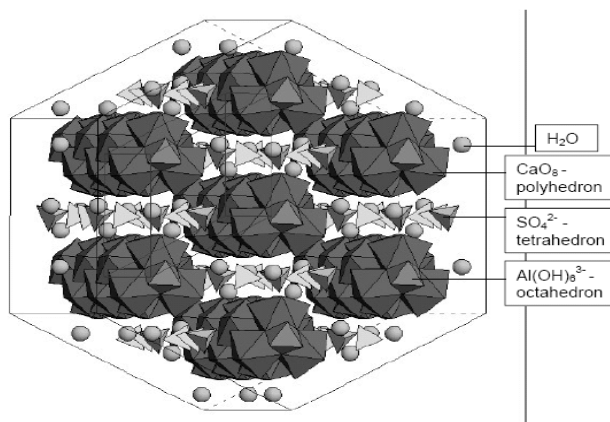


Figure 2. 4. Structure représente modèle de l'Ettringite [11]

#### 2.2.5.4. Hydratation du $CA_4F$

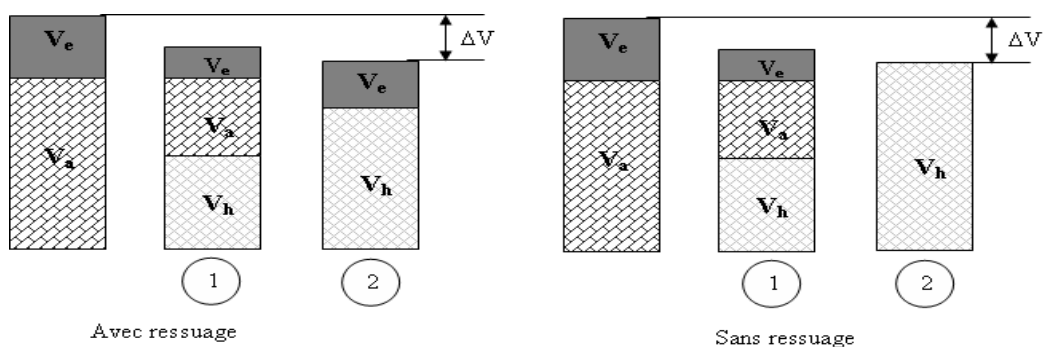
Taylor [10] a montré que l'hydratation des phases  $C_4AF$  ou  $C_2(A, F)$  se rapproche de celle de  $C_3A$  lorsque les conditions d'hydratation sont identiques. À la température ambiante, la cinétique d'hydratation de  $C_4AF$  est beaucoup plus lente que celle de  $C_3A$ .

#### 2.2.6. Différents types de retraits

La pâte de ciment, du mortier et donc du béton, manifeste des variations dimensionnelles. Ces variations sont surtout en relation avec sa dessiccation, c'est-à-dire évaporation de l'eau libre dans la structure, et aussi elle manifeste par sa structuration progressive (hydratation du ciment). Puisque les dimensions des pièces augmentent ou diminuent, on distingue alors entre les gonflements et les retraits. Les effets de ces derniers sont en pratique les plus importants. Les mécanismes de l'action de retraits et leurs effets sur la durabilité des matériaux cimentaires est décrit par plusieurs auteurs [12-14]. En générale, on distingue cinq types de retraits: retrait plastique, retrait thermique, retrait de carbonatation, retrait de dessiccation et retrait d'auto- dessiccation.

#### 2.2.7. Concentration le Châtelier

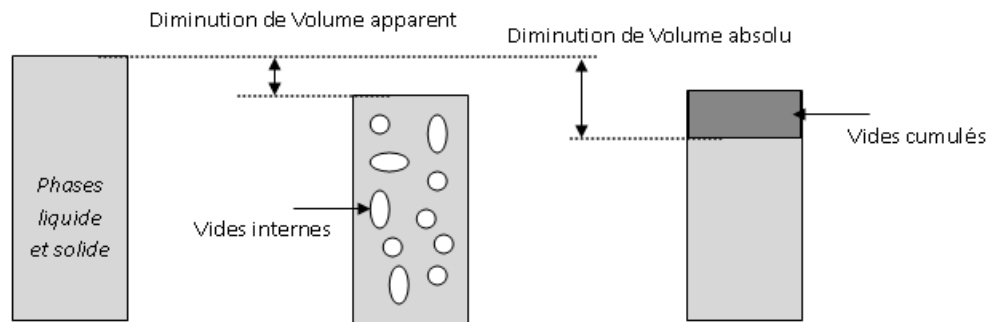
En 1900 Châtelier [15] découvre la contraction de la matrice cimentaire, désormais ce phénomène porte son nom. Plusieurs chercheurs ont étudié ce phénomène dont la mesure reste délicate à effectuer. D'une façon générale, il est difficile de séparer les différents facteurs qui influencent les mécanismes d'hydratation. Dans la réaction d'hydratation du ciment, le volume des hydrates formés  $V_h$  est inférieur à la somme des volumes de ciment anhydre  $V_a$  et de l'eau consommée  $V_e$ . Ces volumes sont présentés mathématiquement par l'équation suivante  $V_h = V_e + V_a - \Delta V$ , et schématiquement dans la figure 2.5 [5].



**Figure 2. 5. Présentation schématique de la concentration de la Châtelier**  
 1. Hydratation non complète 2. Hydratation complète

Ce phénomène provoque une diminution de volume comprise entre 8 et 10% de la somme des volumes des constituants de ciment anhydre et de l'eau [16]. Pour la pâte du ciment, il est compris

entre 8 et 12% [13]. Ce qui conduit alors à un retrait linéique potentiel de l'ordre de 3 à 4%. Il est donc important de distinguer entre le volume apparent et le volume absolu dans l'analyse des déformations endogènes. Le premier peut être défini comme la somme des volumes des différentes phases du matériau qu'elle soit solide, liquide ou gazeuse. Le deuxième peut être défini comme la somme des volumes des phases solides et liquides seulement [17] (Figure 2.6).



**Figure 2. 6. Présentation du volume apparent et du volume absolu [17].**

## 2.3. Béton

Le béton est un matériau hétérogène multiphasique constitué d'un mélange de granulats, sable, ciment et d'eau. Chaque constituant du béton joue un rôle bien défini sur sa rigidité. On peut distinguer entre les bétons Hydrauliques et des bétons Bitumineux. Dans les bétons Hydrauliques, le liant est une pâte à base de ciment et d'eau, certaines additions minérales et adjuvants peuvent être ajoutés en faible quantité afin de donner des propriétés spéciales, comme des fumeés de silice ou des super-plastifiants. Lorsque le béton ne contient pas de granulats mais uniquement du sable, du ciment et d'eau on parle alors de mortier.

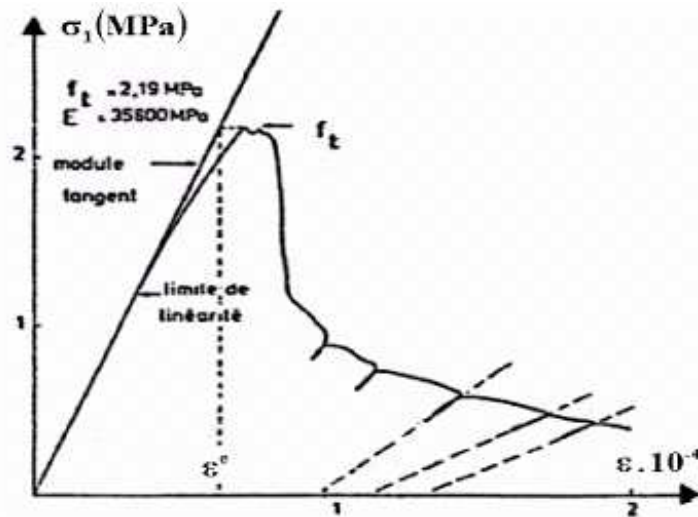
### 2.3.1. Propriétés mécaniques du béton à température ambiante

En absence des sollicitations thermiques, le béton se caractérise par la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'Young. Dans ce paragraphe nous allons présenter le comportement mécanique, en traction et en compression, du béton à température ambiante. Puis nous allons décrire le lien entre l'endommagement et la fissuration.

#### 2.3.1.1. Comportement en traction.

Le comportement mécanique du béton en traction est moins étudié que la compression, car d'une part le béton est conçu essentiellement pour résister à la compression et d'autre part dû à son comportement quasi fragile. L'essai de traction directe est difficile à réaliser. Par conséquent, on fait appel à des essais indirects de type flexion trois points pour identifier le comportement en

traction du béton. L'essai de traction directe pose deux problèmes délicats : le premier est le non linéarité du comportement et le deuxième est les effets d'échelle et de gradient de contrainte auquel le béton est sensible. Les premiers essais de traction directe ont été réalisés par *Terrien* [18]. La figure 2.7 montre le comportement de béton en traction directe.



**Figure 2. 7. Comportement de béton en traction directe [18]**

L'interprétation de cette courbe fait apparaître simplement deux phases : la première correspond au pré pic ( $f_t < \sigma$ ) où la courbe s'écarte assez peu de la droite élastique, dans ce cette phase les premières dégradations de béton apparaissent à environ 50 % de la contrainte maximale [18]. En effet, la meilleure façon pour caractériser les phénomènes qui se passent dans cette phase est la technique de l'émission acoustique. La deuxième phase convienne au post-pic, c'est la phase d'adoucissement, où la contrainte chute brutalement avant de se stabiliser. Dans ce stade les microfissures se propagent dans la pâte de ciment selon le mode I de rupture pour constituer une fissure continue perpendiculaire à l'extension principale.

*Phillips et al.* [19] ont réalisé un essai de traction uniaxiale instrumenté d'un extensomètre à lames centré sur l'entaille. Cet essai permet d'obtenir toute la courbe contrainte-ouverture de fissure. *Phillips et al.* proposent à partir de cet essai une explication au non linéarité et à l'adoucissement du comportement du matériau. Le déplacement total s'exprime par :  $\delta = \delta_e + \delta_o + w$ ,  $\delta_e$  et  $\delta_o$  sont respectivement les déplacements élastiques et irréversibles et  $w$  est l'ouverture de fissure. Dans la figure 2.8, *Phillips* définit quatre points caractéristiques sur la courbe contrainte-ouverture de fissure: le point de non linéarité L, le point de fissuration C, le point caractéristique d'adoucissement en tension S et le point de rupture finale F.



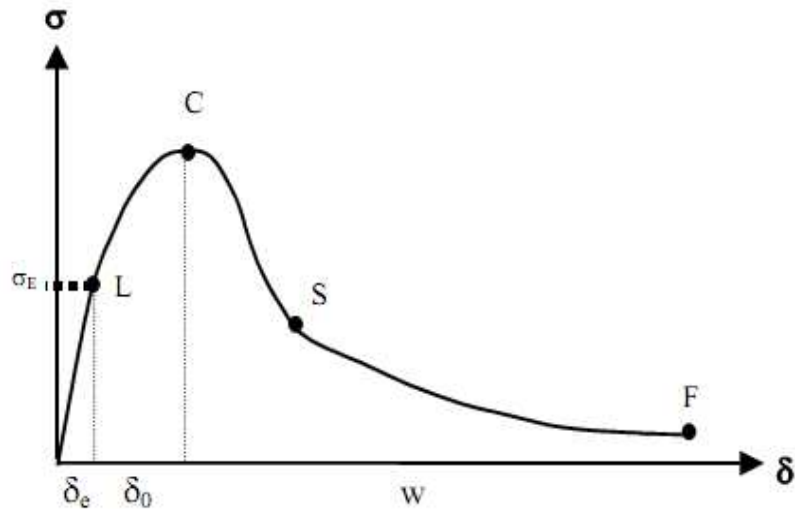


Figure 2. 8. Courbe contrainte-déplacement dans un essai de traction sur éprouvette entaillée, d'après *Phillips et al.* [19]

### 2.3.1.2. Comportement en compression.

La résistance à la compression est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton, c'est pour cette raison que l'essai de compression uniaxiale est le plus étudié. La figure 2.9 présente le comportement de béton en compression simple selon *Ramtani* [28], la forme de cette courbe montre que la réponse est principalement linéaire jusqu'à 30 % (phase 1) de la contrainte maximale  $f_c$ , après ce point la réponse de la courbe devient non linéaire jusqu'à 80 % de la limite en compression simple (phase 2). Dans la troisième phase, le non linéarité est plus accentué qu'avant et caractérisé par un début d'augmentation du volume apparent du matériau, au delà de cette phase le comportement devient adoucissant (phase 4).

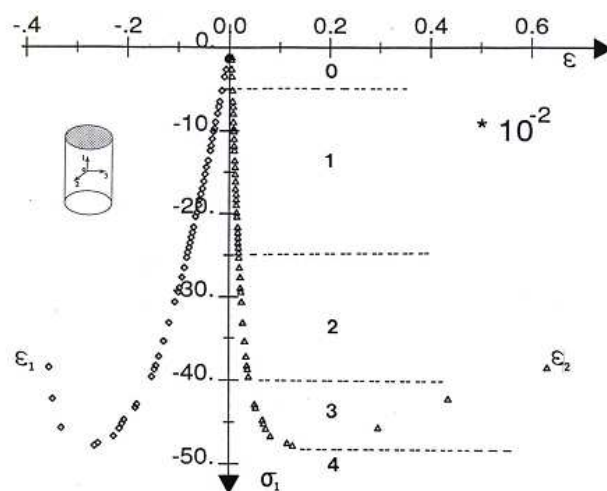


Figure 2. 9. Comportement de béton en compression simple d'après *Ramtani* [20].

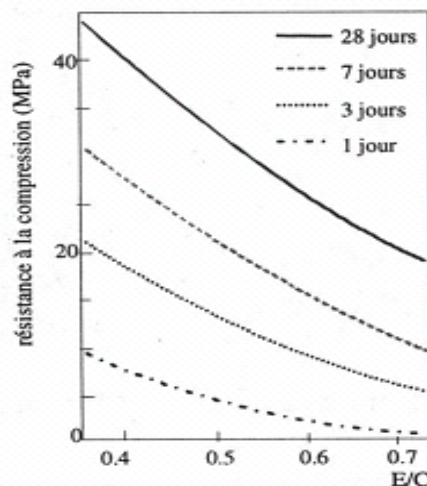
Une autre propriété mécanique importante du béton est la porosité. Elle est définie comme étant le volume total des vides contenus dans le béton pour un mètre cube  $\text{m}^3$  de matériau. Cette porosité augmente avec le rapport E/C et en général comprise entre 11 et 18%. Elle est constituée de pores plus ou moins interconnectés, ainsi que de micro ou macro-fissurations. La porosité du béton dépend du rapport E/C. Pour un rapport E/C élevé induisant une plus forte porosité.

### 2.3.2. Béton endommagé

Les causes de dégradation des bétons sont nombreuses, elles ont pour conséquence d'altérer les propriétés mécaniques du béton. Elles peuvent être principalement d'origines chimiques (réactions alcali-granulats, carbonatation, attaques par des acides, des sulfates, des chlorures,...), physiques (fissurations dues au chargement, gel-dégel de l'eau libre) ou thermiques *Torrenti et al* [21]. Dans la majorité des cas une augmentation de degré de microfissurations ou de la porosité apparaît suite aux dégradations, ce qui conduit à une faible perméabilité du béton d'enrobage selon *Picandet et al* [22].

### 2.3.3. Effet du rapport E/C sur le comportement du béton

Dans les règles de calcul des structures en béton, le béton est essentiellement caractérisé par sa résistance en compression simple à 28 jours  $f_{c28}$ . Or pour un type de granulats et pour un type de ciment donnés,  $f_{c28}$  dépend presque exclusivement de la composition de la pâte de ciment c'est-à-dire du rapport Eau/Ciment (E/C) intervenant dans la composition massique du béton. Ce facteur conditionne aussi la porosité de la matrice cimentaire du béton durci, qui est un paramètre qui influe beaucoup sur la durabilité du béton. La figure 2.10 illustre l'augmentation de la résistance du béton en compression simple avec la diminution du rapport E/C [23].



**Figure 2. 10. Influence du rapport E/C sur la résistance à la rupture en compression simple du béton à différentes échéances [23]**

### 2.3.4. Béton renforcé par des fibres

Une méthode différente consiste à agir non pas au niveau de la structure, mais à l'échelle du matériau. Elle consiste principalement à renforcer le béton par des fibres, avec un choix approprié du type de fibres, de leur taille ainsi que de leur dosage, ce qui convient à inhiber la propagation des premières microfissures. En effet, les fibres de renforcement assurent le transfert de contraintes à travers la fissure, et limitent l'ouverture de ces fissures et leurs propagations.

#### 2.3.4.1. Mécanismes de fonctionnement des fibres dans le béton

L'effet des fibres est sensible en traction, pour un béton sans renforts une fois fissuré n'est capable de supporter que de faibles efforts par endommagement. Ceci se traduit par une chute brutale de contraintes comme le montre la courbe de la figure 2.11. Le comportement en traction directe correspondant à une teneur en fibre de 0% [24]. L'étude du comportement en traction par flexion permet donc de mieux mettre en évidence l'effet d'un renfort de fibres via le gradient de déformation. L'addition de fibres entraîne une augmentation de la résistance et une augmentation de la flexibilité. Le comportement post-fissuration est significativement amélioré, et l'augmentation de la résistance résiduelle est due aux ponts et liaisons créés par les fibres qui sont placées stratégiquement et qui élèvent les fissures. *Taylor et al.* [24] ont montré que lorsque les résistances résiduelles sont supérieures à la résistance au pic, c'est à dire le béton a un comportement durcissant.

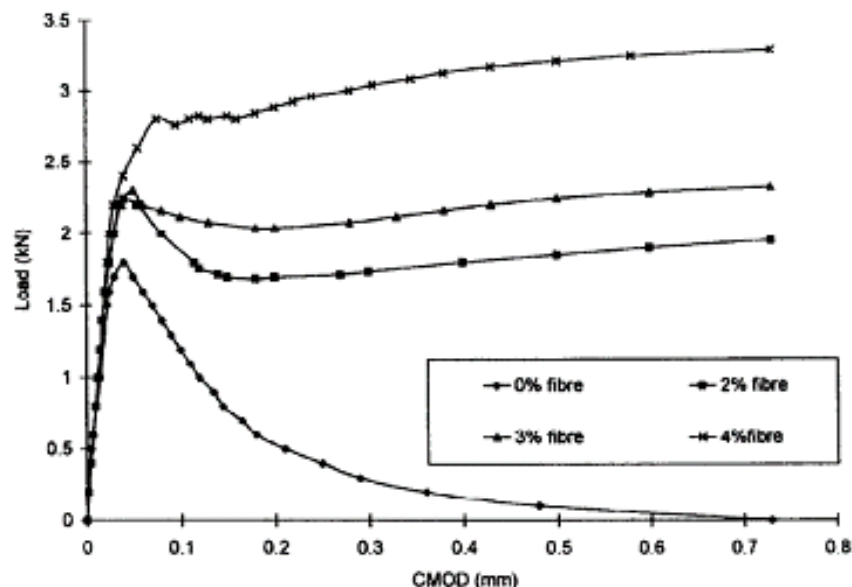
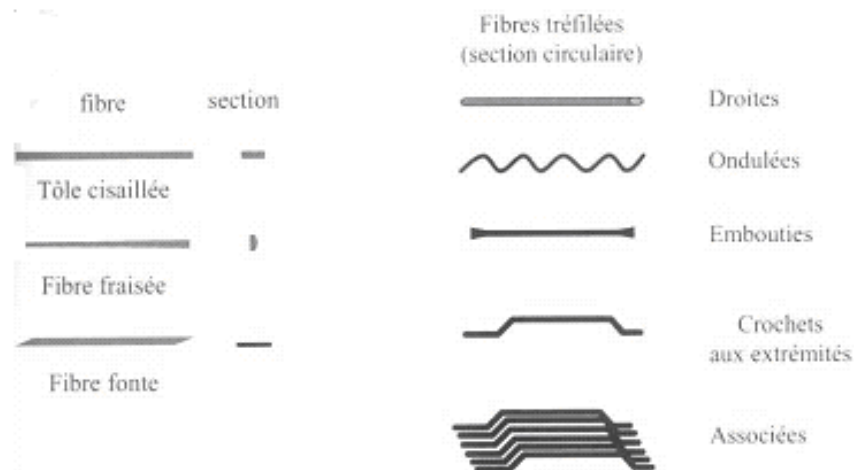


Figure 2. 11. Comportement en traction directe en fonction du pourcentage en fibres [24].

#### 2.3.4.2. Choix du type de fibres

Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques

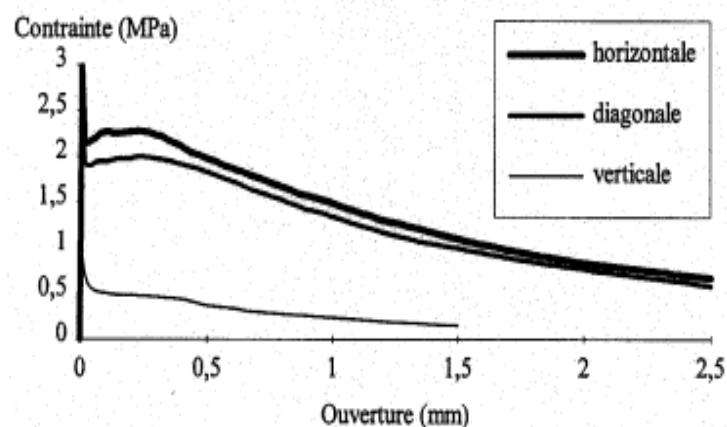
différentes selon leurs natures ou leurs géométries. Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients. Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins. Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites. La figure 2.12 présente différentes géométries de fibres métalliques selon *Andra* [25].



**Figure 2. 12. Différentes formes géométriques de fibres métalliques [25]**

#### 2.3.4.3. Influence de l'orientation préférentielle des fibres

Des études ont été procédées afin de montrer l'influence de l'orientation préférentielle des fibres sur le comportement mécanique des bétons. *Casanova* [26], après avoir coulé un bloc de béton en orientant les fibres verticalement, il a carotté ce bloc dans trois directions, ensuite effectué des essais de flexion 3 points pour caractérisé l'influence de l'orientation des fibres. Les résultats obtenus par *Casanova* [26] sont présentés dans la figure 2.13.



**Figure 2. 13. Influence de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion [26].**

## **2.4. Béton armé**

Le béton armé est le renforcement de béton, qui caractérise par sa résistance à la compression, et des armatures en aciers, qui caractérise par sa capacité à résister aux contraintes de traction. On distingue les armatures longitudinales disposées suivant l'axe longitudinal de la structure du béton, et des armatures transversales disposées dans des plans perpendiculaires à l'axe de la structure. Les aciers utilisés dans les grandes constructions sont des alliages métalliques de fer et de carbone (moins de 2% de C). Ces aciers se présentent sous forme de barres de grande longueur (souvent 12 m), les diamètres commerciaux des barres sont 6 8 10 12 14 16 20 25 32 40 (en mm).

### **2.4.1. Enrobage des armatures (aciers)**

L'enrobage des armatures représente la distance entre la surface du béton et l'armature la plus proche (cadres, étriers, épingles, armatures de peau, etc.). Il doit être suffisant pour garantir la bonne protection de l'acier contre la corrosion, la bonne transmission des efforts d'adhérence, et une résistance au feu convenable. L'enrobage des armatures et les caractéristiques du béton d'enrobage sont les paramètres fondamentaux permettant de maîtriser la pérennité des ouvrages face aux phénomènes de corrosion et donc leur durée d'utilisation.

### **2.4.2. Caractéristiques mécaniques de l'acier**

L'acier peut être sollicité de manière identique dans toutes les directions en compression et en traction. Les caractéristiques physiques et mécaniques de l'acier sont les mêmes dans toutes les directions, de sorte qu'il se déforme élastiquement ou plastiquement. La propriété mécanique la plus souvent mise en avant pour l'acier est sa résistance à la traction. C'est-à-dire que lorsque l'acier est soumis à un effort de traction, il passe par trois états successifs : le domaine élastique, le domaine plastique et enfin la rupture [27]. Dans les constructions métalliques, la résistance au cisaillement est particulièrement importante au niveau des assemblages. Les caractéristiques mécaniques de béton armé est à la limite de 500 MPa. Cette valeur varie en fonction du type d'acier, le module d'élasticité longitudinale  $E_s$  est pratiquement constant quel que soit l'acier utilisé et pris égal à  $E_s = 200\,000$  MPa. La figure 2.14 présente le diagramme contrainte déformation réel et le diagramme réglementaire de calcul à l'ELU pour l'acier qui sera utilisé pour le dimensionnement des éléments de béton armé.

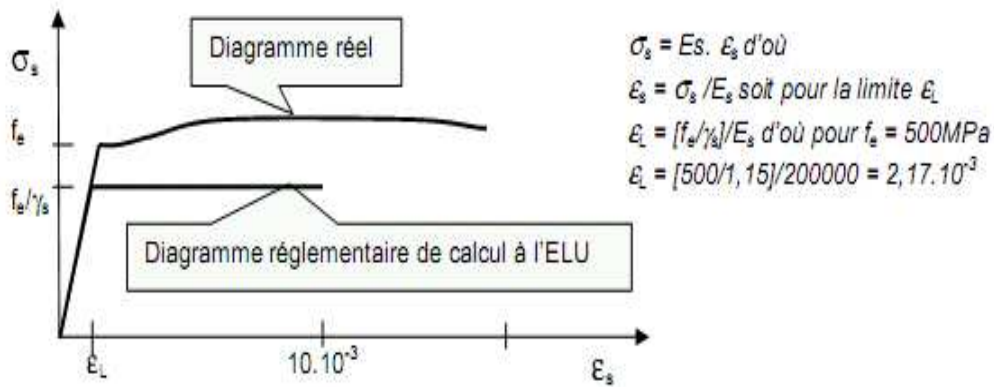


Figure 2. 14. Diagramme expérimental  $\sigma_s - \varepsilon_s$  en traction simple et calculé à l'ELU[27]

## 2.5. Méthodes d'évaluation des bétons

La connaissance et le suivi de différentes propriétés mécaniques de bétons est nécessaire pour la maintenance des ouvrages de génie civil. Les problèmes du vieillissement du béton doivent donc être détectés le plus tôt possible pour éliminer les risques et limiter les coûts de réparation et de réhabilitation. Certains ouvrages peuvent également parvenir en bon état au terme de la durée de vie pour laquelle ils ont été conçus, et l'évaluation de l'état de santé de ces ouvrages peut permettre de décider ou non de la prolongation de leur exploitation. L'ensemble des méthodes d'évaluation du béton qu'elles soient destructives ou non-destructives peut alors apporter un diagnostic précieux aux exploitants de l'ouvrage. Elles peuvent, suivant leur précision, être utilisées pour simplement détecter une altération des caractéristiques des matériaux, localiser une zone endommagée, ou même évaluer précisément l'évolution de l'endommagement au cours du temps et prédire les évolutions futures.

### 2.5.1. Méthodes destructives

La plupart des propriétés des bétons sont en général évaluées par des essais sur des échantillons ayant été confectionnés, ou bien ayant été prélevés directement sur les ouvrages à ausculter. Ces essais sont donc destructifs. Les mesures des résistances sont réalisées avec des presses (compression, traction par fendage, par flexion,...), et la porosité peut être déterminée par le volume de mercure ou d'eau qui peut être injecté dans le béton [28-29].

### 2.5.2. Mesures semi destructives

Des méthodes semi destructives qui permettent d'évaluer la résistance mécanique en surface du béton, et leurs utilisations est assez répandue et normalisée (Norme Européenne EN -13791). On trouve des scléromètres qui permettent de mesurer la dureté de la surface de béton, la hauteur de

rebond d'une masse projetée avec une certaine vitesse sur la surface du béton permet de remonter à la résistance en surface du béton. Cet appareil ne donne qu'une information locale sur les propriétés du béton. D'autres méthodes telles que les essais de résistance à la pénétration (sonde Windsor) ou des essais d'arrachement d'une tige métallique scellée dans le béton fournissent également des informations locales sur la résistance à la compression du béton en surface. Ces méthodes sont partiellement destructrices car elles laissent des impacts et des trous dans le parement (que l'on peut reboucher facilement). Ces méthodes sont couramment utilisées sur les ouvrages et peuvent donner des informations très utiles aux maîtres d'œuvres. Cependant, la précision reste faible et l'information n'est pas en situ.

### **2.5.3. Méthode non destructives par ultrasons**

L'utilisation des méthodes dites non destructives est primordiale dans les cas où il est impossible de prélever un échantillon sur la structure, ou si l'on souhaite suivre l'évolution d'une caractéristique au cours du temps. Les principales techniques d'auscultation du béton couramment utilisées en génie civil sont présentées dans les travaux de [30]. Les méthodes utilisant des ondes mécaniques se basent sur la propagation des ondes ultrasonores dans le béton. Ces ondes sont sensibles aux propriétés mécaniques telles que les modules d'élasticité et le coefficient de Poisson, ou encore le taux de porosité. Les méthodes les plus couramment employées à ce jour sont l'impact écho, l'auscultation sonique ("Pulse Velocity") et l'émission acoustique. Les ondes acoustiques peuvent être employées pour détecter des fissures, des vides, ou mesurer des épaisseurs. Par conséquent, les caractéristiques mécaniques du béton peuvent être évaluées après étalonnage.

## **2.6. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre une revue bibliographique sur le processus de fabrication du ciment, les propriétés physico-chimiques des constituants principaux des ciments Portland. Nous avons rappelé aussi une base de connaissance de la microstructure du ciment, les mécanismes d'hydratation de leurs constituants et la nature des principaux hydrates formés. Le rôle de la nature de ciment est souvent discuté dans la littérature, en particulier ce qui concerne sa composition et l'effet des adjuvants.

Nous avons décrit également, les évolutions des comportements en traction et en compression du béton à température ambiante et l'effet de rapport massique E/C sur le comportement et la formulation du béton. Nous avons cité l'effet des fibres sur la durabilité du béton et l'influence de leur orientation verticale, horizontale et diagonale. Enfin une revue de la littérature sur les méthodes

d'évaluation destructives et non destructives du béton est rappelée. La partie expérimentale de cette thèse porte d'une part sur l'utilisation de la méthode destructive. pour étudier la formulation du béton. D'autre part, porte sur l'utilisation de la méthode non destructive en utilisant la propagation des ondes ultrasonores pour suivre la prise des mortiers et évaluer le dimensionnement des tiges en fer enrobées par le mortier.

## 2.7. Références bibliographiques

- [1] D. Lootens. "Ciments et suspensions concentrées modèles. Écoulement, encombrement et floculation". Université Paris VI, page 35, (2004).
- [2] M. Regourd. "L'hydratation du ciment portland, le béton hydraulique", Paris presse de L'ENPC, chapitre 11, Pp 191.211, (1995).
- [3] P.E. Stutzman and Stefan, "Leigh Compositional analysis of NIST" Reference Material Clinker 8486, Gaithersburg, MD, USA, April, (2001).
- [4] LEA, "Chemistry of cement and concrete", fourth edition, Edited by Peter. C. HEWLETT, pp 241.289, (1998).
- [5] R.Dupain, R.Lanchon, J-C.Saint Arroman "Granulats, sol, ciment et bétons"p.3, casteilla, (2000).
- [6] P. Barret "Mécanismes d'hydratation des silicates de calcium (C3S, C2S) constituants des ciments vus à travers les concepts de la réactivité des solides", in Proceeding of 7<sup>th</sup> symp. Chemistry of cement Paris I, pp 86.92, (1980).
- [7] D.L Glasser , E. Lachowski , K. Mohan , H. Taylor , "A multi-method study of C3S hydration". Cement Concrete Research, Vol. 8 No. 6, pp 733.740, (1978).
- [8] V. Matte. "Durabilité des bétons à ultra hautes performances : rôle de la matrice cimentaire". Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France (1999)
- [9] P. Mondal and J.W .Jeffery.»The crystal structure of tricalcium Aluminates". Acta. Cryst. B 31, (1975).
- [10] H.F.W Taylor, "Cement chemistry". New York, Telford, (1997).
- [11] Jochen Stark, Katrin Bollmann , "Delayed Ettringite Formation in Concrete ".Bauhaus-University Weimar / Germany.
- [12] Baron J., Les retraits de la pâte de ciment, le béton hydraulique : Connaissance et pratique. Presse de l'école Nationale des Pont et Chaussées, Chapitre 27 P (485-501) « *Les retraits de la pâte de ciment* ». (1982)
- [13] Aitcin, P., C., Neville, A., Acker P., Les différents types de retrait du béton, bulletin des laboratoires des ponts et chaussées N° 215, pp. 41-51, (1998)
- [14] A. Walter, Mesure du retrait endogène aux jeunes âges, mémoire de stage d'IUT, Université de Montpellier, Montpellier, (1998).
- [15] Le Chatelier, H, Sur le changement de volume qui accompagne le durcissement des ciments, Bulletin de la société de l'encouragement pour l'industrie nationale, 5<sup>èmes</sup>érie, tome 5, pp 54-57 (1900).
- [16] Acker P., Retraits et fissuration du béton. Association française pour la construction, pp 10-40.(1992).



- [17] Garcia Boivin, S., Retrait au jeune âge du béton : développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène, thèse de doctorat, ENPC, 251 pages, (1999).
- [18] Terrien M., "Emission acoustique et comportement mécanique post-critique d'un béton sollicité en traction", Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées 105. (1980).
- [19] D.V. PHILLIPS, Z. BINSHEG, Direct tension tests on notched and un-notched plain concrete specimens, Magazine of Concrete Research, Volume 45, N°162, Pages 25-35. (1993).
- [20] Ramtani.S "Contribution à la modélisation du comportement multiaxial du béton avec description du caractère unilatéral". Thèse de doctorat de l'université de Paris 6. (1990).
- [21] J.-M. Torrenti, O. Didry, J.-P. Ollivier, and F. Plas. "La dégradation des bétons". Hermès, Paris,(1999).
- [22] V. Picandet, A. Khelidj, and G. Bastian. "Effect of axial compressive damage on gas permeability of ordinary and high-performance concrete". Cem. Concr. Res. 31(11) :1525–1532, (2001).
- [23] G. Chanvillard, "Le matériau béton : connaissances générales", Aléas, 115-139. (1999).
- [24] Taylor M., Lydon F.D., Barr B.I.G."Toughness measurements on steel fibre-reinforced high strength concrete." Cement and Concrete Composites, vol 19, pp. 329-340. (1997).
- [25] Andra " Les matériaux cimentaires". Référentiel matériaux, tome 3, Rapport Andra.(2005).
- [26] Casanova P. " Bétons renforcés de fibres métalliques: du matériau à la structure". Rapport issu de la Thèse de Doctorat, Laboratoire National des Ponts et Chaussées, 203p. (1996).
- [27] Détermination de ferrailage complet d'une poutre en flexion simple (à l'état limite ultime), [www.almohandiss.com](http://www.almohandiss.com)
- [28] J.H. Bungey and S.G. Millard. " Testing of concrete in structures ". Blackie Academic & professional, Glasgow, (1996).
- [29] V. Baroghel-Bouny, et al. "Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons - Méthodes de mesures et d'essais de laboratoire". Méthodes d'essais. Techniques et Méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées. LCPC Paris, (2007).
- [30] Thomas Voigt, " The Application of an Ultrasonic Shear Wave Reflection Method for Nondestructive Testing of Cement-Based Materials at Early Ages : An Experimental and Numerical Analysis ". (2005).

# Identification de ciment, des granulats et formulation de béton

<b>3.1. Introduction</b>	<b>46</b>
<b>3.2. Identification du ciment d'Agadir</b>	<b>46</b>
<b>3.2.1. Identification physique</b>	<b>46</b>
3.2.1.1. Masse volumique absolue	46
3.2.1.2. Masse volumique apparente	46
3.2.1.3. Mesure de SSB par perméabilité de Blaine	47
<b>3.2.2. Identification chimique</b>	<b>47</b>
3.2.2.1. Composition chimique	47
3.2.2.2. Composition potentielle	48
3.2.2.3. Normes caractéristiques	48
<b>3.2.3. Identification mécanique</b>	<b>49</b>
3.2.3.1. Analyse granulométrique du ciment	49
3.2.3.2. Résistance mécanique : Compression et flexion	49
<b>3.3. Caractéristiques de sable extrait d'Oued Souss</b>	<b>50</b>
<b>3.3.1. Analyse granulométrique de sable extrait d'Oued Souss</b>	<b>50</b>
<b>3.3.2. Identification physico-chimique de Sable extrait d'Oued Souss</b>	<b>51</b>
3.3.2.1. Classe granulaire du sable : Granulométrie	51
3.3.2.2. Masse volumique absolue et apparentes	51
3.3.2.3. Teneur en eau de sable	52
3.3.2.4. Equivalent de sable	52
3.3.2.5. Spectroscopie de fluorescence de sable	53
<b>3.4. Formulation du béton</b>	<b>53</b>
<b>3.4.1. Analyse granulométriques des gravillons G<sub>1</sub> et G<sub>2</sub></b>	<b>53</b>
3.4.1.1. Classe granulaire des gravillons	54
3.4.1.2. Masse volumique absolue et apparente	54
3.4.1.3. Teneur en eau des gravillons	55
3.4.1.4. Propreté superficielle	55
<b>3.4.2. Tracé de la courbe granulaire de référence OAB</b>	<b>56</b>
3.4.2.1. Détermination de la compacité du béton	57
3.4.2.2. Volume absolu des granulats	58
3.4.2.3. Poids des granulats	58
<b>3.5. Mesure de la résistance par destruction d'échantillon</b>	<b>59</b>
<b>3.5.1. Résistance à la compression du béton</b>	<b>59</b>
<b>3.5.2. Résistance à la traction du béton</b>	<b>59</b>
<b>3.5.3. Préparation du mélange</b>	<b>60</b>
3.5.3.1. Confection des éprouvettes	60
3.5.3.2. Masse volumique des éprouvettes	60
3.5.3.3. Mesure de la résistance des éprouvettes	61
3.5.3.4. Estimation du module d'Young des bétons	63
3.5.3.5. Estimation du module de cisaillement du béton	64
<b>3.6. Conclusion</b>	<b>65</b>
<b>3.7. Références bibliographiques</b>	<b>66</b>

### 3.1. Introduction

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage. Ils sont d'origines diverses : naturelle, calcaire, voir artificielle ou provenant de sous produits industriels. Il est donc nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais et déterminer les différentes propriétés qui les caractérisent.

Dans ce chapitre, nous présentons les essais expérimentaux qui permettent de caractériser les matériaux cimentaires. Dans un premier temps, nous exposons l'identification physique et chimique du ciment produit par la cimenterie d'Agadir et du sable extrait d'Oued Souss, puis nous abordons la méthode de *Dreux Gorisse* [1] pour étudier la formulation du béton. Les essais relatifs à l'identification du ciment sont réalisés au service de laboratoire de la Cimenterie Agadir, et ceux concernant l'identification de sable et granulats sont effectués au laboratoire d'Expertises, d'Études et d'Essais (LEEE) d'Agadir.

### 3.2. Identification du ciment d'Agadir

#### 3.2.1. Identification physique

##### 3.2.1.1. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse d'un mètre cube  $m^3$  de ce matériau sans aucun vide entre les grains. Expérimentalement, nous déterminons la masse volumique absolue  $\rho_{abs}$  comme suit : une éprouvette est remplie avec l'eau d'un volume connu  $V_1$ , un échantillon de ciment sec pesé préalablement soit  $m$  sa masse puis introduit dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer les bulles d'air, on repérera ainsi la nouvelle valeur du volume  $V_2$ . Par conséquent la valeur de la masse volumique est déterminée par la relation suivante  $\rho_{abs} = m / (V_2 - V_1)$ .

##### 3.2.1.2. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté. Il faut donc faire la différence entre la masse volumique apparente à l'état compacté ou la masse volumique apparente à l'état non compacté. Expérimentalement la masse volumique apparente  $\rho_{app}$  est déterminée en remplissant un récipient de volume connu  $V$  par le ciment jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un icône. Par suite la masse est déterminée soit  $m$ , d'où la masse

volumique apparente est donnée par  $\rho_{app} = m/V$ . Les valeurs des masses volumiques absolue  $\rho_{abs}$  et apparente  $\rho_{app}$  du ciment CPJ 45 produit par l'usine d'Agadir sont données dans le tableau 3.1.

<i>Masse volumique absolue</i> $\rho_{abs} (Kg/m^3)$	<i>Masse volumique apparente</i> $\rho_{app} (Kg/m^3)$
3100	965

**Tableau 3. 1. Masse volumique absolue et apparente du ciment CPJ 45.**

### 3.2.1.3. Mesure de SSB par perméabilité de Blaine

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de Blaine de ciment est appelé *Perméabilimètre de Blaine*. Le principe de mesure de la Surface Spécifique Blaine SSB consiste à mettre un échantillon de ciment dans une cellule, puis mesurer le temps de passage T (en minutes) d'un volume d'air connu V sous une pression moyenne déterminée à travers une pastille de poudre de volume et porosité définis. La valeur de SSB exprimée en  $cm^2/g$  est déterminée par la relation (3.1.), avec F est un Facteur de conversion.

$$SSB = V \times F \times T \quad (cm^2/g) \quad (3.1)$$

La surface spécifique Blaine du ciment CPJ 45 égale à  $4092 \text{ cm}^2/g$ . Selon la norme de caractérisation des ciments, cette valeur permet de prédire une meilleure résistance précoce des matériaux cimentaires. On rappelle que plus la finesse de mouture est grande plus la vitesse de réaction d'hydratation est élevée et les résistances mécaniques au jeune âge sont grandes. Par contre, plus le ciment est sensible, plus les retraits sont importants. En outre, la finesse de Blaine influence sur la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais.

### 3.2.2. Identification chimique

#### 3.2.2.1. Composition chimique

La composition chimique garantit les qualités du ciment en terme de normalisation depuis sa fabrication jusqu'à sa commercialisation. Des analyses sont effectuées sur des échantillons prélevés régulièrement tout au long du processus de la fabrication. Les matières premières et les combustibles sont analysées afin de connaître leur teneur en différents composés chimiques, et de pouvoir ainsi les doser. L'analyse chimique est déterminée par des méthodes chimiques et physiques. Dans le tableau 3.2 nous présentons la composition chimique du ciment CPJ 45 réalisé par notre collègue Gourri [2].

	Composition minéralogique en %												
	insoluble	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	PAF*	Total %
Clincker	0.1	21.6	5.75	3.65	64.4	2	0.9	0.78	0.06	0.17	-	0.3	99.7
Ciment	11.8	16.7	5.48	2.8	51.8	3.1	2.7	0.8	0.01	0.28	0.02	4.7	99.8
Cru	0.1	21.2	5.79	3.65	65	1.8	1.1	0.88	0	0.24	-	0.1	99.8
Argile	-	27.8	9.55	3.63	27.7	2.3	0.4	0.35	0.13	0.1	-	26	98.4
calcaire	-	6.91	0.86	0.39	50.4	0.6	0.1	0.46	0.07	0.11	-	26.5	86

**Tableau 3. 2. Composition chimique des produits initiaux du ciment CPJ 45.**

\*PAF = perte au feu La perte au feu c'est la perte de masse d'une quantité du ciment porté à une température de 1000°C.

### 3.2.2.2. Composition potentielle

La composition potentielle du ciment est déterminée par des calculs à partir de l'analyse chimique en utilisant la méthode de Bogue. La composition potentielle de phase est calculée par les équations de Bouge, dans lesquelles les formules chimiques représentent le pourcentage en masse de chaque oxyde. Dans le tableau 3.3 nous montrons la composition potentielle de chaque phase des constituants du ciment CPJ 45.

Phases	Formule chimique	Valeur obtenue
C <sub>3</sub> A	$C_3A = 2,65Al_2O_3 - 1,69Fe_2O_3$	9,07
C <sub>3</sub> S	$C_3S = 4,07CaO - 7,6SiO_2 - 1,43Fe_2O_3 - 6,72Al_2O_3$	50
C <sub>2</sub> S	$C_2S = 88,66SiO_2 + 1,08Fe_2O_3 + 5,07Al_2O_3 - 3,07CaO$	24,38
C <sub>4</sub> AF	$C_4AF = 3,04Fe_2O_3$	11,1

**Tableau 3. 3. Composition potentielle de phase du ciment CPJ 45**

### 3.2.2.3. Normes caractéristiques

Selon ISO (International Standard Organization), une norme est une spécification technique ou autre document accessible au public, établi avec la coopération et l'autorisation générale de toutes les parties intéressées, fondé sur les résultats conjugués de la science, de la technologie ou de l'expérience. Dans ce cadre les ciments produits par les usines du royaume, et qui sont utilisés pour la fabrication des matériaux cimentaires, doivent être conformes à la Norme Marocaine NM 10.1.004. Dans le tableau 3.4 nous présentons les valeurs des modules caractérisant le ciment CPJ 45 produit par la cimenterie d'Agadir.

Nom du module	Expression	Valeur expérimentale	Valeur typique [3]
Hydraulique	$MH = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$	2.07	1.7-2.3
Aluminoferrique	$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$	1.51	0.73-2.6
Silicique	$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$	2.01	1.9-3.2
Standard de chaux	$K_{uhl} = \frac{100CaO}{2.8SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}$	94.85	85.5-100

**Tableau 3. 4. Normes caractéristiques du ciment CPJ 45.**

### 3.2.3. Identification mécanique

#### 3.2.3.1. Analyse granulométrique du ciment

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer, à l'aide de tamis, ces grains selon leur diamètre. Les grains, ainsi isolés, peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. Le refus désigne la partie des grains retenue dans un tamis, et le refus cumulé représente tous les grains bloqués jusqu'au tamis considéré. Le tamisât ou passant désigne la partie qui traverse le tamis. L'analyse granulométrique du ciment CPJ 45 est réalisée sur un tamiseur à dépression d'air, le tamisage est fait sur un essai de  $(25g \pm 0.1g)$ . Les tamis considérés sont les tamis de diamètres 40, 80 et  $160\mu m$ . Dans le tableau 3.5, nous exposons les résultats obtenus. Pour chaque tamis la valeur de refus est calculée par la relation (3.2) avec  $m_1$  est la masse d'essai 25g et  $m_2$  est la masse des refus en g.

$$R = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad (3.2)$$

Diamètre en $\mu m$	40	80	160
% des refus	26	3.8	2
% des tamisâtes	74	96.2	98

**Tableau 3. 5. Analyse granulométrique du ciment CPJ 45.**

#### 3.2.3.2. Résistance mécanique : Compression et flexion

Les résistances mécaniques, en flexion et en compression, des éprouvettes du ciment de dimension  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  sont déterminées par les essais sur mortier dit "Normal" à 28 jours d'âge. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment, elle dépend de la classe du ciment et elle est exprimée en MPa [4]. Les essais de résistance mécanique ont été réalisés sur une presse de type *Perrier* sur la base de la Norme Marocaine NM 10.1.005.

Dans le tableau 3.6 nous présentons les résultats de la résistance à la compression et à la flexion obtenus après 2, 7 et 28 jours. Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales.

Résistance à la	2 jours	7 jours	28 jours
Compression (MPa)	17.1	29.9	46.1
Flexion (MPa)	4.1	5.8	7.7

**Tableau 3. 6. Résistance à la compression et flexion de ciment CPJ 45**

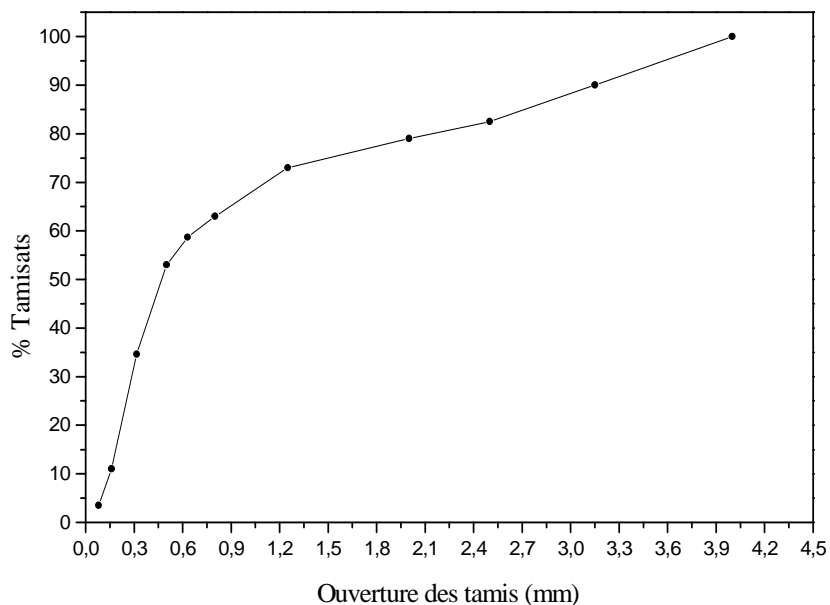
### 3.3. Caractéristiques de sable extrait d'Oued Souss

#### 3.3.1. Analyse granulométrique de sable extrait d'Oued Souss

Le principe consiste à classer les différents grains de sable, en utilisant une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le sable étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. Dans le tableau 3.7 nous présentons les pourcentages des refus et tamisats obtenus par l'analyse granulométrique du sable, et dans la figure 3.1 nous montrons la courbe granulométrique.

Ouverture (mm)	0.08	0.16	0.315	0.5	0.63	0.8	1.25	2	2.5	3.15	4
% Refus	96,5	89	65,4	47	41,3	37	27	21	17,5	10	0
%Tamisats	3,5	11	34,6	53	58,7	63	73	79	82,5	90	100

**Tableau 3. 7. Analyse granulométrique du sable.**



**Figure 3. 1. Courbe d'analyse granulométrique du Sable Oued Souss**

### 3.3.2. Identification physico-chimique de Sable extrait d'Oued Souss

#### 3.3.2.1. Classe granulaire du sable : Granulométrie

La granulométrie s'intéresse à la détermination de la dimension des grains. On désigne les granulats par dimension au moyen de tamis (mailles carrées), et la classe des granulats est définie par un ou deux chiffres. Si un seul chiffre est donné c'est celui du diamètre maximum  $D$  exprimé en mm, si l'on donne deux chiffres, le premier désigne le diamètre minimum  $d$  des grains et le deuxième désigne le diamètre maximum  $D$ .

Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe  $d/D$  quand  $d$  est supérieur à 2mm. Et lorsque  $d$  est inférieur à 2 mm le granulat est désigné  $0/D$ . Il existe six classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes  $d$  et  $D$  des granulats [5]. Dans le tableau 3.8 nous rappelons les granulats les plus rencontrés et les intervalles de  $d$  et  $D$ .

Type des granulats	Intervalle de $d$	Intervalle de $D$
Fillers	--	$D < 2\text{mm}$ et au moins
Sablons	--	$D \leq 1\text{mm}$ , et moins
Sables	--	$1 < D \leq 6,3\text{mm}$
Graves	--	$D > 6,3\text{mm}$
Gravillons	$d \geq 1\text{mm}$	$D \leq 125\text{mm}$
ballasts	$d \geq 25\text{mm}$	$D \leq 50\text{mm}$

**Tableau 3. 8. Classe des granulats [5]**

À partir de la granulométrie du sable, on remarque que le diamètre minimum  $d$  des grains est inférieur à 2mm. En effet la classe granulaire de sable est désignée par  $0/D$ , d'où la classe granulaire du sable est indiquée par  $0/3,15$ .

#### 3.3.2.2. Masse volumique absolue et apparentes

La masse volumique d'un ensemble de grains est fortement influencée par la composition granulométrique, la forme des grains et la teneur en eau. Lorsque les grains sont petits la masse volumique apparente des sables ou des graviers peut varier entre 1400 à 1650kg/m<sup>3</sup>. Expérimentalement, les masses volumiques apparente et absolue de sable sont déterminées par la même méthode que celle décrite dans le cas du ciment. Les résultats de ces masses volumiques sont présentés dans le tableau 3.9.



	Masse volumique absolue $\rho_{\text{abs}} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	Masse volumique apparente $\rho_{\text{app}} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$
Sable 0/3,15	2630	1460

**Tableau 3. 9. Masse volumique absolue et apparente de sable.**

### 3.3.2.3. Teneur en eau de sable

La résistance mécanique des matériaux dépend de plusieurs facteurs, un des plus importants facteurs influençant la résistance est la teneur en eau. Il est remarqué que les matériaux absorbants de l'eau ont une résistance certainement diminuée, c'est pourquoi on doit déterminer la teneur en eau du sable. L'essai consiste à peser un échantillon, soit  $m$  sa masse, ensuite sécher sans lavage préalable, puis peser, soit  $m_s$  la nouvelle masse de l'échantillon sec. La teneur en eau est définie par la formule (3.3).

$$w = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.3)$$

Dans le tableau 3.10 ci-dessous, nous présentons la teneur en eau de sable extrait d'*Oued Souss*.

La masse $m$	La masse $m_s$	$w$
100g	96,8g	3.3%.

**Tableau 3. 10. Teneur en eau de sable**

### 3.3.2.4. Equivalent de sable

Les granulats employés pour les constructions doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des adhérences entre les granulats et la pâte. Dans le cas des sables, le degré de propreté est fourni par essai appelé "*Equivalent de sable piston PS*" qui consiste à séparer le sable des particules très fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage. L'équivalent du sable est déterminé par la relation (3.4);  $h_1$  est la hauteur correspondant au sable propre et aux éléments fins, et  $h_2$  est la hauteur correspondant au sable propre mesuré visuellement.

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (3.4)$$

On peut estimer qu'un  $ES_{\text{piston}} < 65$  correspond à un sable argileux présentant des risques de retrait ou gonflement, d'où il doit être rejeté. La valeur obtenue de l'équivalent du sable extrait d'*Oued Souss* est 73, ce qui convient parfaitement à la réalisation de béton et mortiers de bonne qualité.

### 3.3.2.5. Spectroscopie de fluorescence de sable

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse quantitative et qualitatives très répandue, elle permet d'identifier et déterminer la composition centésimale en éléments (Si, Al, Ca, Fe, etc.) constituant le sable. Dans le tableau 3.11 nous présentons la composition de différents éléments chimiques constituant le sable extrait d'Oued Souss [6].

	Éléments chimiques									
	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$SO_3$	$K_2O$	$Na_2O$	$P_2O_5$	PAF
Sable	64.24	1.14	-	4.87	-	-	-	-	-	1.13

**Tableau 3. 11. Composition minéralogique de sable [6]**

### 3.4. Formulation du béton

Le béton est l'un des matériaux les plus utilisés, on l'obtient en mélangeant le ciment, les granulats, de l'eau et éventuellement des adjuvants définis par des normes. Il permet de s'assurer que les bâtiments construits en béton seront garantis et qu'ils ne s'écrouleront pas, ou encore ils résisteront aux contraintes environnementales. Un certain nombre de méthodes sont utilisées pour représenter et qualifier le comportement et la formulation de la composition du béton, les plus utilisées d'entre eux étant la méthode *Dreux Gorisse* [1] qui est basée particulièrement sur l'analyse granulométrique du sable et des différents gravillons.

#### 3.4.1. Analyse granulométriques des gravillons $G_1$ et $G_2$

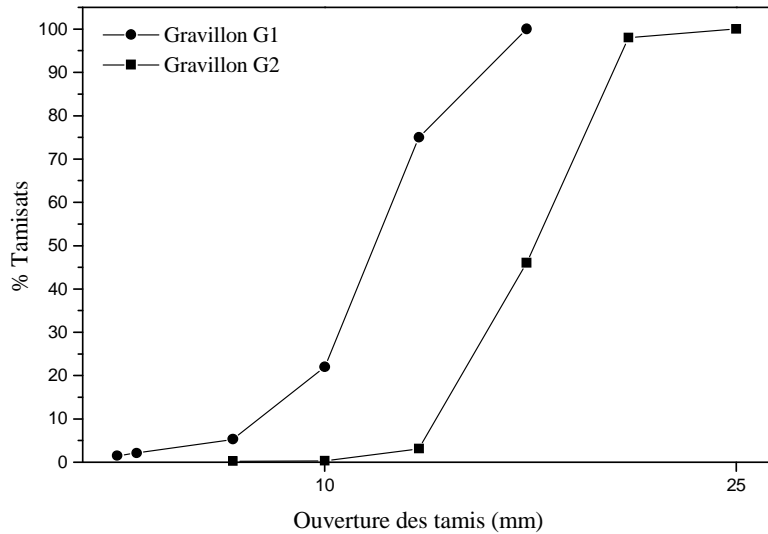
L'analyse granulométriques, des gravillons  $G_1$  et  $G_2$  extraient d'Oued Souss, est effectuée sur une série des tamis de différents diamètres. Ces analyses sont réalisées pour des prises d'essai de 2000 g pour chaque gravillon. Dans les tableaux 3.12 et 3.13, nous présentons respectivement les pourcentages des refus et tamisats obtenus pour les gravillons  $G_1$  et  $G_2$ .

Diamètres de tamis	6	6,3	8	10	12,5	16
% Tamisât	1,5	2,1	5,3	22	75	100
% Refus	98,5	97,9	94,7	78	15	0

**Tableau 3. 12. Analyse granulométrique du gravillon  $G_1$**

Diamètres de tamis	8	10	12,5	16	20	25
% Tamisât	0,25	0,3	3,1	46	98	100
% Refus	99,75	99,7	96,9	54	2	0

**Tableau 3. 13. Analyse granulométrique du gravillon  $G_2$**



**Figure 3. 2. Courbe granulométrique des gravillons  $G_1$  et  $G_2$**

Dans la figure 3.2, nous exhibons les courbes de l'analyse granulométriques de ces gravillons. Les pourcentages de tamisât cumulés sont représentés dans l'axe des ordonnées, et l'axe des abscisses représente les ouvertures des tamis en millimètre (mm). Nous remarquons que ces courbes sont continue et elles présentent une forme courante ce qui permet la mise en ouvre de ces gravillons.

#### 3.4.1.1. Classe granulaire des gravillons

La granularité désigne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. Les dimensions  $d$  et  $D$  sont respectivement la plus petite et la plus grande dimension du grain, d'où le granulat est caractérisé par sa classe  $d/D$ . D'après les spécifications géométriques des granulats d'Oued Souss. La dimension maximale des gravillons  $G_1$  est  $D_{max} = 16mm$  et des gravillons  $G_2$  est  $D_{max} = 20mm$ . La dimension minimum  $d$  est supérieure à 2mm. En effet, la classe granulaire des gravillons  $G_1$  et  $G_2$  est déterminée à partir de la courbe granulométrique. Dans le tableau 3.14, nous exposons les valeurs de la classe granulaire des gravillons  $G_1$  et  $G_2$ .

	Gravillon $G_1$	Gravillon $G_2$
La calasse granulaire	8/16	12,5/20

**Tableau 3. 14. Classe granulaires des gravillons  $G_1$  et  $G_2$**

#### 3.4.1.2. Masse volumique absolue et apparente

La plupart des études et des réglementations, selon les normes de spécifications des granulats, caractérisent le comportement mécanique des granulats à partir de leurs masses volumiques. Pour estimer l'influence des granulats sur les performances des bétons, différentes masse volumique

peuvent être définis, on parlera de la masse volumique absolue et apparente. Dans le tableau 3.15 nous montrons les masses volumiques absolues et apparentes obtenus pour les deux gravillons.

	Gravillons $G_1$ (8/16)	Gravillons $G_2$ (12,5/20)
$\rho_{\text{abs}}$ (Kg / m <sup>3</sup> )	2 652	2672
$\rho_{\text{app}}$ (Kg / m <sup>3</sup> )	1530	1538

**Tableau 3. 15. Masse volumique absolue et apparente des gravillons  $G_1$  et  $G_2$**

#### 3.4.1.3. Teneur en eau des gravillons

La connaissance du pourcentage de la teneur en eau des gravillons permet d'ajuster la quantité d'eau de gâchage entrant dans la formulation du béton, la teneur en eau est déterminée par la relation (3.3). Le tableau 3.16 représente les valeurs de la teneur en eau des gravillons  $G_1$  et  $G_2$  entrant dans la composition du béton.

La masse $m=2000g$	Gravillon $G_1$ (8/16)		Gravillon $G_2$ (12,5/20)	
	La masse $m_s$ (g)	w %	La masse $m_s$ (g)	w %
	1937,80	3,21	1955,80	2,26

**Tableau 3. 16. Teneur en eau de gravillons  $G_1$  et  $G_2$**

#### 3.4.1.4. Propreté superficielle

Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des adhérences entre les granulats et la pâte. La propreté consiste à dessécher une prise d'essai non lavée, puis la peser soit  $m_1$  sa masse, cette prise d'essai est lavée à une grande quantité d'eau jusqu'à ce que les impuretés soient éliminées et la prise soit claire. On dessèche à nouveau et on détermine sa masse, soit  $m_2$ . Les valeurs de la propreté superficielle (pourcentage des impuretés) des deux gravillons sont déterminées par la relation (3.5). Dans le tableau 3.17 nous représentons les résultats de la propreté superficielle des gravillons  $G_1$  et  $G_2$ , à partir de ces résultats nous remarquons que ces gravillons ne contiennent que peu d'impuretés.

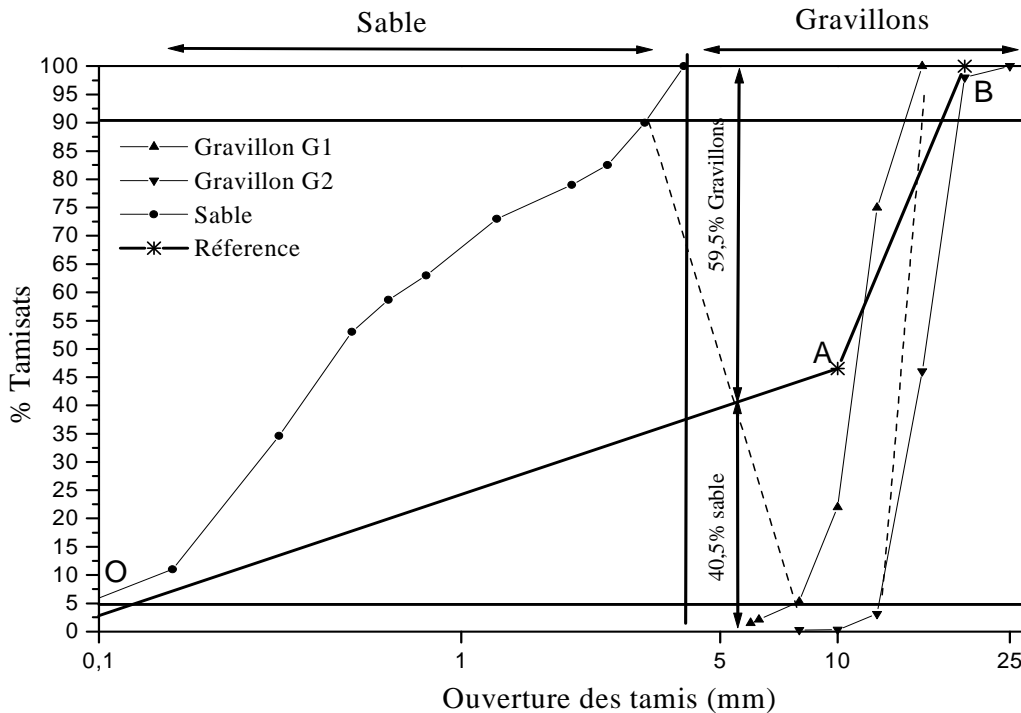
$$PS = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (3.5)$$

	Gravillon $G_1$	Gravillon $G_2$
Masse $m_1$ (g)	1750	1750
Masse $m_2$ (g)	1740	1742
PS (%)	0,574	0,46

**Tableau 3. 17. Propreté superficielle de  $G_1$  et  $G_2$**

### 3.4.2. Tracé de la courbe granulaire de référence OAB

Après le tamisage des granulats, on trace sur la même représentation graphique les courbes granulométriques de différents granulats. Ensuite, on trace la courbe granulaire de référence OAB : le point O étant l'origine et le point A dit le point de brisure à les coordonnées ainsi définies en abscisse à partir de  $D_{\max}$ . Le point A de la courbe granulaire de référence est à l'abscisse  $X_A = \frac{D_{\max}}{2} = 10\text{mm}$  et son ordonnée  $Y_A$  est donnée par la formule  $Y_A = 50 - \sqrt{D_{\max}} + K$ . Soit donc  $Y_A = 46,53\%$  avec K un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage et de la forme des granulats roulés ou concassés. La valeur de K est égal à 1 selon *Deux et Festa* [1]. Le deuxième point B de la courbe de référence à pour coordonnées ( $X_B = D_{\max} = 20\text{mm}, Y_B = 100\%$ ). Dans la figure 3.3 nous présentons les différentes courbes granulométriques des gravillons, sable et de référence (OAB).



**Figure 3. 3. Courbes granulométriques des gravillons, sable et de référence (OAB)**

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide, il est nécessaire de tracer comme indiqué sur la figure 3.3 les droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des gravillons constituant le mélange. Ces droites de partage sont tracées en joignant le point 95% de la courbe granulaire du premier granulat au point 5% de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite. L'intersection des droites avec la droite brisée de *Dreux* permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages

en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux. On lira sur la courbe de référence au point de croisement avec les droites de partage le pourcentage en volume absolu des granulats sable et gravillon  $G_1$  et  $G_2$ . Le tableau 3.18 montre les pourcentages de ces intersections.

	sable	Gravillon $G_1$	Gravillon $G_2$
Volume absolu en %	40,5	38	21.5

**Tableau 3. 18. Volume absolu des granulats en %**

#### 3.4.2.1. Détermination de la compacité du béton

Pour déterminer les masses des granulats entrantes dans la composition du béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu du solide contenu dans un mètre cube  $m^3$  de béton (volumes absolus de ciment, de sable, et des gravillons). Sachant que la dimension maximale des granulats est  $D_{\max}=20\text{mm}$ , et la consistance du béton désiré est plastique et la vibration est normale et en tenant compte des corrections sur le sable étant roulé et les gravillons sont concassés, la valeur correcteurs suivante (-0,01) est ajouté au coefficient de la compacité  $\gamma$  [1]. Ainsi la valeur du coefficient de compacité est  $\gamma = 0,825 - 0,01 = 0,815$ .

La valeur de la compacité  $\gamma$  du béton permet de déterminer le volume total absolu  $V_{\text{Total}}$  de granulats intervenant dans la formulation du béton:  $V_{\text{Total}} = 1000 \times \gamma - V_{\text{cim}}$ ,  $V_{\text{cim}}$  est le volume absolu des grains de ciment qui est exprimé par la formule de la relation (3.6). La masse volumique absolue du ciment égale a  $3100\text{Kg} / m^3$ .

$$V_{\text{cim}} = \frac{\text{dosage en Ciment}}{\text{Masse spécifique du ciment}} = \frac{C}{3100} \quad (3.6) .$$

Puisque le type du béton désiré est le béton  $B_2$ , c'est-à-dire un béton plastique dont la vibration est normale, donc la valeur de l'affaissement  $A$  égale à  $A = 6$ . Ce type de béton est caractérisé aussi par le dosage en ciment d'ordre  $C = 350\text{Kg} / m^3$  pour un mètre cube. La figure 3.4 représente l'approximation de dosage en ciment en fonction du rapport  $C/E$  et l'ouvrabilité désirée [1]. Par conséquent, le volume absolu du ciment est  $V_{\text{cim}} = 112,9 \text{ l/m}^3$  pour un mètre cube, d'où le volume totale des granulats est  $V_{\text{Total}} = 702,1 \text{ l/m}^3$ . Le dosage en eau est un facteur de l'ouvrabilité, on déduit alors sa valeur par le rapport  $C/E = 1,78$ . Ainsi, le dosage en eau total est égal à  $E = C/1,78 = 196\text{Kg} / m^3$  soit un volume d'eau égale à  $196 \text{ l/m}^3$ .

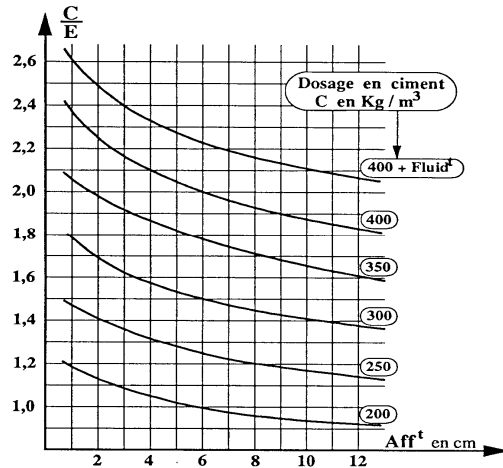


Figure 3. 4. Dosage en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité [1]

### 3.4.2.2. Volume absolu des granulats

Le dosage en volume absolu des granulats (sable, gravillons  $G_1$  et  $G_2$ ) est donné par la relation suivante  $V_{granulat} = \varepsilon \times V_{Total}$ ,  $\varepsilon$  est le pourcentage en volume absolu et  $V_{Total}$  est le volume absolu de l'ensemble des granulats. Dans le tableau 3.19, nous montrons les valeurs des volumes absolus des granulats.

	Sable	Gravillon $G_1$	Gravillon $G_2$
$\varepsilon$	0,405	0,38	0,215
Volume absolu (l) $V_{granulat}$	284,35	266,80	150,95

Tableau 3. 19. Volumes absolus des granulats en litre (l)

### 3.4.2.3. Poids des granulats

Le dosage en poids du granulat est déterminé par la relation suivante :  $P_{granulat} = V_{granulat} \times \rho_{abs}$ ,  $V_{granulat}$  est le volume absolu du granulat en litre (l) et  $\rho_{abs}$  est la masse volumique absolue ( $Kg/m^3$ ). Le tableau 3.20 représente les valeurs des poids des granulats nécessaire pour la formulation d'un mètre cube du béton, et les tableaux 3.21 et 3.22 représentent respectivement le volume apparent approprié et la composition nécessaire pour la formulation d'un mètre cube du béton.

	Sable	Gravillon $G_1$	Gravillon $G_2$
Masse volumique absolue ( $Kg/m^3$ )	2630	2 652	2672
Volume ( $m^3$ )	0,28435	0,2668	0,15095
Poids (Kg)	747,84	707,55	403,34

Tableau 3. 20. Poids des granulats en Kg, pour préparer un mètre cube du béton,

	Ciment	Sable	Gravillon $G_1$	Gravillon $G_2$
Poids (Kg)	350	747,84	707,55	403,34

<i>Masse volumique apparente</i> ( Kg/m <sup>3</sup> )	965	1460	1530	1538
<i>Volume apparent (l)</i>	362	512,2	462,45	262,25

**Tableau 3. 21. Volume apparent des granulats pour m<sup>3</sup> du béton,**

	<i>Ciment</i>	<i>Eau</i>	<i>Sable</i>	<i>Gravillon G<sub>1</sub></i>	<i>Gravillon G<sub>2</sub></i>
<i>Poids (Kg)</i>	350	196	747,84	707,55	403,34
<i>Volume apparent (l)</i>	362	196	512,2	462,45	262,25

**Tableau 3. 22. Composition d'un mètre cube m<sup>3</sup> du béton,**

### 3.5. Mesure de la résistance par destruction d'échantillon

La méthode de la destruction d'échantillon est la plus utilisée dans les laboratoires publics qui contrôlent la qualité des matériaux utilisés dans les constructions. Elle est utilisée principalement pour déterminer la résistance à la compression du béton, mortier, etc. Pour mesurer cette résistance, on prépare d'abord des éprouvettes cylindriques en béton. Ensuite ces éprouvettes sont soumises à une charge croissante par une machine jusqu'à la rupture. Enfin La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture (F) et la section transversale de l'éprouvette (S).

#### 3.5.1. Résistance à la compression du béton

Le béton est caractérisé par une bonne résistance à la compression  $f_c$  et une résistance faible en traction  $f_t$ . Expérimentalement la résistance à la compression se mesure le plus souvent sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 16cm et de hauteur 32cm. Le schéma de la figue 3.5 montre l'essai de la compression. Dans les cas courants, un béton est défini par une valeur de sa résistance à la compression, à l'âge de 28 jours, dite "*Valeur Caractéristique Requise*". Cette résistance se mesure par des essais de compression simple sur éprouvettes cylindriques, elle est notée  $f_{c28}$  et s'exprime en MPa.


**Figure 3. 5. Essais de compression sur éprouvettes 16x32**

#### 3.5.2. Résistance à la traction du béton

La résistance à la traction  $f_m$  à n jours est conventionnellement définie à partir de la résistance à la compression par la relation (3.7) [7].  $f_m = 0,6 + 0,06 \times f_{cn}$  (3.7)



### 3.5.3. Préparation du mélange

Les granulats qui constituent la composition du béton sont pesés sur la même balance, par suite le mélange (agrégat, ciment et l'eau) est préparé puis malaxé mécaniquement dans un malaxeur approprié. La vitesse de rotation du malaxeur est fixée pour éviter les risques de rupture et le temps de malaxeur est contrôlé, afin de garantir une bonne homogénéité du mélange.

#### 3.5.3.1. Confection des éprouvettes

Les éprouvettes sont confectionnées suivant les règles décrites dans la norme NF P18-422. La mise en place du béton est effectuée en deux couches, chaque couche subit une vibration normale par aiguille afin de compacter le béton, et la dernière couche est remplie à égal bord pour que les éprouvettes soient bien planées à la fin.

Avant d'aborder l'essai et assurer une bonne planéité des éprouvettes, ces dernières sont surfacées à l'aide d'un matériau à base de soufre de haute performance. Le surfacage a pour but d'obtenir une planéité parfaite des faces de chargement, ainsi que l'orthogonalité de celle-ci par rapport aux génératrices du cylindre. Pour se faire, un mélange est préparé à partir de 60% massique de fleur de soufre et 40% de sable fin [1]. Le mélange préparé est chauffé. Après avoir huilé le fond de l'appareil, une louche du mélange est versée dans la coupelle, la face de l'éprouvette est déposée sur le mélange tout en prenant soin pour qu'elle soit verticale. Cette position est maintenue jusqu'au durcissement du mélange. L'opération est faite aussi pour la deuxième face. La machine à presse utilisée dispose d'une force appropriée sa vitesse de chargement est 0,5MPa/sec, et la résistance correspondante  $f_c$  en MPa est donnée par la relation  $f_c = P/S$ , P est la charge maximale en KN et S est la section de l'éprouvette en  $cm^2$ .

#### 3.5.3.2. Masse volumique des éprouvettes

La masse volumique des éprouvettes durcies est mesurée après quatre semaines (28 jours) de conservation des éprouvettes. On mesure leur masse  $M_{ep}$  à l'aide d'une balance, le volume de l'éprouvette  $V_{ep}$  est mesuré par immersion d'éprouvette dans une cuve graduée et remplie d'eau, ainsi la variation du volume de l'eau est le volume de l'éprouvette. La masse volumique est le rapport de la masse et le volume occupé  $\rho_{ep} = M_{ep}/V_{ep}$  exprimé en  $Kg / m^3$ . Le tableau 3.23 montre les résultats des essais réalisés.

	La masse volumique des éprouvettes durcies à 28 jours			
	1er essai	2ème essai	3ème essai	Moyenne
La masse (Kg)	16,20	17,30	16,90	2685,9 Kg/m <sup>3</sup>
Le volume ( 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> )	6,150	6,430	6,320	
La masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	26341	2690,5	2674	

**Tableau 3. 23. Masse volumique des éprouvettes**

### 3.5.3.3. Mesure de la résistance des éprouvettes

Après avoir préparé le mélange de différents granulats les éprouvettes ont été confectionnées et après 24 heures ont été décoffrées dans leurs moules, puis garder dans une température maintenue à 25°C±1. Trois éprouvettes ont été réalisées par série pour chaque temps de conservation (2, 7 et 28 jours), soit au totale 9 éprouvettes, cela nous permet d'obtenir une moyenne acceptable. L'essai mécanique consiste à placer ces éprouvettes sur une presse pour déterminer la résistance à la compression exprimée en MPa. Le tableau 3.24 présente les résultats obtenus de la résistance à la compression et la résistance à la traction déterminée par la formule (3.7) proposé par *H.Renaud* [7].

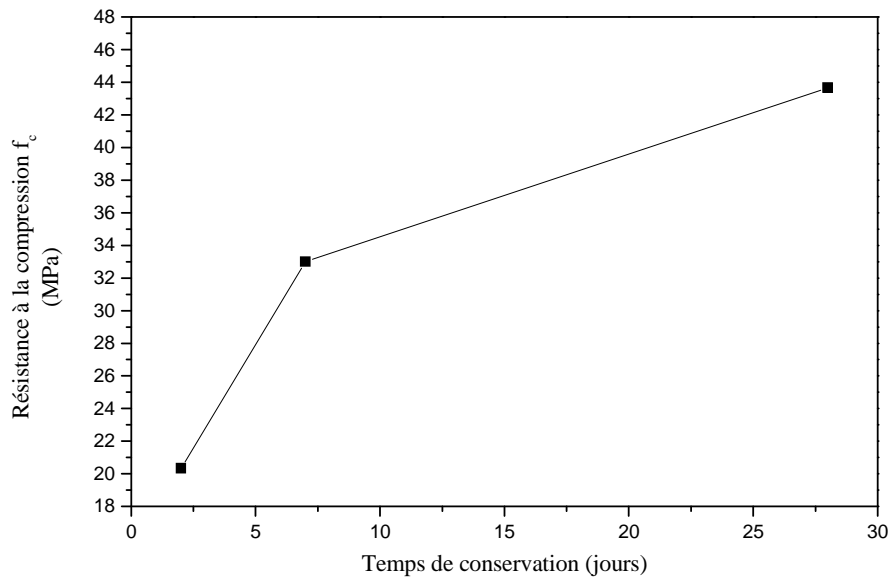
		2 jours	7 jours	28 jours
La résistance à la compression (MPa)	1er essai	20	32	44
	2ème essai	21	33	43
	3ème essai	20	34	44
	Moyenne	20,33	33	43,67
La résistance à la traction (MPa)	1er essai	1,8	2,52	3,24
	2ème essai	1,86	2,58	3,18
	3ème essai	1,8	2,64	3,24
	Moyenne	1,82	2,58	3,22

**Tableau 3. 24. Les résistances à la compression et à la traction.**

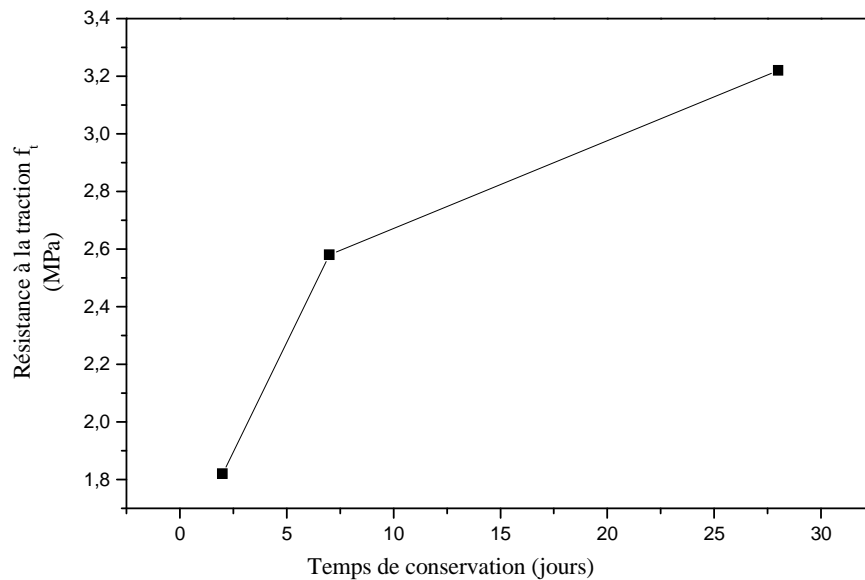
Les figures 3.5 et 3.6 représentent respectivement l'évolution de la résistance à la compression et la résistance à la traction en fonction du temps de conservation des éprouvettes. Ces figures présentent une augmentation linéaire des résistances des bétons réalisés par les gravillons G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> et sable extrait d'*Oued Souss*. La résistance à la traction traduit, la résistance à la fissuration du béton, il est égal environ à 7,8% en moyenne à la résistance à la compression. Les valeurs de résistances obtenues appartiennent à la plage de la variation des propriétés mécaniques des bétons d'après *Dreux et Festa* [1], (tableau 3.25). On résulte les volumes absolus des gravillons G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>, sable, ciment et eau sont appropriées pour obtenir un béton de bonne qualité et de bonne durabilité.

$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$E$ (GPa)	$\nu$	$\rho$ (Kg / m <sup>3</sup> )
12-60	1-5	20-40	0,15- 0,30	2200-2400

**Tableau 3. 25. Propriétés mécaniques des bétons, d'après Dreux et Festa [1].**



**Figure 3. 5. Évolution de  $f_c$  en fonction du temps de conservation**



**Figure 3. 6. Évolution de  $f_t$  en fonction du temps de conservation**

### 3.5.3.4. Estimation du module d'Young des bétons

Les normes proposent différentes relations empiriques pour évaluer les modules élastiques des bétons en fonction de leur masse volumique et de leur résistance à la compression. Plusieurs formules empiriques évaluent le module d'Young du béton en fonction de la résistance à la compression et la masse volumique absolue. Parmi elles le rapport technique de l'ACI [8], qui propose l'équation (3.8). Cette équation est valable pour des valeurs de la résistance à la compression comprises entre 20 et 35MPa.

$$E_c = 0,043 \times (\rho_{abs})^{3/2} \times (f_c)^{1/2} \quad (3.8)$$

Zhang et Gjorv [9] ont cité deux relations la première  $E_c = 9500 \times (f_c)^{1/3} \times (\frac{\rho_{abs}}{2400})^{3/2}$  est valable avec des résistances supérieures à 85MPa, la deuxième relation est exprimée par l'équation (3.9) et elle était déduite à partir des travaux de Slate et al. [10], cette relation est valable pour des valeurs de la résistance comprises entre 21 et 65MPa.

$$E_c = (3320 \times (f_c)^{1/2} + 6895) \times (\frac{\rho_{abs}}{2320})^{3/2} \quad (3.9)$$

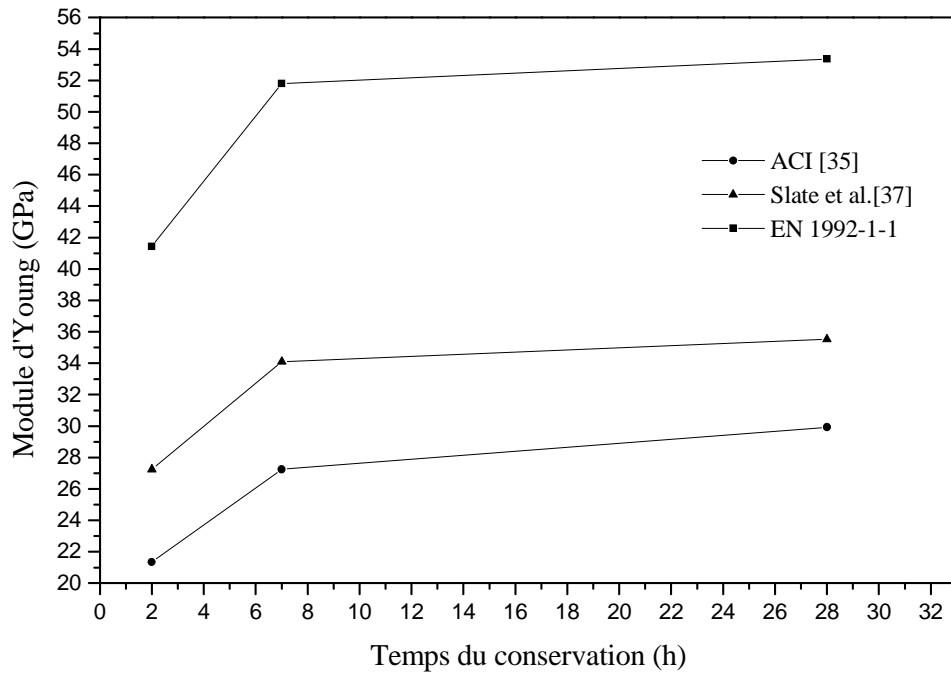
Également on trouve la relation proposée par l'Eurocode2 (Norme européenne EN1992-1-1), qui est exprimée par la relation (3.10).

$$E_c = 22000 \times (\frac{f_c}{10})^{1/3} \times (\frac{\rho_{abs}}{2200})^2 \quad (3.10)$$

Dans le tableau 3.26 nous présentons les valeurs des modules d'Young suivant les formules empiriques décrites précédemment, et dans la figure 3.7 nous présentons l'évolution de ces modules en fonction du temps de conservation des éprouvettes.

		2jours	7jours	28 jours
$f_c$ moyenne (MPa)		20,33	33	43,67
Module d'Young (GPa) $E_c$	ACI [8]	21,34	27,24	29,93
	Slate et al.[10]	27,24	34,10	35,52
	EN 1992-1-1	41,44	51,79	53,36

**Tableau 3. 26. Modules d'Young ACI [8], Slate et al.[10] et EN 1992-1-1.**



**Figure 3. 7. Évolution de module d'Young en fonction du temps de conservation**

### 3.5.3.5. Estimation du module de cisaillement du béton

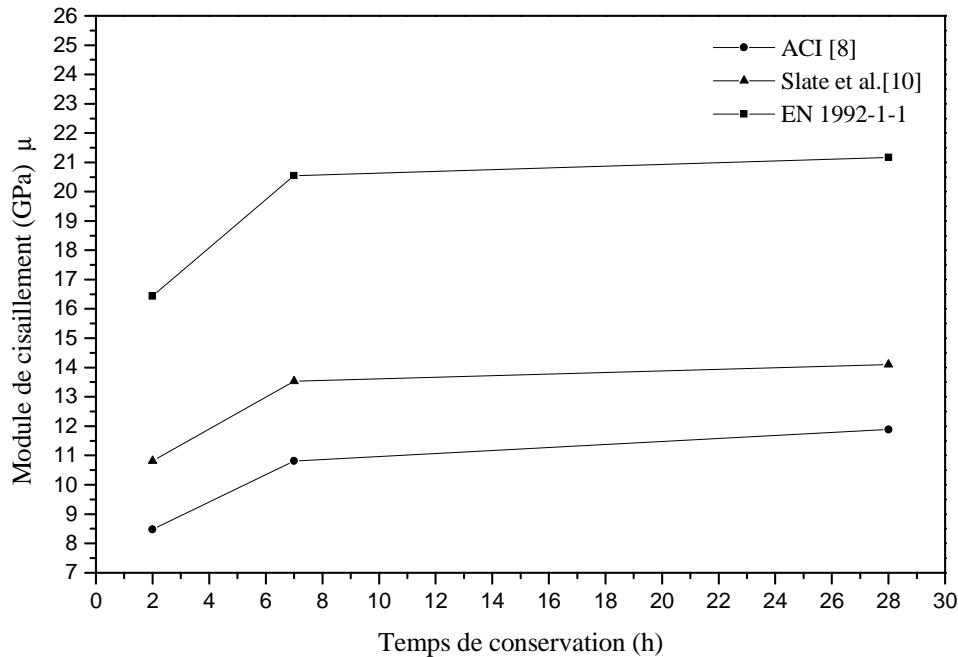
Le module de cisaillement  $\mu$  est couramment moins utilisé pour la caractérisation du béton, il est lié au module d'Young  $E$  et au coefficient du poisson  $\nu$  par la relation (3.11). Notons que l'influence de  $\nu$  est relativement faible. Pour les bétons de référence il est égal à 0,26 [7].

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.11)$$

Dans le tableau 3.27 nous donnons les valeurs du  $\mu$  obtenu à partir de module d'Young par les formule empiriques décrites précédemment, et dans la figure 3.8 nous présentons l'évolution de module de cisaillement en fonction du temps de conservation des éprouvettes.

		2jours	7jours	28 jours
Module de cisaillement (GPa) $\mu$	ACI [8]	8,47	10,81	11,88
	Slate et al.[10]	10,81	13,53	14,10
	EN 1992-1-1	16,44	20,55	21,17

**Tableau 3. 27. Module du cisaillement  $\mu$ .**



**Figure 3. 8. Évolution de module de cisaillement en fonction du temps de conservation**

### 3.6. Conclusion

L'étude expérimentale présentée dans ce chapitre consacrée à la détermination des propriétés physiques et la composition chimique du Ciment CPJ 45 produit par la cimenterie d'Agadir et sable extrait d'Oued Souss. Les gravillons G1 et G2 extrait d'Oued Souss sont identifiés en déterminant leurs analyse granulométriques, masse volumique teneur en eau, etc. Ces gravillons sont ensuite utilisés pour étudier la formulation du béton. L'identification physique, chimique et mécanique du ciment CPJ 45 conforme aux spécifications de la norme marocaine (NM 10.1.005).

La méthode de *DREUX-GORISSE* utilisée pour étudier la formulation du béton permet de déterminer les quantités optimales des granulats (eau, ciment, sable, gravillons) qui sont nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton en apportant des corrections nécessaires aux dosages du ciment, granulat et l'eau [1]. La résistance à la compression est déterminée à partir des éprouvettes cylindriques qui ont été confectionnées selon la norme (NF P 18-422). Suivant les conditions de stockage des éprouvettes (température maintenue à 25°C et pression 1atm). La résistance à la compression moyenne caractérisant les éprouvettes cylindriques est égale à celle spécifiée dans la Norme NF P 18-422.

### 3.7. Références bibliographiques

- [1] G. Dreux and J. Festa. *"Nouveau guide du béton et de ses constituants "*. Eyrolles, (1998)
- [2] E. Gourri, M. Ez-Zahery, N. Elalem," Study and Characterization of the Concrete and Influence of the Temperature on Its Compressive Strength" ISJAEE .pp 203-209, (2008).
- [3] J.Baron et R.Sauterey "Le béton hydraulique connaissance et pratique", presse de ENPC, paris, (1982).
- [4] Afnor, méthodes d'essais des ciments, paris 1 : "détermination des résistances mécaniques", NF EN 196.1, paris AFNOR, pp.1.25, (1995).
- [5] R.Dupain,R.Lanchon, J-C.Saint Arroman."Granulats, sol, ciment et bétons"p.3, casteilla, (2000).
- [6] A.Lahbib,"Caractérisation et étude du mélange de ciment avec différents types de sables". DESA, Agadir, (2002)
- [7] H.Renaud, "Dessin technique et lecture de plan : bâtiment, gros œuvre, Collection ": Foucher, (1995).
- [8] ACI 231R-03, Guide for structural lightweight-aggregate concrete, Reported by ACI Committee 213, American Concrete Institute, (2003).
- [9] Zhang .M..H et Gjrovi .O.E , "Mechanical properties of high-strength lightweight concrete", ACI Materials Journal,88,P240-247,(1991).
- [10] Slate .F.O, A.H. Nilson et S.Martinez,"Mechanical properties of high strength lightweight concrete" ACI Journal, Proceedings, 88,P606-613,(1986).

# *Partie II*

---

## *Résultats Expérimentaux*

---



---

## Caractérisation des mortiers par les ondes ultrasonores

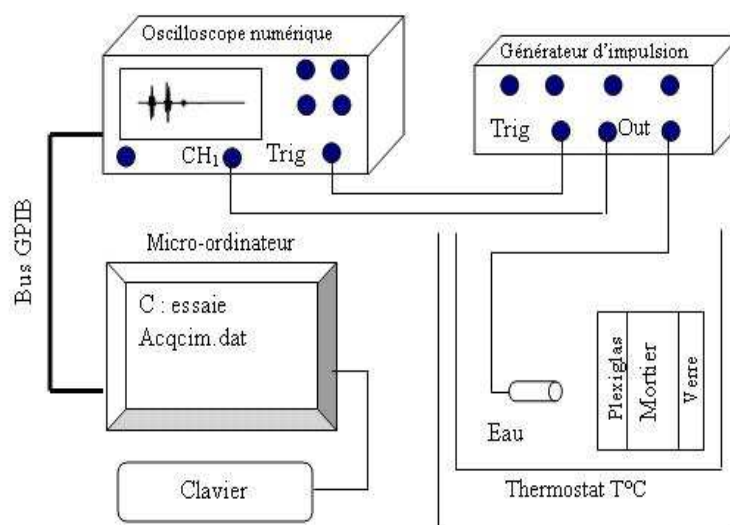
<b>4.1. Introduction.....</b>	<b>67</b>
<b>4.2. Présentation du montage de la technique expérimentale .....</b>	<b>67</b>
<b>4.3. Matériels et méthodologie .....</b>	<b>68</b>
4.3.1. Choix de récipients .....	68
4.3.2. Préparation des échantillons .....	68
4.3.3. Méthode de mesure expérimentale .....	69
4.3.3.1. Mesure de l'atténuation .....	70
4.3.3.2. Mesure de l'impédance acoustique.....	72
4.3.3.3. Mesure de la vitesse.....	72
4.3.3.4. Mesure du module de coefficient de réflexion R.....	73
<b>4.4. Effet de la microstructure du sable sur l'évolution des paramètres viscoélastiques .....</b>	<b>74</b>
4.4.1. Histogrammes temporels .....	74
4.4.2. Histogrammes fréquentiels.....	77
4.4.3. Amplitude crête à crête.....	80
4.4.4. Coefficient de réflexion R .....	82
4.4.5. Vitesse ultrasonore .....	84
4.4.6. Impédance acoustique.....	86
4.4.7. Atténuation ultrasonore.....	87
<b>4.5. Effet de la température sur l'évolution des paramètres viscoélastiques.....</b>	<b>88</b>
4.5.1. Vitesse ultrasonore .....	89
4.5.2. Impédance acoustique.....	90
4.5.3. Atténuation ultrasonore.....	91
<b>4.6. Conclusion.....</b>	<b>92</b>
<b>4.7. Références bibliographiques .....</b>	<b>92</b>

## 4.1. Introduction

Ce chapitre débute par la présentation de la méthode expérimentale utilisée pour suivre l'évolution de la prise et le durcissement de différents mortiers au cours de leur changement de phase. Nous commençons par décrire la méthode ultrasonore monostatique (*Méthode des échos*) choisie et le protocole expérimental, puis nous présentons les résultats expérimentaux de la rétrodiffusion des ondes ultrasonores par des récipients enfermant les mortiers. L'effet de la microstructure du sable et de la température sur l'évolution de différents paramètres viscoélastiques mesurés sera ainsi exposé.

## 4.2. Présentation du montage de la technique expérimentale

Dans ce montage, le transducteur utilisé fonctionne alternativement en émetteur et en récepteur. Le générateur d'impulsion excite électriquement le transducteur. Ce dernier excite, sous incidence normale, le récipient enfermant le mortier. Le signal rétrodiffusé est capté par le même transducteur. Le signal transite par le même câble que le signal d'émission et arrive sur le connecteur *T/R* depuis lequel le signal d'émission a été envoyé. Grâce à une porte et à un système à retard intégré au générateur d'impulsion, le signal reçu est visualisé en reliant par un câble coaxial le connecteur de signal de sortie à une voie d'un oscilloscope de contrôle synchronisé par le générateur de signaux carrés. Le signal rétrodiffusé est ainsi envoyé sur un oscilloscope numérique de type *LECROY 9310M-300 MHz* [1-3]. L'oscilloscope numérique est relié à un Micro-ordinateur par un câble GPIB en vue de traitement du signal non disponible sur l'oscilloscope. Dans la figure 4.1, nous schématisons le montage de la méthode expérimentale développée dans ce travail.



**Figure 4. 1. Montage monostatique**

### 4.3. Matériels et méthodologie

#### 4.3.1. Choix de récipients

Les récipients dans lesquels sont enfermés les mortiers sont des récipients à faces parallèles (parallélépipède). Le choix des matériaux (plaques) constituant les faces parallèles de ces récipients passe par l'étude de la diffusion ultrasonore des plaques de différentes épaisseurs de Plexiglas, acier, aluminium et le verre. L'étude expérimentale de ces plaques nous permet de vérifier que le Plexiglas transmet plus d'énergie ultrasonore et que son épaisseur doit être la plus grande possible pour éviter le chevauchement des échos. Ce résultat a été vérifié également par *ozturk et al.* [4]. Nous avons vérifié aussi que le verre est un bon réflecteur en plus de son faible coût. En effet, nous avons choisi des récipients de face avant en Plexiglas d'épaisseur 20mm, et la face arrière est en verre avec une épaisseur de 3mm, et l'épaisseur enfermant le mortier à étudier égale 15mm.

#### 4.3.2. Préparation des échantillons

Le mortier est un matériau obtenu en mélangeant des proportions convenables de ciment, d'eau et de sable. Le mortier est le liant qui assure l'intégrité d'un mur de maçonnerie, donc il doit résister, durer et garder le mur intact. L'étude de sa qualité résulte de connaître les caractéristiques de ses constituants qui sont décrites au chapitre 3. Le ciment utilisé pour la préparation des échantillons est le Ciment CPJ 45 produit par la cimenterie d'Agadir, le sable c'est celui extrait d'*oued Souss*. L'eau utilisée pour l'hydratation est l'eau potable de la ville d'Agadir.

Pour chaque taille des grains de sable suivantes (0,200 ; 0,250 ; 0,315 et 0,500 mm) est mélangée avec le ciment et l'eau pour des rapports massiques Ciment/Sable ( $m_c/m_s=0,5$ ) et Eau/Ciment ( $m_e/m_c=0,65$ ). Le mélange obtenu est introduit dans le récipient, ce dernier est émergé dans une cuve remplie d'eau et maintenue à une température d'évaluation. Le récipient est ensuite excité par le transducteur dont la fréquence centrale est 0,5MHz situé à 10cm du récipient. Le tableau 4.1 présente les caractéristiques de l'eau et les plaques constituant les faces de récipient, et la figure 4.2 montre le schéma de la géométrie du problème.

	Masse volumique (Kg / m <sup>3</sup> )	Vitesse longitudinale (m/s)	Impédance acoustique 10 <sup>6</sup> Kg/m <sup>2</sup> .s
Eau	1000	1480	1,48
Plexiglas	1200	2 680	3,216
Verre	3134	4250	13,317

**Tableau 4. 1. Caractéristiques de l'eau plexiglas et le verre.**

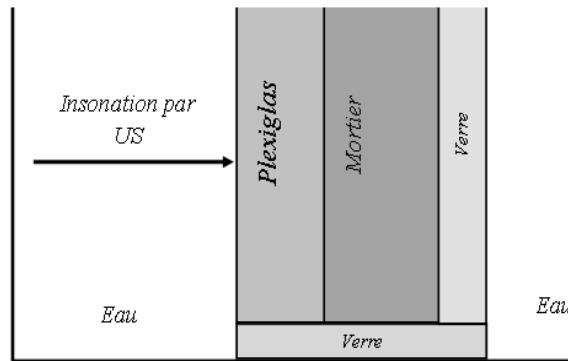


Figure 4. 2. Géométrie de problème

#### 4.3.3. Méthode de mesure expérimentale

La méthode mise en œuvre consiste à mesurer les paramètres viscoélastiques du mortier enfermé dans le récipient. Il s'agit de déterminer l'amplitude crête à crête, la vitesse, l'impédance acoustique et l'atténuation de l'onde ultrasonore dans les mortiers. Soit un mortier enfermé dans le récipient et immergé dans l'eau, le récipient ensuite est excité normalement à son plan par un transducteur de fréquence centrale 0,5 MHz. Le signal incident visualisé sur l'écran de l'oscilloscope suit le parcours représenté dans la figure 4.3. Dans la figure 4.4, nous présentons type des signaux obtenus. Nous remarquons que ces signaux sont composés principalement de trois échos :

- ⊖ L'écho  $A_1$  lié à la réflexion spéculaire du signal incident sur l'interface entre l'eau et la première face de la plaque en plexiglas.
- ⊖ L'écho  $A_2$  correspond à la réflexion sur l'interface entre la deuxième face de la plaque en plexiglas et le mortier enfermé.
- ⊖ L'écho  $A_3$  correspond à la réflexion sur l'interface entre le mortier et la première face de la plaque en verre.

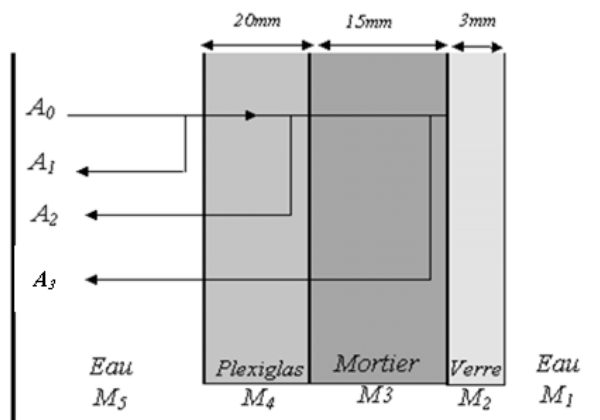
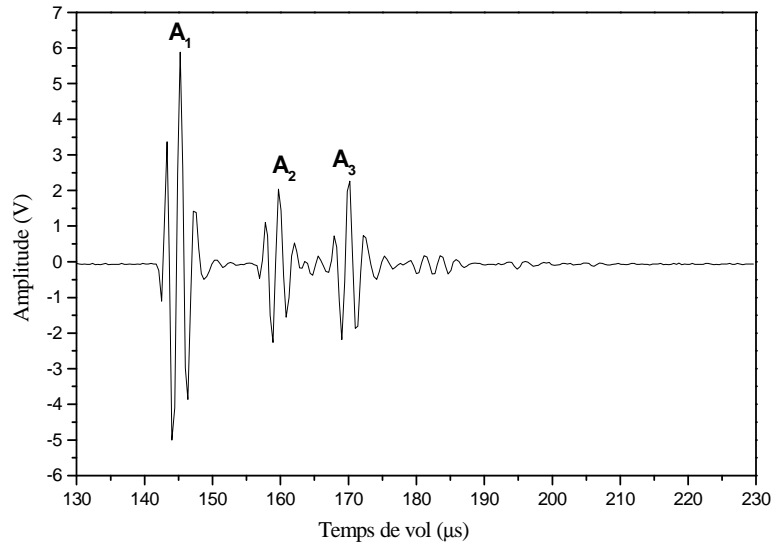


Figure 4. 3. Parcours des signaux rétrodiffusés par un récipient enfermant le mortier



**Figure 4. 4. Type du signal rétrodiffusé par le récipient enfermant le mortier, 0,5MHz**

#### 4.3.3.1. Mesure de l'atténuation

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 solution de l'équation de propagation d'une onde polychromatique de fréquence  $\nu$  qui se propage dans un milieu s'obtient par intégration sur tout le domaine de fréquence. À une fréquence donnée  $\nu$  la solution de l'équation de propagation est donnée par la formule (4.1),  $V$  est la vitesse de propagation,  $t$  est le temps de parcours,  $x$  est la distance parcourue,  $\alpha$  est l'atténuation et  $A_0$  est l'amplitude de l'onde incidente.

$$A_o(\nu) \exp(-\alpha(\nu)x) \exp(-j2\pi\nu(t - \frac{x}{V})) \quad (4.1)$$

Pour l'ensemble des fréquences on a :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} A_o(\nu) \exp(-\alpha(\nu)x) \exp(-j2\pi\nu(t - \frac{x}{V})) d\nu \quad (4.2)$$

Notons que la transformée de *Fourier* de cette réponse est :

$$A_o(\nu) \exp(-\alpha(\nu)x) \exp(-j \frac{2\pi\nu}{V}x) \quad (4.3)$$

On refait ce calcul pour chaque écho et à chaque interface du milieu. Prenons par exemple le cas de la réflexion sur la première interface, c'est à dire l'interface entre le milieu noté  $M_5$  et le milieu noté  $M_4$ , Le signal émis a pour amplitude  $A^*(\nu)$  à la fréquence  $\nu$ , et la solution de l'équation de propagation de l'onde dans le milieu  $M_5$  à pour expression :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} A^*(\nu) \exp(-j2\pi\nu(t - \frac{x}{V})) d\nu \quad (4.4)$$

Avec  $V$  est la vitesse de propagation dans le milieu  $M_5$ , donc l'onde réfléchiée sur la première interface a pour expression :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} A^*(v) R_{54} \exp(-j2\pi v(t - \frac{x}{V})) dv \quad (4.5)$$

Où  $R_{54}$  est le coefficient de réflexion entre l'interface des milieux  $M_5$  et  $M_4$ , son expression est donnée par la relation (5.6). Rappelons que  $Z_4$  et  $Z_5$  sont respectivement les impédances acoustiques des milieux 4 et 5.

$$R_{54} = \frac{Z_4 - Z_5}{Z_4 + Z_5} \quad (5.6)$$

La transformée de *Fourier* de cette réponse est égale à :  $A^*(v) R_{54} \exp(-j2\pi vx/V)$ , dont l'amplitude est  $A^*(v) R_{54}$  et notée  $A_1$ . Le signal transmis après cette interface a pour expression (4.7). Avec  $T_{54}$  est le coefficient de transmission entre les deux milieux 4 et 5, il est exprimé par  $T_{54} = 2Z_5/(Z_4 + Z_5)$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} A^*(v) T_{54} \exp(-j2\pi v(t - \frac{x}{V_{pg}})) dv \quad (4.7)$$

Où  $V_{pg}$  est la vitesse de propagation dans le Plexiglas. Au niveau de l'interface *plexiglas / mortier*, la solution monochromatique de l'équation de propagation a pour expression :

$$A^*(v) T_{54} \exp(-\alpha_{pg}(v)d) \exp(-j2\pi v(t - \frac{x}{V_{pg}}))$$

Où  $\alpha_{pg}$  est l'atténuation dans la plaque de Plexiglas.

L'amplitude de la transformée de *Fourier* de l'onde polychromatique est donnée par :

$$B_1 = A^*(v) T_{54} \exp(-\alpha_{pg}(v)d)$$

Où  $d$  est l'épaisseur de la plaque de Plexiglas. On refait la même démarche à chaque niveau et à chaque interface et on obtient :

$$A_2 = A^*(v) T_{54} T_{45} R_{43} \exp(-2\alpha_{pg}(v)d)$$

$$A_3 = A^*(v) T_{54} T_{43} R_{32} T_{34} T_{45} \exp(-2\alpha_{pg}(v)d) \exp(-2\alpha(v)L)$$

Avec

$$R_{ij} = \frac{Z_j - Z_i}{Z_j + Z_i}, \quad T_{ij} = \frac{2Z_i}{Z_j + Z_i}$$

Où  $\alpha(v)$  est l'atténuation dans le mortier, ce qui permet décrire

$$\alpha(v) = -\frac{1}{2L} \ln\left(\frac{A_3}{A_2} \zeta_{ref}\right) \quad (4.8)$$

$$\zeta_{ref} = \left| \frac{(Z_{mor} - Z_{pg})(Z_{pg} + Z_{mor})(Z_{mor} + Z_{verre})}{4Z_{mor}Z_{pg}(Z_{verre} - Z_{mor})} \right|$$

$Z_{Mor}$  est l'impédance acoustique de mortier,  $Z_{verre}$  est l'impédance acoustique de verre et  $Z_{pg}$  est l'impédance acoustique de plexiglas.

Les échos  $A_2$  et  $A_3$  sont isolés séparément au moyen du programme de filtrage temporel implanté sur le Micro-ordinateur. On note  $A_2(\nu)$  et  $A_3(\nu)$  les spectres d'amplitudes correspondants.

#### 4.3.3.2. Mesure de l'impédance acoustique

Le comportement du milieu vis-à-vis des ultrasons est exprimé par une constante appelée impédance acoustique  $Z$ . Elle caractérise la qualité du matériau à transmettre les ondes ultrasonores, et elle est définie comme le produit de la masse volumique et de la vitesse ultrasonore dans milieu. Elle est exprimé par  $Z = \rho \times C$ , où  $C$  est la vitesse ultrasonore dans le milieu en  $m.s^{-1}$  et  $\rho$  est la masse volumique du milieu en  $kg.m^{-3}$ .

La mesure de l'amplitude spectrale du signal rétrodiffusé par un récipient enfermant l'eau, sera considérée comme état de référence dans l'évolution de l'impédance acoustique. L'équation (4.9) exprime la relation qui relie entre l'amplitude spectrale de l'onde ultrasonore qui propage dans l'eau et l'impédance acoustique de plexiglas et de l'eau. Où  $Z_{pg}$  est l'impédance acoustique dans le plexiglas égale  $3,21 \times 10^6 \text{ Kg} / m^2.s$ , et  $Z_{eau}$  est l'impédance acoustique dans l'eau égale  $1,48 \times 10^6 \text{ Kg} / m^2.s$

$$A_{s p c t - e a u} = K \left( \frac{Z_{p g} - Z_{e a u}}{Z_{p g} + Z_{e a u}} \right) \quad (4.9)$$

$K$  est une constante qui dépend des fonctions de transferts de générateur, d'oscilloscope, de transducteur, de plexiglas et d'eau.  $K = 2,68 \times A_{s p c t - e a u}$ . La valeur de  $K$  se détermine par le calcul de la valeur de l'amplitude spectrale  $A_{s p c t - e a u}$ . Pour chaque température, on détermine la valeur de  $K$ .

Pour  $T=42^\circ\text{C}$ , la constante  $K=45,85$ , et quand  $T= 32^\circ\text{C}$  on a déduit que  $K=63,28$ , et pour  $T=25^\circ\text{C}$  la valeur de  $K$  égale  $84,36$ . Par conséquent, l'impédance acoustique de mortier est exprimée par la relation suivante :

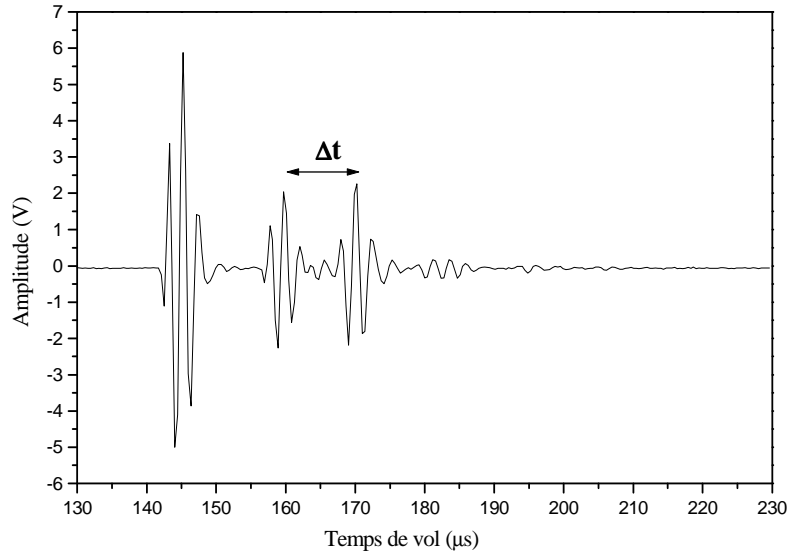
$$Z_{mor} = Z_{pg} \left( \frac{K + A_{s p c t - mor}}{K - A_{s p c t - mor}} \right)$$

#### 4.3.3.3. Mesure de la vitesse

Le principe de contrôle par les ultrasons de la vitesse de l'onde qui se propage dans le mortier consiste à mesurer le temps entre deux échos successifs de la propagation de l'onde ultrasonore dans le mortier. Grace aux propriétés piézoélectriques du transducteur l'énergie électrique émise est transformée en énergie mécanique ultrasonore. Le transducteur détecte les temps de chaque écho au cours de la propagation de l'onde dans les différentes interfaces constituant le récipient contenant

le mortier. Connaissant donc l'épaisseur du mortier, il est possible de déterminer la vitesse de la propagation de l'onde dans le mortier. Elle est exprimée par la relation (4.10), où  $\Delta t = t_3 - t_2$  est la variation du temps de vol entre les échos  $A_2$  et  $A_3$  (la figure 4.5) et  $L$  est l'épaisseur du mortier.

$$V_g = \frac{2L}{\Delta t} \quad (4.10)$$



**Figure 4. 5. Détermination de la vitesse à partir de  $A_2$  et  $A_3$ .**

#### 4.3.3.4. Mesure du module de coefficient de réflexion R

L'application de la méthode de réflexion par les ondes ultrasonores pour caractériser les matériaux cimentaires a été développée par *Stepisnik et al.* [5] en 1981, et *Lasic et Stepisnik* [6] en 1984. Pour étudier l'applicabilité de cette méthode, on suit la prise et le durcissement des mortiers pendant le temps d'hydratation. Le coefficient de la réflexion mesuré par cette technique nous informe sur le caractère microstructurale du mortier et le temps pendant lequel le mortier change de phase : il passe de l'état visqueux à l'état solide.

En général, le coefficient de réflexion peut être calculé à partir des amplitudes des échos  $A_1$  et  $A_2$  d'un signal réfléchi entre deux interfaces d'impédance acoustique différentes [7]. Ces amplitudes peuvent être déterminées à partir de la représentation des réflexions dans le domaine temporel ou fréquentiel.

La mesure du module de coefficient de réflexion de l'onde réfléchi par une structure du mortier est nécessaire pour connaître l'état de la pâte de mortier à l'interface avec la plaque de plexiglas. L'amplitude crête à crête  $A_{cc}$  de l'onde réfléchi à l'interface Plexiglas/mortier (différence entre la valeur maximale de  $A_2$  et sa valeur minimale) est mesurée après avoir isolé l'écho  $A_2$  au moyen d'un



programme de filtrage temporel, le coefficient de réflexion correspondant  $R$  dépend des impédances des deux milieux Plexiglas et mortier. Il est exprimé par la relation (4.11) suivante :

$$R = \frac{Z_{\text{mor}} - Z_{\text{pg}}}{Z_{\text{mor}} + Z_{\text{pg}}} \quad (4.11)$$

En mesurant l'amplitude crête à crête de référence notée  $A_{\text{réf}}$  à partir d'un écho réfléchi à l'interface entre le Plexiglas et un milieu dont l'impédance acoustique  $Z_{\text{réf}}$  est connu, la valeur de  $R$  est ensuite déterminée par la relation (4.12).

$$R_{\text{exp}} = \frac{A_{\text{cc}}}{A_{\text{réf}}} R_{\text{réf}} \quad (4.12)$$

Avec  $R_{\text{réf}}$  est le coefficient de réflexion à l'interface entre le Plexiglas et le milieu de référence, il est donnée par :

$$R_{\text{réf}} = -\left(\frac{Z_{\text{réf}} - Z_{\text{pg}}}{Z_{\text{réf}} + Z_{\text{pg}}}\right)$$

Dans notre étude on a pris comme référence le milieu Air avec son impédance acoustique  $Z_{\text{réf}}$  est proche de 0 ( $Z_{\text{réf}} \approx 0$ ). Ce qui donne  $R_{\text{réf}} \approx 1$ . L'équation (4.12) devient donc:

$$R_{\text{exp}} \approx \frac{A_{\text{cc}}}{A_{\text{réf}}}$$

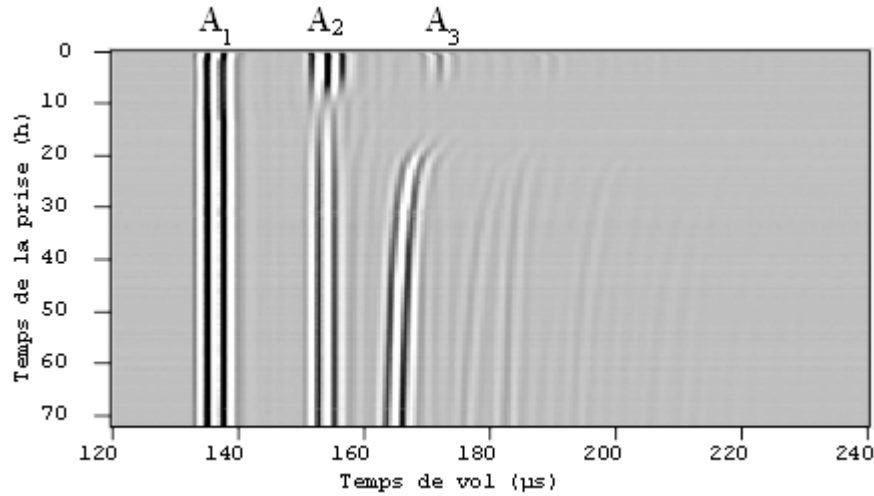
#### 4.4. Effet de la microstructure du sable sur l'évolution des paramètres viscoélastiques

La propagation des ondes ultrasonores est liée directement aux propriétés mécaniques des matériaux cimentaires, l'atténuation ultrasonore liée aux petites et grandes fissurations et le degré d'hétérogénéité des matériaux. Tandis que, la vitesse ultrasonore permet de remonter à la masse volumique et l'impédance acoustique. La formulation du mortier consiste à choisir les proportions de chacun de ses constituants et la mise en œuvre souhaitée afin d'obtenir une structure avec les propriétés désirées. Nous présentons ci-après les différents résultats expérimentaux obtenus pour quatre types de mortiers réalisés avec le sable extrait d'*Oued Souss* dont les tailles des grains suivantes 0,200 ; 0,250 ; 0,315 et 0,500 mm, et pour la même température maintenue à 42°C.

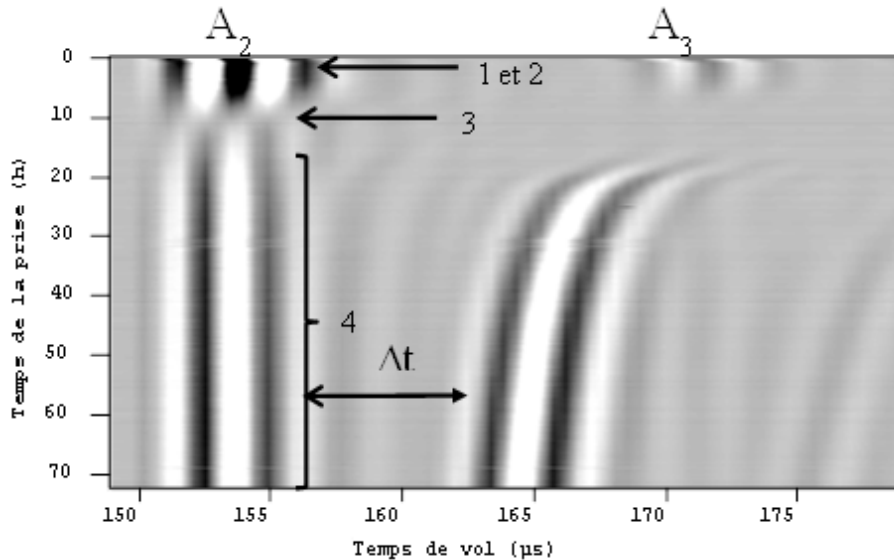
##### 4.4.1. Histogrammes temporels

Le traitement d'images est une autre méthode pour identifier et visualiser le processus globale de la prise des mortiers, il nous permet de différencier les différentes périodes d'hydratation de mortier durant la prise. Dans la figure 4.6 nous présentons l'histogramme (image) de différents signaux temporels enregistrés durant une période de trois jours. L'intervalle d'acquisition entre deux signaux est 15min. À partir de cette image on peut isoler les deux échos les plus importants  $A_2$  et  $A_3$  pour étudier l'état du durcissement de mortier enfermé. Dans la figure 4.7 nous représentons les

différentes périodes d'hydratation de mortier, l'analyse et l'interprétation de ces périodes sont décrites après.



**Figure 4. 6. Histogramme des signaux temporels rétrodiffusés par le mortier**



**Figure 4. 7. Zoom des échos  $A_2$  et  $A_3$  : Périodes d'hydratation du mortier.**

Les figures 4.8, 4.9, 4.10 et 4.11 exhibent un même comportement, qui se traduit principalement par le passage simultané de l'écho  $A_3$  par un maximum relatif pour le temps de vol et un minimum relatif pour l'amplitude, pour tendre ensuite vers une valeur asymptotique pour chacun de ces deux paramètres. Le temps d'apparition de cet extremum diminue lorsque la taille des grains passe de 0,200 à 0,315mm, mais augmente à nouveau lorsque cette taille passe à 0,500mm. Le tableau 4.2 représente la différence du temps de vol entre les deux échos  $A_2$  et  $A_3$  du signal rétrodiffusé à 60heures de la prise de mortier.

Taille des grains (mm)	0,200	0,250	0,315	0,500
$\Delta t$ (s)	10,55	9,35	9,35	9,75

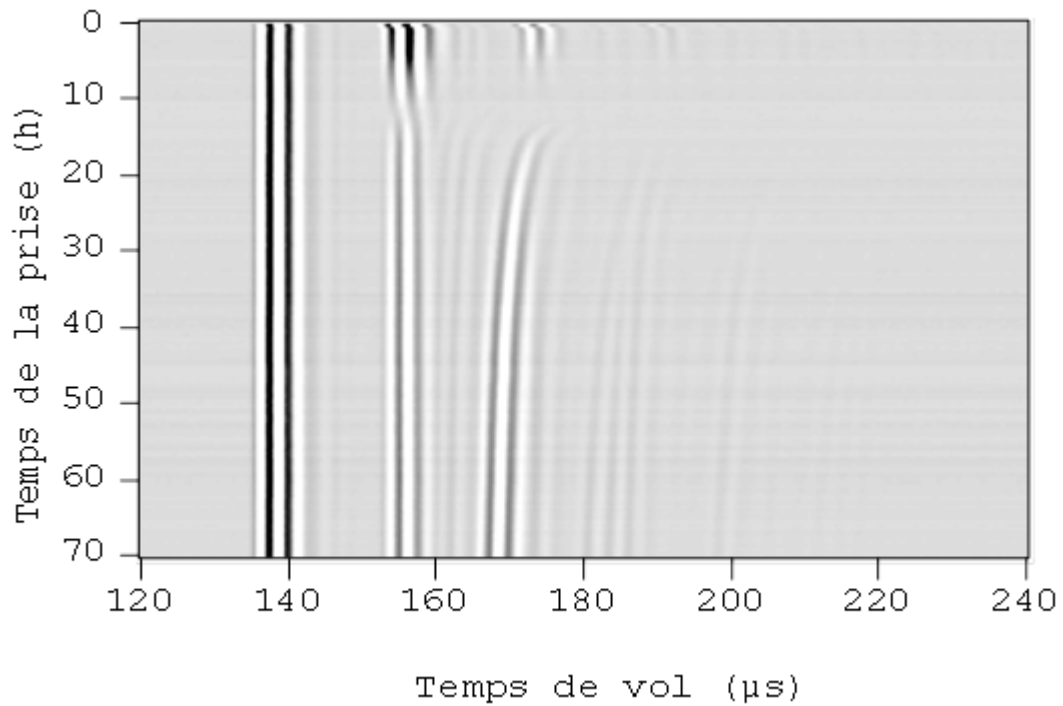
 Tableau 4. 2. Variations du temps du vol  $\Delta t$  .


Figure 4. 8. Superposition des signaux rétrodiffusés par le mortier (0,200mm)

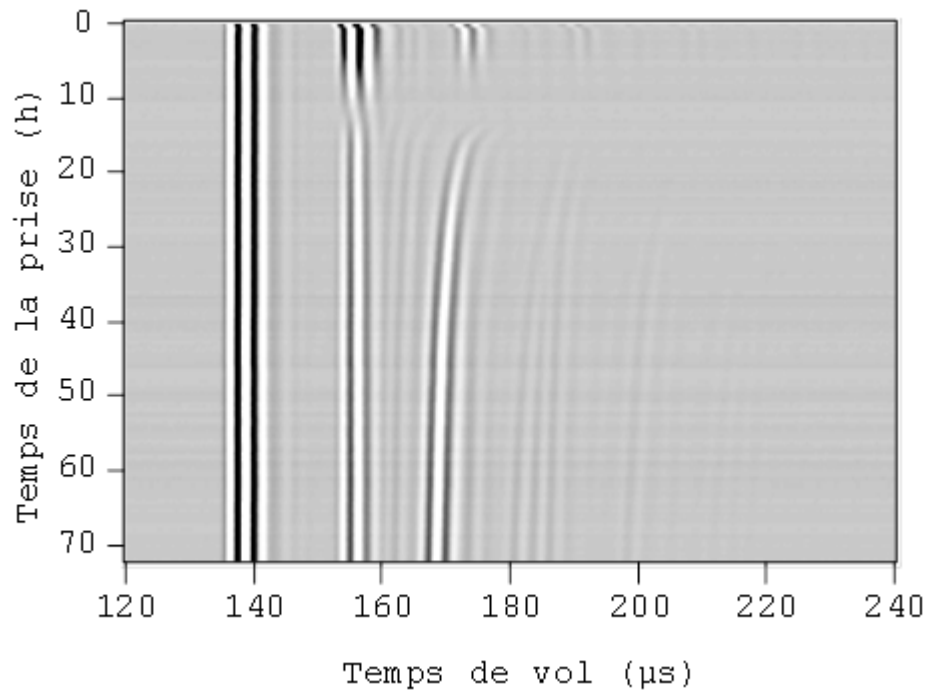
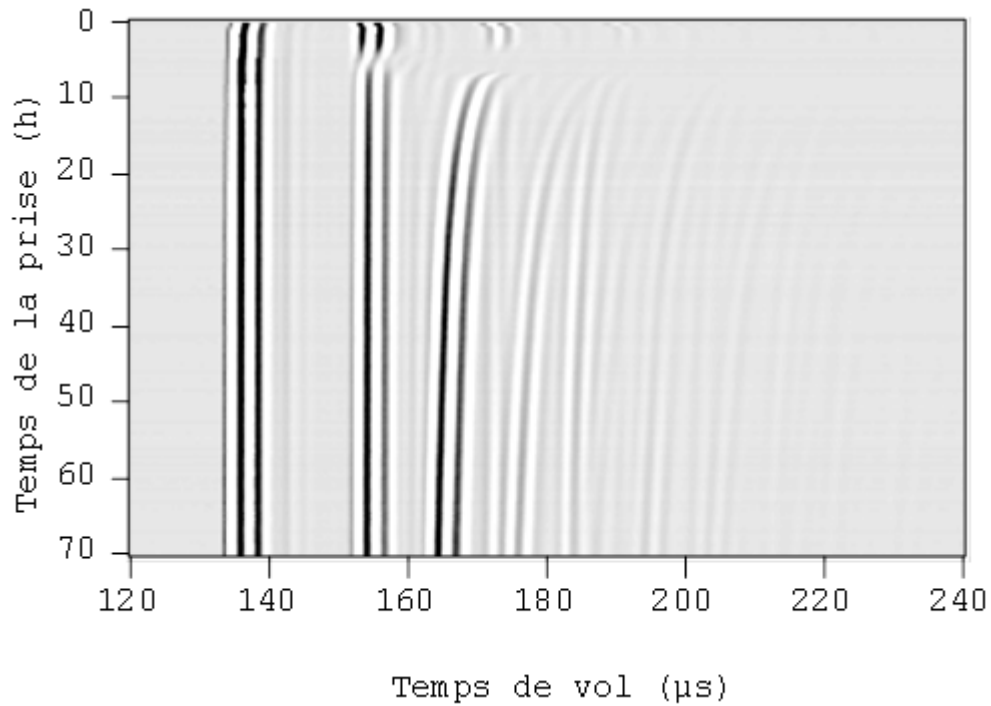
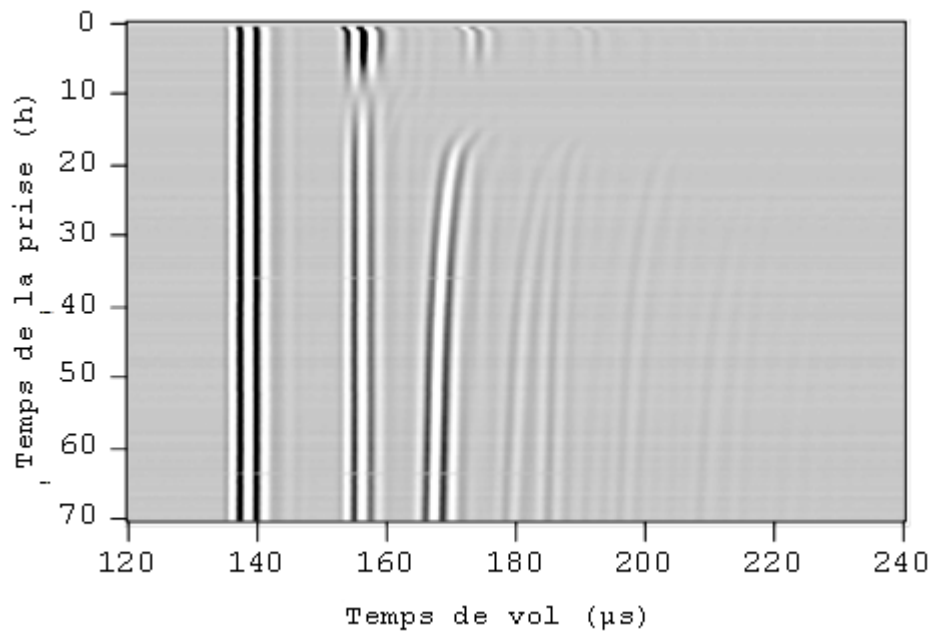


Figure 4. 9. Superposition des signaux rétrodiffusés par le mortier (0,250mm)



**Figure 4. 10. Superposition des signaux rétrodiffusés par le mortier (0,315mm)**

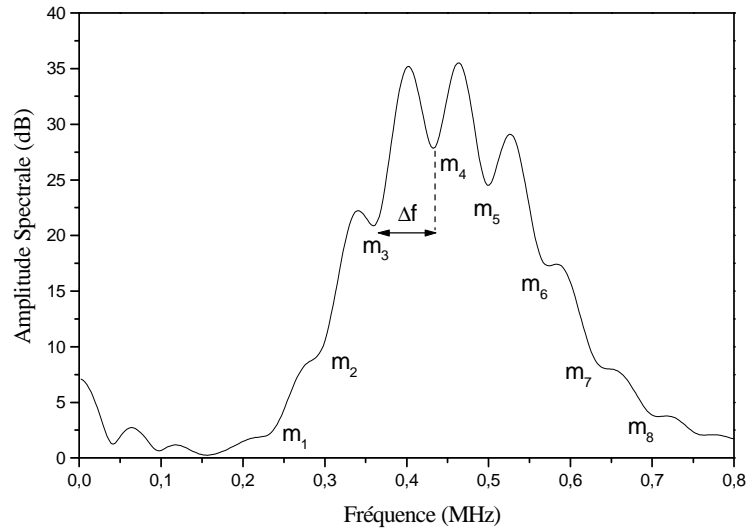


**Figure 4. 11. Superposition des signaux rétrodiffusés par le mortier (0,500mm).**

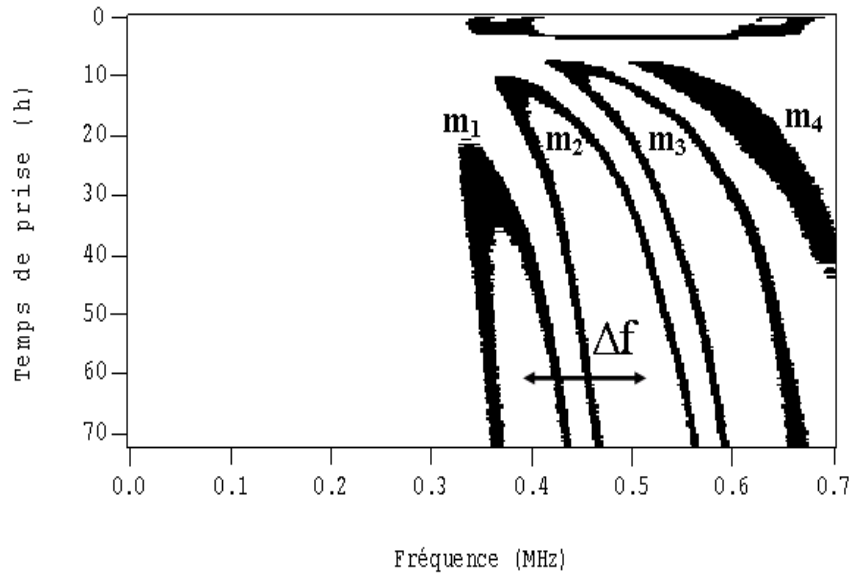
#### 4.4.2. Histogrammes fréquentiels

Le traitement des signaux fréquentiels est un autre moyen pour caractériser l'évolution de la prise du mortier. La figure 4.12 représente l'amplitude spectrale des échos  $A_2$  et  $A_3$  filtrés dans leurs

domaines temporels. La figure 4.13 illustre le regroupement de différents signaux fréquentiels rétrodiffusés en fonction du temps de la prise.



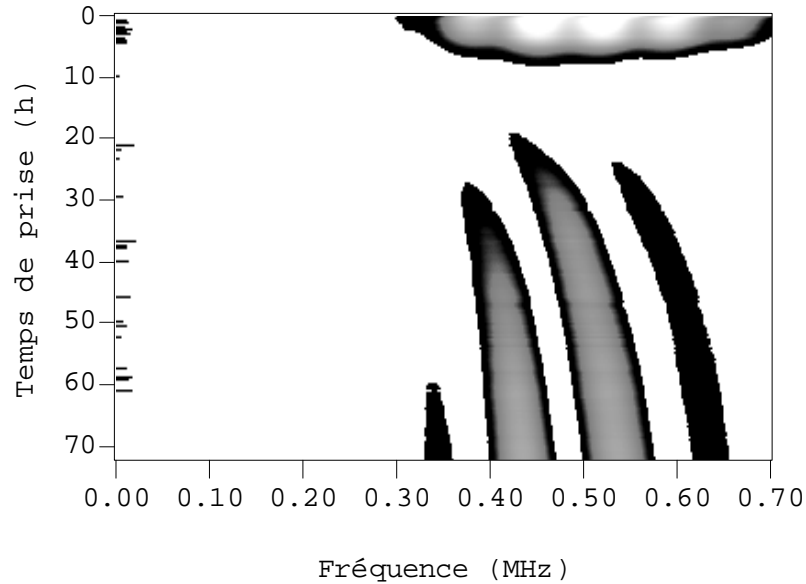
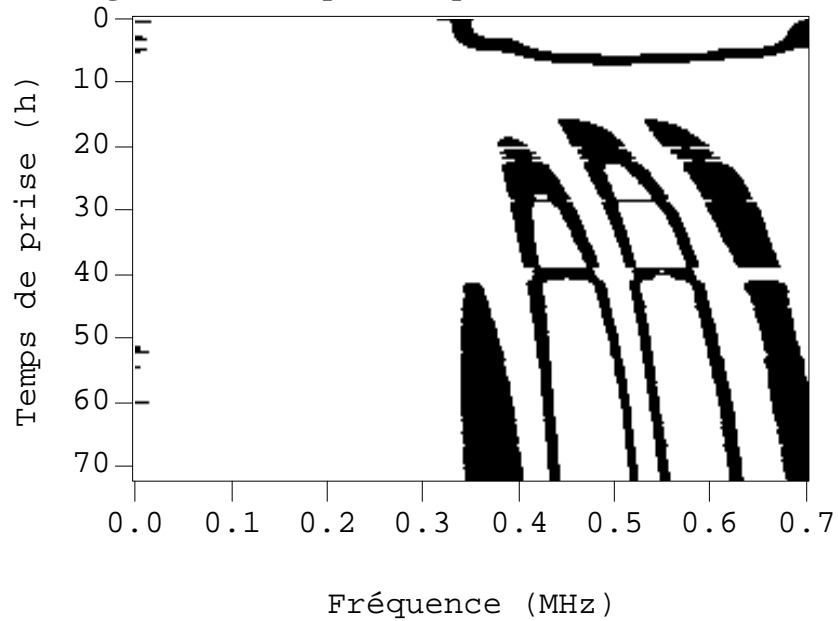
**Figure 4. 12. Amplitude spectrale des échos  $A_2$  et  $A_3$ ,  $m_i$  sont les modes de résonance.**

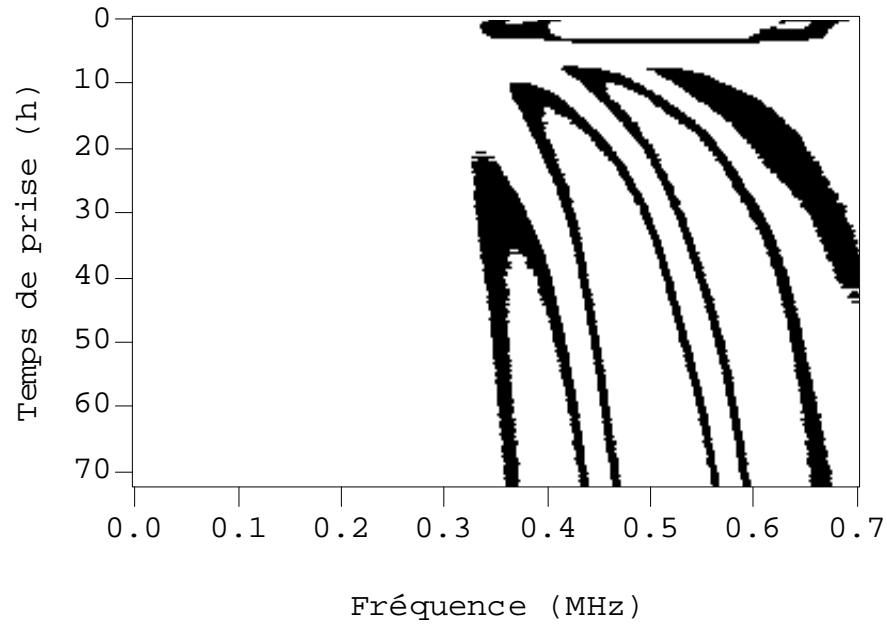


**Figure 4. 13. Superposition des amplitudes spectrales  $A_2$  et  $A_3$ .**

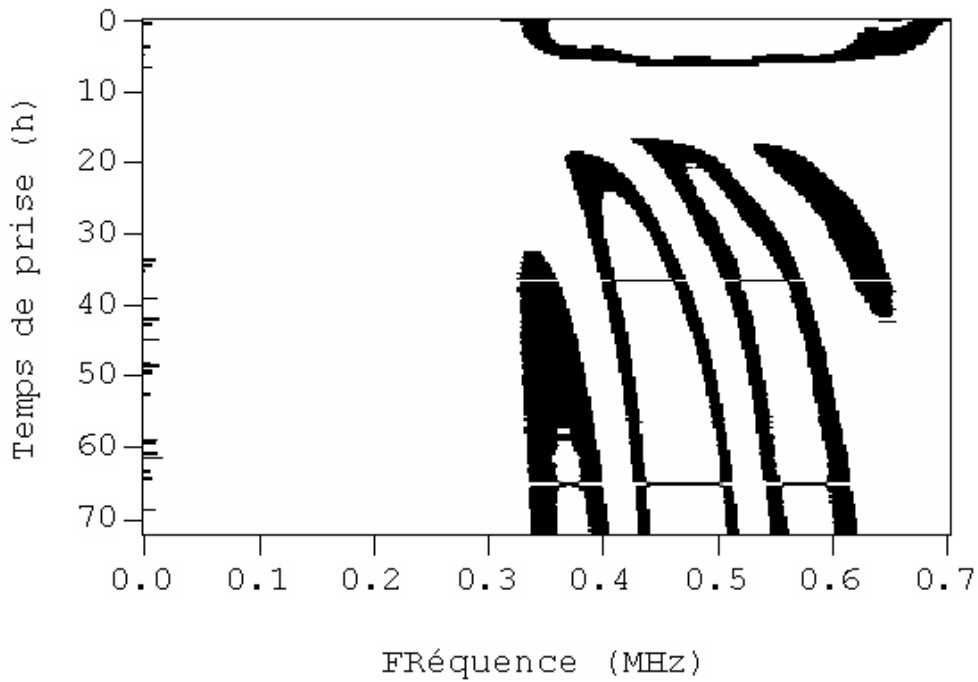
Les figures 4.14, 4.15, 4.16 et 4.17 sont des histogrammes qui dessinent la superposition des signaux spectrales des échos  $A_2$  et  $A_3$  obtenus par la transformation de *Fourier* des signaux temporels rétrodiffusés pour les différents mortiers suivant la tailles des grains du sable et à température maintenue à 42°C. On remarque que ces figures présentent plusieurs modes de résonance avec des minimas et maxima. Dans le tableau 4.3 nous présentons les variations de la fréquence  $\Delta f$  entre deux modes de résonances minimas successives. On déduit que cette variation de  $\Delta f$  pour tous les mortiers est constante et égale à 0,05MHz.

Taille des grains (mm)	0,200	0,250	0,315	0,500
$\Delta f$ (MHz)	0,040003765	0,05004707	0,05004707	0,05004707

 Tableau 4. 3. Variations de la fréquence  $\Delta f$  .

 Figure 4. 14. Histogramme des amplitudes spectrales des échos A<sub>2</sub> et A<sub>3</sub> (0,200mm).

 Figure 4. 15. Histogramme des amplitudes spectrales des échos A<sub>2</sub> et A<sub>3</sub> (0,250mm).



**Figure 4. 16. Histogramme des amplitudes spectrales des échos A<sub>2</sub> et A<sub>3</sub> (0,315mm).**



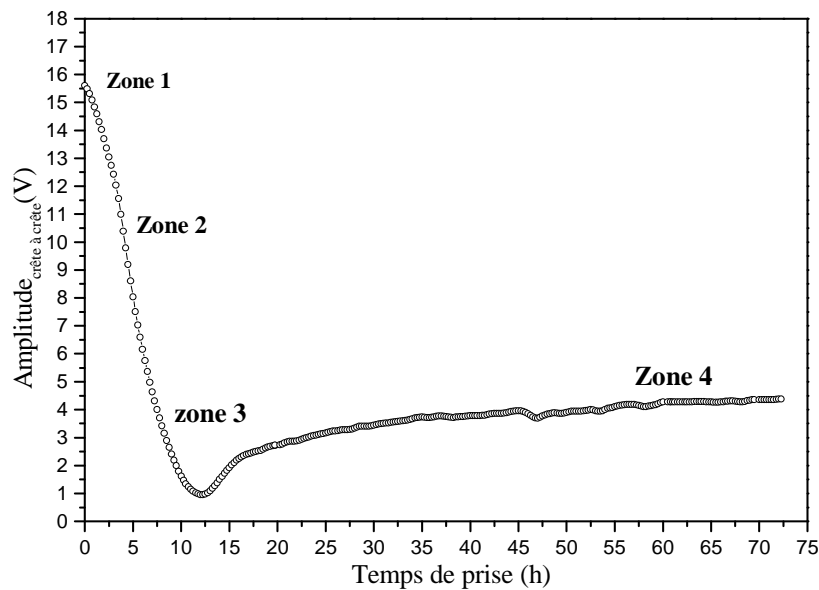
**Figure 4. 17. Histogramme des amplitudes spectrales des échos A<sub>2</sub> et A<sub>3</sub> (0,500mm).**

#### 4.4.3. Amplitude crête à crête

L'analyse de l'écho A<sub>2</sub> des signaux rétrodiffusés au cours de la prise du mortier permet de suivre l'évolution de l'amplitude crête à crête au cours de la prise et le durcissement du mortier. À l'aide d'un programme de filtrage implanté sur le Micro-ordinateur on isole l'écho A<sub>2</sub> et on détermine son amplitude crête à crête pour chaque acquisition. La figure 4.19 illustre l'évolution de l'amplitude crête à

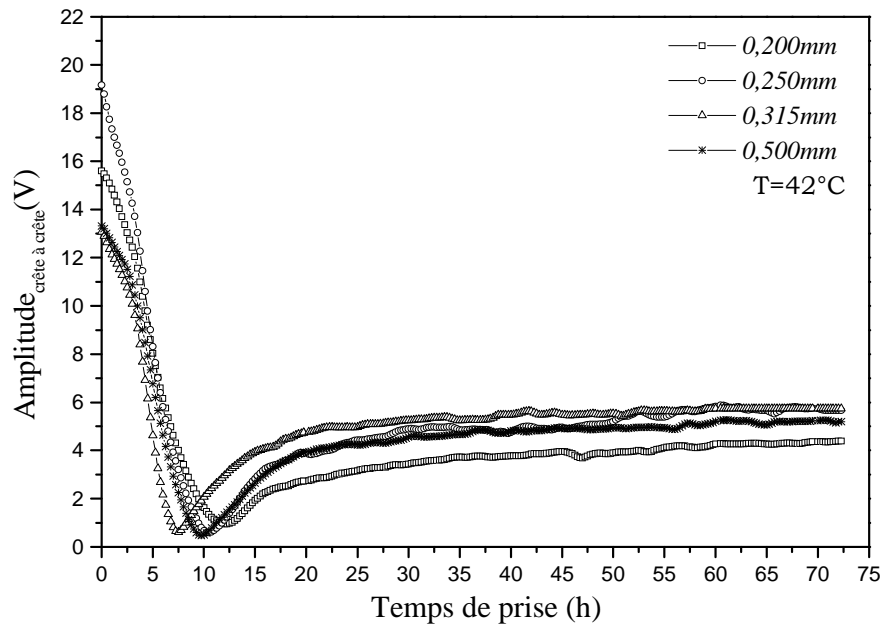
crête en fonction du temps de la prise pour quatre qualités de mortier correspondantes aux tailles de sable suivantes (0,200 ; 0,250 ; 0,315 et 0,500mm) et à même température maintenue à 42°C. On remarque que ces évolutions indiquent quatre zones importantes (figures 4.18 et 4.7).

- **Zone 1** : C'est la période initiale qui se déroule au moment de gâchage de l'eau avec le ciment, elle se caractérise aussi par un dégagement important de la chaleur causée par la dissolution superficielle des constituants du ciment.
- **Zone 2** : L'amplitude crête à crête commence à diminuer, c'est la période dormante, dans cette période l'hydratation du ciment et le mélange devient sursaturé.
- **Zone 3** : L'amplitude crête à crête est minimale c'est-à-dire le coefficient de réflexion sur l'interface *Plexiglas/Mortier* est minimal, c'est la période de la prise de mortier. Cette période se caractérise par une forte liaison entre les grains de sable et le ciment, cette liaison continue jusqu'à la fin de la prise.
- **Zone 4** : L'amplitude est quasiment constante, c'est-à-dire que l'eau libre à l'intérieur de la pâte du mortier commence à se consommer. Cette zone correspond à la période de durcissement du mortier.



**Figure 4. 18. Évolution de l'amplitude crête à crête, périodes d'hydratation du mortier.**





**Figure 4. 19. Évolution de l'amplitude crête à crête, différentes tailles à T=42°C**

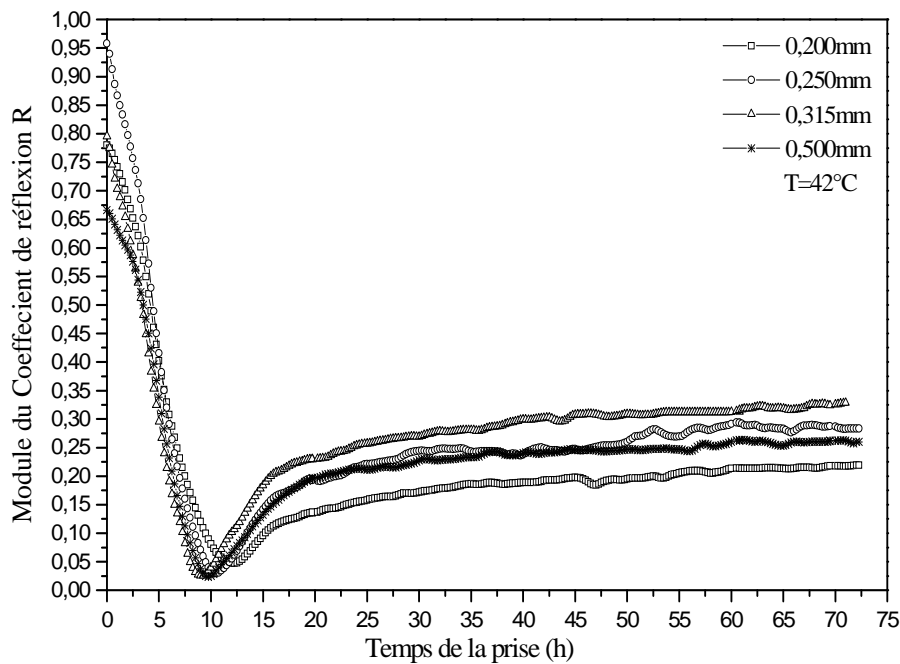
#### 4.4.4. Coefficient de réflexion R

La technique de réflexion des ondes ultrasonores est le processus de plusieurs auteurs pour caractériser l'hydratation de certains matériaux cimentaires. *Feylessoufi et al.*[8] ont examiné l'hydratation du ciment Portland avec des mesures ultrasonores en mode transmission et réflexion en utilisant les ondes de cisaillement avec une fréquence centrale de 0,5 MHz. *Morin et al.* [9] ont étudié le comportement des matériaux cimentaires en se basant sur la réflexion des ondes ultrasonores. Les modules de cisaillements, déterminés par *Morin*, montrent que le comportement viscoélastique des matériaux cimentaires est similaire à celui déterminé par la chaleur d'hydratation. Dans la figure 4.20 nous présentons l'évolution du module de coefficient de réflexion en fonction du temps de la prise des mortiers. Les modules de coefficient de réflexion pour les différents échantillons présentent des allures similaires, et l'effet des diamètres des grains sur le coefficient de réflexion R est clairement observé. Pendant la phase de la prise (R devient minimum) et la phase de durcissement (R devient constant). Nous pouvons donc distinguer quatre principales périodes.

La deuxième étape de l'évolution du coefficient de réflexion est la période dormante pendant laquelle on observe diminution du coefficient de réflexion ce qui signifie que l'impédance acoustique du mortier commence à augmenter. Cette période se caractérise par l'agglomération des constituants du mortier. Ceci est interprété comme étant le temps de contact entre les particules du ciment, l'eau et le sable.

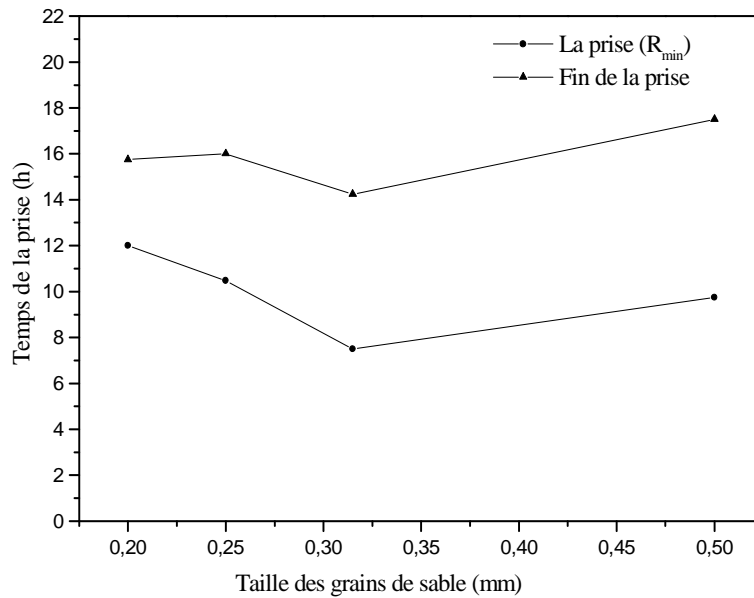
La troisième étape, c'est la période de la prise qui est indiquée par une forte diminution de coefficient de réflexion ( $R$  minium). Durant cette étape la transmission de l'onde ultrasonore dans le mortier est également importante, c'est à dire que l'impédance acoustique du mortier commence à augmenter et devient supérieur à celui de Plexiglas.

La quatrième étape c'est la période du durcissement pendant laquelle on remarque que le coefficient de réflexion devient constant, ce qui signifie que toutes les particules constitutives de la composition du mortier sont connectées entre elles.



**Figure 4. 20. Évolution du coefficient de réflexion, différentes tailles à  $T=42^{\circ}\text{C}$**

La figure 4.21 illustre les variations des temps de la prise au début et à la fin en fonction des tailles de grains de sable. L'analyse des deux allures montre que les grains de diamètre 0,315mm représentent le temps du début et de la fin de la prise le plus faible par rapport aux autres tailles. En fin l'échantillon réalisé par les grains de diamètre 0,315mm présente une résistance à la compression importante, mais il est intéressant d'étudier sa résistance à la compression en fonction de la vitesse ultrasonore.



**Figure 4. 21. Variation du temps de prise en fonction des tailles des grains de sable**

#### 4.4.5. Vitesse ultrasonore

La technique de mesure de la vitesse de l'onde ultrasonore qui se propage dans les mortiers et bétons a été présentée par *Reinhardt et al.* [10]. Cette technique est munie de nouvel équipement combiné par un logiciel qui mesure la vitesse ultrasonore en continue. Des études en cours sur cette configuration de contrôle et ces applications sont détaillées par *Grosse* [11 et 12]. L'utilisation de la vitesse ultrasonore pour étudier la dispersion et l'atténuation des ondes aux différentes fréquences fait l'objet des études d'*Aggelis* [13 et 14]. L'étude de la dureté du béton par les ultrasons a été étudiée par *L.M. del Rio* [15] et *Gimet et al.* [16] ont évalué les phases d'hydratation du ciment Portland au très jeune âge par les ondes ultrasonores. Dans la figure 4.22, nous montrons les variations de la vitesse des mortiers étudiés à une température maintenue à 42°C en fonction de temps de la prise. On remarque que ces courbes ont la même allure et la vitesse augmente fortement dans l'intervalle temporel (15h à 50h), et au dessus de 50h la vitesse ultrasonore devient quasiment constante. Trois stades importants peuvent être distingués dans l'évolution de la vitesse, comme le montre la figure 4.23.

- Stade I :** Ce stade se déroule dans l'intervalle du temps de 0 à 15h. Dans cet âge la vitesse est relativement petite, ce qu'a été montré aussi par d'autres auteurs [17 et 18]. Cette diminution de la vitesse peut être causée par l'air engendré dans la pâte du mortier qui est généralement due à deux raisons, la première, c'est qu'il existe une certaine quantité de bulles d'air dans le mélange, la deuxième, c'est il y a un certain nombre de bulle d'air qui sont formées dans la pâte durant le malaxage [19].

- **Stade II** : Dans ce stade, l'augmentation de la vitesse est causée par l'échappement de l'air au cours du processus d'hydratation. Les phases de la structure deviennent de plus en plus connectées et le mortier se transforme de l'état visqueux en un solide élastique et poreux. Durant ce stade, on déduit que la vitesse est contrôlée par la réduction des bulles d'air c'est la même conclusion de Lokhorst [20] dans le cas de béton.

- **Stade III** : Une légère augmentation de la vitesse est observée, qui est due principalement à l'absence de l'eau et des bulles d'air dans le mortier.

Pour la même température et les mêmes rapports massiques du ciment/sable et ciment/sable. On déduit que le mortier préparé avec les tailles de sable d'ordre 0,315mm a une vitesse importante par rapport aux autres tailles, par conséquent une résistance à la compression importante.

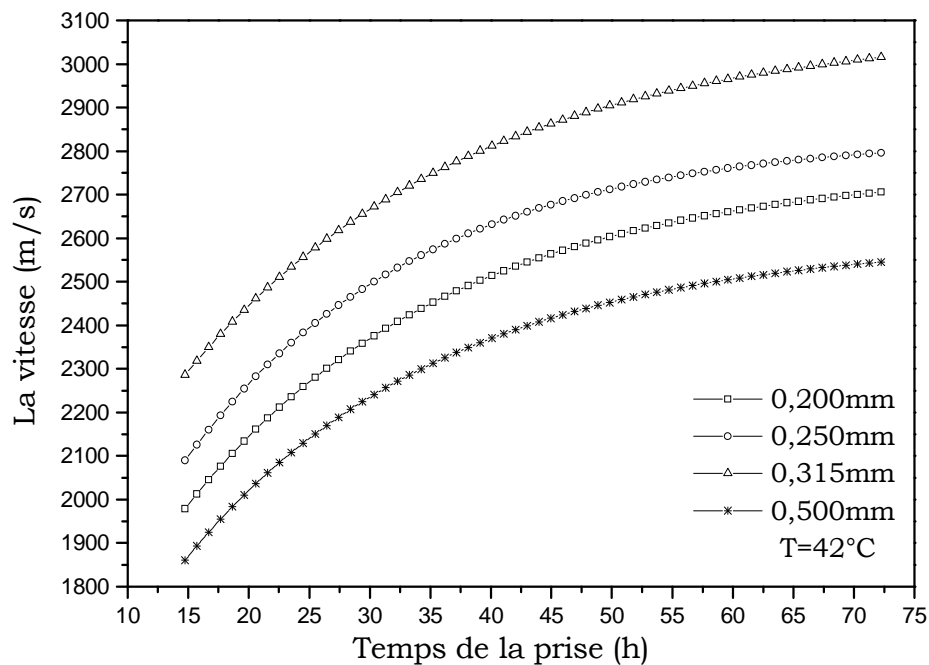
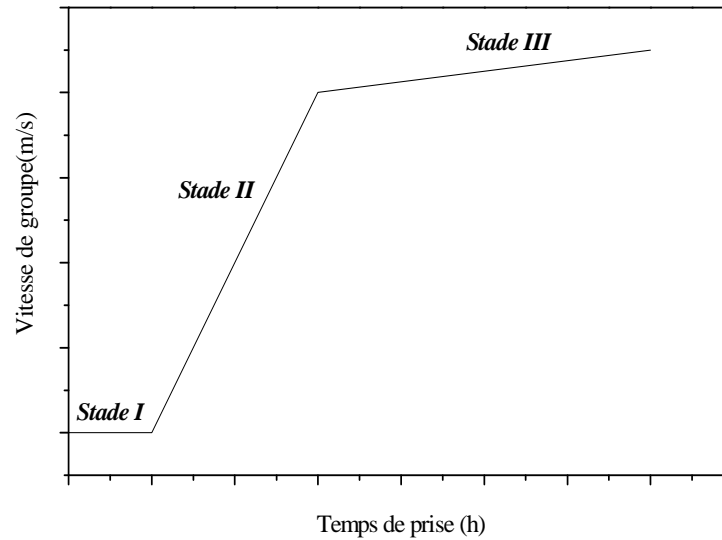


Figure 4. 22. Évolution de la vitesse, différentes tailles à T=42°C.



**Figure 4. 23. Stades caractérisant l'évolution de la vitesse**

#### 4.4.6. Impédance acoustique

Pour illustrer l'influence de la microstructure du sable sur la réponse des ondes ultrasonores rétrodiffusées par le récipient enfermant le mortier, nous représentons l'évolution de l'impédance acoustique de différents échantillons suivant les tailles des grains et à une température maintenue à 42°C. La figure 4.20 représente les évolutions de l'impédance acoustique. Ces courbes présentent la même allure que la vitesse. À partir de cette figure on remarque que le mortier réalisé par les grains de taille égale à 0,315mm présente une impédance acoustique importante par rapport aux autres tailles. Ceci peut être expliqué, d'une part, par le fait que les grains de sable de faible diamètre soient riches en impuretés et d'argile qui inhibent la prise, d'autre part la faible valeur d'impédance acoustique de mortier réalisé par les tailles de 0,500mm est due principalement à l'interconnexion entre les grains, d'où la formation des pores et des fissurations dans la structure.

La densité du mortier est calculée à partir de la relation  $Z = \rho \times V$ ,  $Z$  est l'impédance acoustique du matériau et  $V$  la vitesse de propagation. Le tableau 4.4 résume les valeurs des impédances acoustiques, vitesses ultrasonores et les densités moyennes des mortiers suivants la taille des grains du sable. À titre de comparaison les valeurs d'impédances acoustiques du béton sont comprises entre  $6,9-10,4 \times 10^6 \text{ N.s/m}^3$  et les valeurs de la vitesse entre  $3000-5000 \text{ m/s}$  [21].

Taille des grains (mm)	Temps de la prise (h)	Impédance acoustique ( $10^6 \text{ N.s/m}^3$ )	Vitesse ultrasonore (m/s)	Densité $\rho$ ( $\text{Kg/m}^3$ )	Densité moyenne $\rho$ ( $\text{Kg/m}^3$ )
0,200	24	4,52	2248,71	2010,04	1956,32
	48	5,00	2596,06	1926,00	
	72	5,23	2705,74	1932,93	
0,250	24	5,28	2383,12	2215,58	2330,00
	48	6,30	2705,82	2328,31	
	72	6,84	2796,27	2446,12	
0,315	24	6,38	2556,44	2495,66	2568,30
	48	7,43	2869,73	2589,09	
	72	7,90	3015,09	2620,15	
0,500	24	5,34	2129,50	2507,63	2401,77
	48	5,82	2445,94	2379,45	
	72	5,90	2545,06	2318,22	

Tableau 4. 4. Densité des mortiers à 24, 48 et 72h

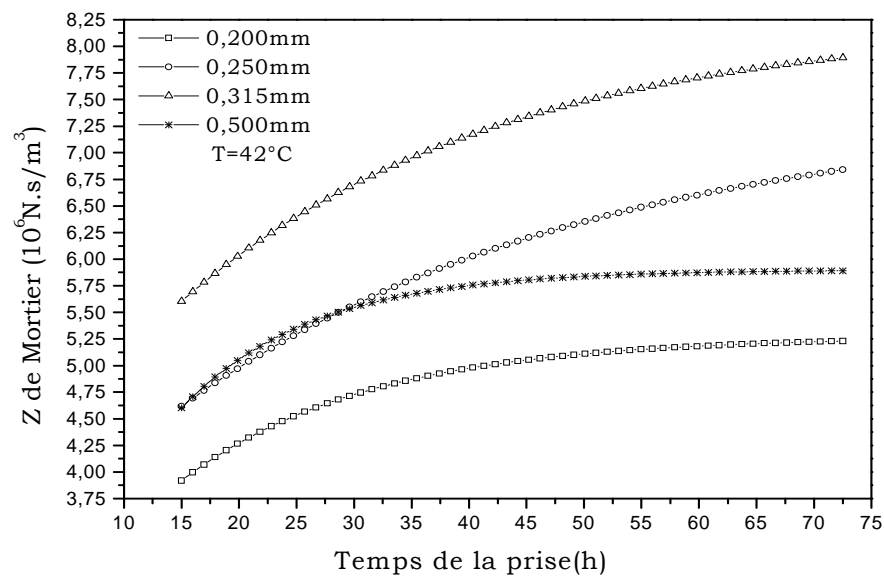


Figure 4. 24. Évolution de l'impédance acoustique, différentes tailles à T=42°C

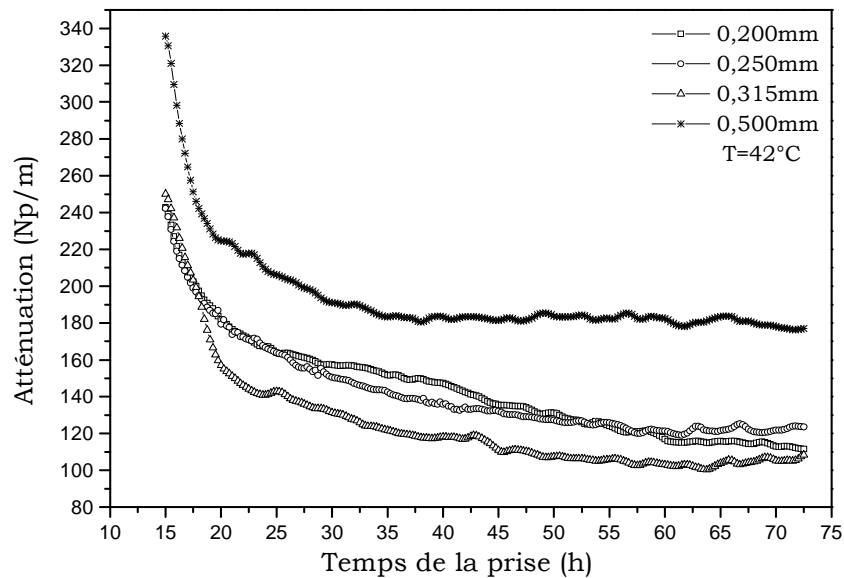
#### 4.4.7. Atténuation ultrasonore

Philippidis et Aggelis [22] ont utilisé la transmission des ondes pour caractériser l'atténuation et la dispersion des ondes dans les bétons. Les résultats obtenus par cette technique en accord avec celles obtenu par Sachse et Pao [23]. Nous mesurons les amplitudes spectrales des échos  $A_2$  et  $A_3$  dus respectivement aux réflexions sur les interfaces *Plexiglas/ Mortier* et *Mortier /Verre*, pour chaque signal rétrodiffusé. Dans la figure 4.25 nous présentons les variations de l'atténuation en fonction du temps de la prise. Au-delà des 24heures d'hydrations, on voit que l'atténuation subit

une forte diminution (40% de chute). Entre 24 et 48 heures, l'atténuation diminue de 20% de son évolution pour différents mortiers. Entre 48 et 72 heures du durcissement, l'atténuation devient quasiment constante. Le tableau 4.5 présente les valeurs de l'atténuation des temps de la prise 24, 48 et 72h.

Taille des grains (mm)	Temps de la prise (h)	Atténuation (Np/m)
0,200	24	167,44
	48	132,73
	72	111,62
0,250	24	166,65
	48	128,85
	72	123,46
0,315	24	140,85
	48	109,35
	72	108,31
0,500	24	209,24
	48	182,70
	72	176,99

**Tableau 4. 5. Atténuation ultrasonore pour les temps de la prise 24, 48 et 72h**



**Figure 4. 25. Évolution de l'atténuation, différentes tailles à T=42°C**

#### 4.5. Effet de la température sur l'évolution des paramètres viscoélastiques

Il est évident que les conditions climatiques (pression atmosphérique, température, ...) ont un effet sur la qualité des ouvrages. Il convient donc d'étudier cette influence durant la préparation et le suivi de la prise des mortiers. *Han et Kim* [24] ont préparé des éprouvettes du béton formulées par deux types du ciment avec les rapports massiques Eau/ Ciment (E/C) 0,400 et 0,500, et dans les

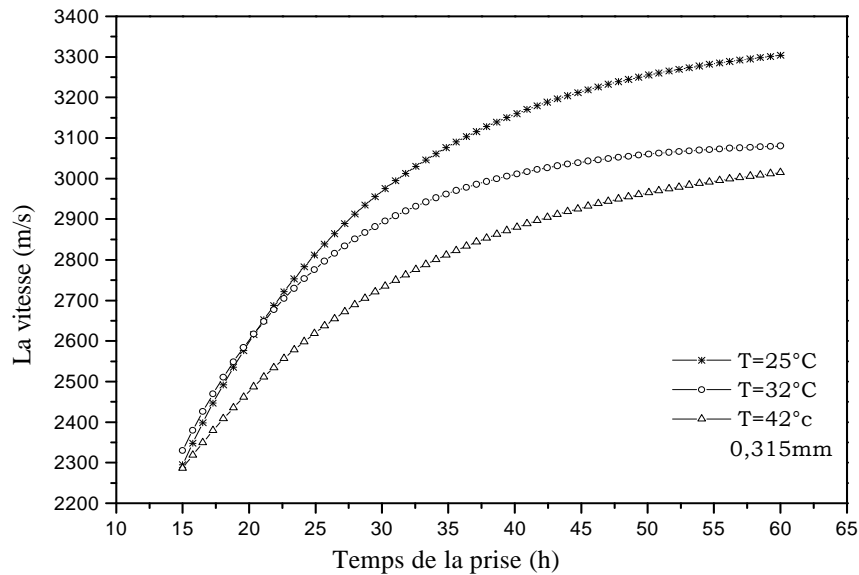
températures 10°C, 23°C et 50°C. Après ces éprouvettes sont testées à l'âge de 1, 3, 7 et 28 jours. *Han et Kim* ont constaté que le type de ciment n'a pas une influence significative sur la qualité du ciment, mais l'âge de conservation des éprouvettes et les conditions de la température ont une relation avec les modules dynamique et la résistance de la compression du béton. *Bjontegaard* [25] a effectué aussi des mesures concernant les retraits libres sur les bétons réalisés avec le rapport massique  $E/C = 0,4$  et pour différentes températures. *Bjontegaard* a observé que pour des températures isothermes le retrait endogène augmente aussi bien que une réduction et augmentation de la température en comparant avec les résultats obtenus à 20°C.

Pour améliorer la qualité et la prise des mortiers nous avons procédé à des essais sur trois températures différentes 25, 32 et 42°C, et pour la même taille des grains de sable 0,315 mm et les rapports massiques Ciment/Sable  $m_c/m_s = 0,5$  et Eau/Ciment  $m_e/m_c = 0,65$ .

#### 4.5.1. Vitesse ultrasonore

La figure 4.26 représente les variations de la vitesse pour les trois mortiers réalisés aux températures suivantes 25, 32 et 42°C, et pour une même taille des grains de sable qu'est égale à 0,315mm. À partir de l'analyse de ces courbes nous remarquons qu'elles ont la même allure et que la vitesse de l'onde propageant dans le mortier est diminuée par élévation de la température. La méthode par réflexion des ondes ultrasonores est sensible à l'influence de la température durant la prise et le durcissement des mortiers, et la vitesse ultrasonore dans le mortier dépend de sa durabilité qui est influencée par la microstructure du sable et la température d'hydratation et bien évidemment des rapports massique Eau/ ciment et Ciment /sable qui sont l'objet des études antérieures [26]. En guise de conclusion, le mortier réalisé à la température 25°C présente une vitesse très importante par rapport aux autres températures. En outre, le mortier réalisé à 32°C présente un durcissement important (rapide) mais moins dur que celui réalisé à 25°C. Ainsi la meilleure qualité de mortier est réalisée avec les grains de sable d'ordre 0,315mm et aux températures proches de 25°C.

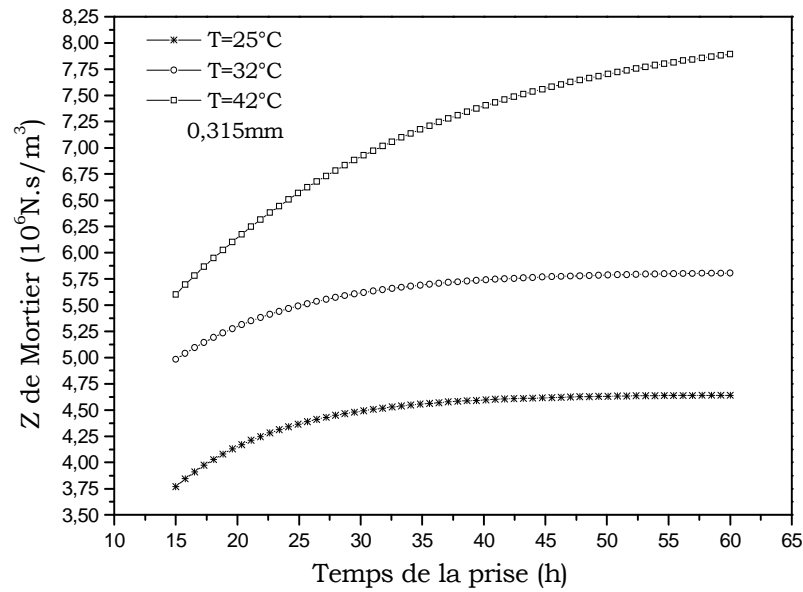




**Figure 4. 26. Évolution de la vitesse, différentes températures**

#### 4.5.2. Impédance acoustique

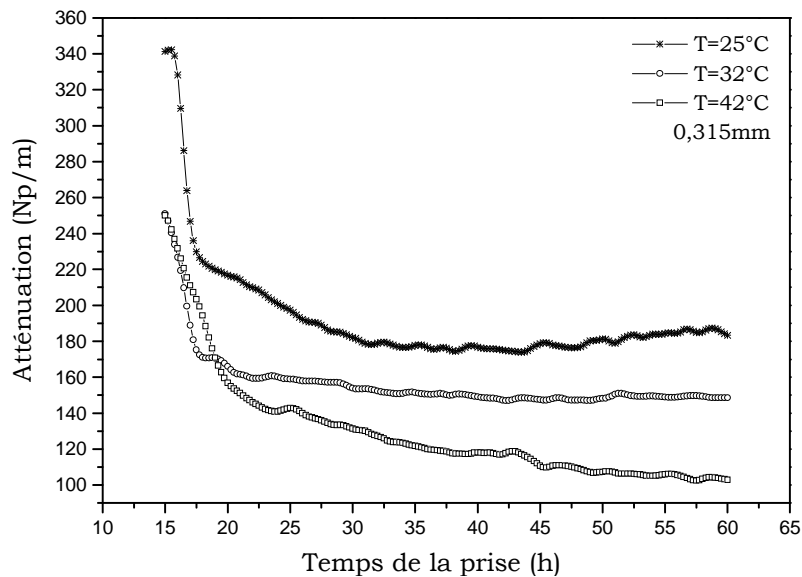
Dans la figure 4.27 nous présentons les variations de l'impédance acoustique des trois mortiers réalisés aux températures 25,32 et 42°C et pour une même taille des grains de sable égale à 0,315mm. On remarque que le mortier réalisé à la température 42°C présente une impédance acoustique importante par rapport aux deux autres mortiers. Il convient de noter que de même en absence des fissurations dans les structures cimentaires à long terme, le mortier qu'a subi une élévation de température au jeune âge présente des résistances plus faibles que celle des mortiers qui seront réalisés à la température ambiante. Ceci peut être attribué à la microstructure des hydrates formés à température élevée [27].



**Figure 4. 27. Évolution de l'impédance acoustique, différentes températures**

#### 4.5.3. Atténuation ultrasonore

Dans la figure 4.28, nous montrons l'évolution d'un dernier paramètre viscoélastique à savoir l'atténuation de l'onde ultrasonore dans le mortier en fonction de temps de la prise. Ces mesures réalisées aux mêmes conditions et pour trois températures différentes. Il a été montré auparavant que l'atténuation diminue fortement dans les premières heures d'hydratation jusqu'à 20h, après elle devient quasiment constante. Ainsi le mortier réalisé à la température 25°C présente une atténuation importante par rapport aux températures 32 et 42°C.



**Figure 4. 28. Évolution de l'atténuation, différentes températures.**

## **4.6. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre la technique de contrôle non destructive par les ultrasonores pour investiguer des échantillons de mortier enfermés dans un récipient en Plexiglas et en verre. Cette technique est basée sur l'analyse des signaux temporels et fréquentiels rétrodiffusés par le mortier en utilisant un transducteur de fréquence centrale 0,5MHz.

Dans cette étude, les conclusions suivantes peuvent être énumérées.

1. La taille des particules de sable influencent sur la mesure des paramètres ultrasonores de l'onde rétrodiffusées par ces mortiers.
2. L'hydratation de mortier se fait en quatre périodes, la période initial, la période dormante, la période de la prise et la période de durcissement
3. Les variations de la vitesse peuvent être découpées en trois phases, une phase rapide d'hydratation, une phase lente et une phase de stabilité.
4. La présence d'impuretés dans les petites particules de sable, et leur caractère minérale inhibe le durcissement des mortiers.
5. Pour les grandes tailles du sable, la vitesse ultrasonore est faible en raison de l'interconnexion entre les grains donc la formation des anomalies et des fissures dans le mortier.

## **4.7. Références bibliographiques**

- [1] Oscilloscope numérique LECROY. Modèle 9310M, Manuel de l'utilisateur, (1992).
- [2] B. Faiz " Thèse : Contrôle ultrasonore de la prise en masse d'un yaourt et d'une résine époxy" . Université Ibnou Zohr, (1995).
- [3] J.W.Cooley et J.W. Tuckey, math.of Comp, vol.19, 297.301, (1965).
- [4] Ozturk, T., O. Kroggel, P. Grubl . "The influence of temperature on the hydration process of concrete evaluated through ultrasound technique". In Proceedings of the International RILEM Symposium: Advances in Concrete through Science and Engineering.(2004)
- [5] Stepisnik, J., M. Lukac, I. Kocuvan . "Measurement of cement hydration by ultrasonics". American Ceramic Society Bulletin, vol. 60, no. 4, pp. 481–483, (1981).
- [6] Lasic, D. D., J. Stepisnik . "An investigation of the osmotic model of cement curing by ultrasonics". Cement and Concrete Research, vol. 14, no. 3, pp. 345–348. (1984).
- [7] Kline RA. Measurement of attenuation and dispersion using an ultrasonic spectroscopy technique. J. Acoust. Soc. Am. 76, 498-504. (1984).
- [8] Feylessoufi, A., F. Cohen-Tenoudji, V. Morin, P. Richard ."Early ages shrinkage mechanisms of ultra-high-performance cement-based materials ". Cement and Concrete Research, vol. 31, no. 11, pp. 1573–1579.( 2001).
- [9] Morin, V., F. Cohen-Tenoudji, C. Vernet . "Study of the viscoelastic behaviour of cement pastes at early ages with ultrasonic waves in echographic mode". In Nonat, A. (Ed.), Proceedings of the Second International RILEM Workshop on Hydration and Setting. pp.317–327. (2000).

- [10] Reinhardt, H. W., C. U. Grosse, A. T. Herb . Ultrasonic monitoring of setting and hardening of cement mortar – A new device. *Materials and Structures*, vol.33, no.233, pp.581–583.( 2000)
- [11] Grosse, C. U. "improving the quality control of hardening concrete using ultrasound". *Concrete Plant et Precast Technology*, vol. 67, no. 1, pp. 102–104. (2001).
- [12] Grosse, C.U., H. W. Reinhardt, R. Beutel ." Impact-echo measurements on fresh and hardening concrete. In Kovler, K., J. Marchand, S. Mindess, J. Weiss (Eds.), *Proceedings of the International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering*: pp. 95–104. (2004).
- [13] D.G. Aggelis "Wave dispersion and attenuation in fresh mortar: theoretical predictions vs. experimental result " *J. of the Mechanics and Physics of solids* 53 857–883, Elseiver. (2005)
- [14] D.G. Aggelis," Ultrasonic wave dispersion and attenuation in fresh mortar". *J. NDT&E International* 37 617–631, Elseiver.( 2004)
- [15] L.M. del Rio "Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing» *J. Ultrasonics* 527.530, Elseiver .( 2004)
- [16] N. Gimet, D. Frageot, J.M. Gaillard, A. Smith, C. Gault, J.P. Bonnet, "Ultrasonic assessment of Portland cement at the early stages of hydration", *J. Mater. Sci. Lett.* 8 1335– 1337. (1999).
- [17] J. Keating, D.J. Hannant, "Correlation between cube strength, ultrasonic pulse velocity and volume change for oil well cement" slurries,*Cem. Concr. Res.* 19 . 715– 726. (1989)
- [18] C.M. Sayer, A. Dahlin, "Propagation of ultrasound through hydrating cement parts at early times", *Adv. Cem. Based Mater.* 1 , 12– 21. (1993)
- [19] G. Ye, K. van Breugel, A.L.A. Fraaij" Experimental study and numerical simulation on the formation of microstructure in cementitious materials at early age", *J. CCR.* (2003).
- [20] S.J. Lokhorst, "Deformational behavior of concrete influenced by hydration-related changes of the microstructures", *Research report 25.5.99-5*, Delft University of Technology, (1999).
- [21] Lin, J.-M., Sansalone, M. . "A procedure for determining P-wave speed in concrete for use in Impact-Echo Testing using a Rayleigh wave speed measurement technique". *American Concrete Institute, ACI SP-168*, pp. 137-165. (1997).
- [22] T.P. Philippidis , D.G. Aggelis," Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete", *Ultrasonics*. Pp 584–595. (2005)
- [23] W. Sachse, Y.-H. Pao, "On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids, *J. Appl. Phys.* 49 (8). 4320–4327. (1978).
- [24] Han, S. H., J. K. Kim." Effect of temperature and age on the relationship between dynamic and static elastic modulus of concrete". *CCR.* vol. 34, no. 7, pp. 1219–1227.(2004)
- [25] O.Bjontegaard:"Thermal dilatation and autogenous deformation as driving forces to selfinduced stresses in high performance concrete". *Thèse, Trond-heim,Norway*, (1999).
- [26] Ye, G., K. van Breugel, A. L. A. Fraaij . "Experimental study and numerical simulation on the formation of microstructure in cementitious materials at early age". *CCR*, vol. 33, no. 2, pp. 233–239.(2003).
- [27] L.D'Aloia : *Guide d'utilisation de la maturométrie. Rap. Tech., Résultats et recommandations du projet national CALIB´E*, (2004).

5.1. Introduction .....	94
5.2. Préparation des échantillons .....	94
5.3. Principe de l'expérimentation .....	95
5.3.1. Montage expérimental .....	95
5.3.2. Technique de contrôle .....	96
5.4. Étude de la réponse ultrasonore des tiges immergées dans l'eau .....	98
5.4.1. Signal temporel .....	98
5.4.2. Spectre de rétrodiffusion .....	98
5.4.3. Vitesse du groupe $V_g$ .....	99
5.5. Application aux mortiers renforcés par les tiges en fer .....	99
5.5.1. Vitesse ultrasonore dans le mortier .....	100
5.5.1.1. Géométrie du problème .....	100
5.5.1.2. Détermination de la vitesse ultrasonore dans le mortier .....	101
5.5.2. Échos du signal rétrodiffusé par le mortier renforcé par le fer .....	101
5.5.3. Détermination de la profondeur de la tige .....	103
5.5.4. Amplitude spectrales de l'écho $E_2$ .....	104
5.5.5. Détermination de diamètre des tiges enrobées par le mortier .....	106
5.6. Conclusion .....	107
5.7. Références bibliographiques .....	107

## 5.1. Introduction

Aujourd'hui, l'utilisation des méthodes de contrôle non destructif par émission des ondes ultrasonores a ouvert de nouvelles possibilités sur le côté contrôle qualité et sur l'étude des propriétés mécaniques des matériaux. L'étude de la propagation des ondes élastiques dans les solides est un moyen possible pour examiner certaines propriétés physiques des matériaux cimentaires. *Aggelis et al.* [1] ont caractérisé par deux méthodes non destructives le sous surface du béton, la première méthode est la thermographie pour contrôler la variation de la température, et la deuxième est la propagation des ondes ultrasonores pour estimer la profondeur des défauts dans le béton. *Ismail et al.* [2] Ont étudié la dégradation du béton armé due aux actions à long terme par la mesure de la résistance à la compression par des essais destructifs et non destructifs.

Pour améliorer le contrôle des ouvrages du génie civil, nous développons une technique de contrôle non destructive (CND) basée sur l'analyse des ondes ultrasonores rétrodiffusées par des structures de mortiers renforcés par des tiges en fer. Ce chapitre traite deux principaux objectifs, le premier objectif est d'évaluer de manière précise la réponse ultrasonore des tiges cylindriques de différents diamètres, en mesurant la vitesse du groupe des ondes de surface rétrodiffusées le long de la circonférence de ces tiges, le deuxième est d'améliorer les connaissances sur l'influence des diamètres et les profondeurs de ces tiges dans les structures d'enrobage sur la propagation des ondes ultrasonores.

## 5.2. Préparation des échantillons

Les échantillons sont préparés dans des moules en bois parallélépipédiques de dimension  $(L \times l \times h = 100 \times 70 \times 60 \text{ mm}^3)$ . Dans ces moules, nous plaçons une tige en fer à une profondeur donnée, que nous nous enrobons ensuite par du mortier, après une semaine d'hydratation nous procédons au démoulage, permettant d'obtenir des échantillons de mortier (béton) armé avec une seule armature. Ces échantillons sont ensuite émergés dans une cuve remplie d'eau et excités par un transducteur de fréquence centrale 0,5 MHz situé à 2cm de l'échantillon. La durée de l'émission des ondes doit être suffisante pour éviter les échos parasites provenant du matériel d'expérimentation. La cuve d'expérimentation est remplie d'eau de masse volumique  $\rho_{eau} = 1000 \text{ Kg} / \text{m}^3$  et la vitesse de l'onde ultrasonore dans l'eau est  $C_{eau} = 1470 \text{ m} / \text{s}$ .

Les tiges en fer utilisées dans les constructions cimentaires sont sous forme de tiges de haute résistance entourées complètement sur sa longueur par des nervures constituant presque un filetage. Elles sont les principaux matériaux de coffrage utilisés dans le royaume (voire les deux photos 1 et

2 ci-dessous). Dans le tableau 5.1 nous présentons les caractéristiques mécaniques de fer, et dans la figure 5.1 nous schématisons la géométrie de la structure de ferrailage.

Masse volumique	Vitesse longitudinale	Vitesse transversale	Module de poisson	Module d'Young	Module de cisaillement
$\rho = 7800 \text{ Kg} / \text{m}^3$	$V_L = 5900 \text{ m/s}$	$V_T = 3220 \text{ m/s}$	$\nu = 0,287$	$E = 208,3 \text{ GPa}$	$G = 80,92 \text{ GPa}$

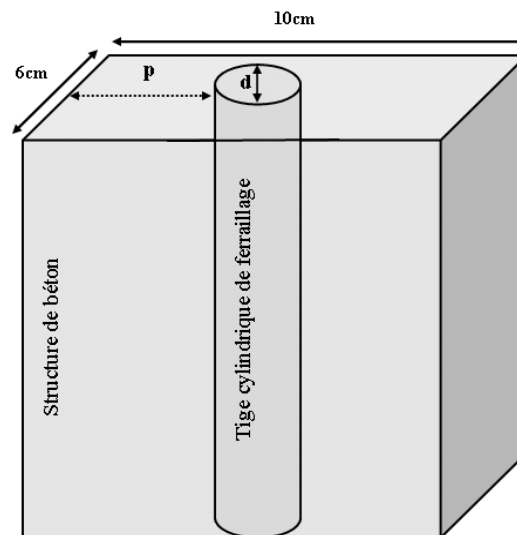
**Tableau 5. 1. Caractéristiques mécaniques de fer**



Photo 1. Tige de diamètre 6mm (Surface lisse)



Photo 2. Tiges de diamètres 8 et 10mm (surface fileté)



**Figure 5. 1. Géométrie de l'échantillon**

### 5.3. Principe de l'expérimentation

#### 5.3.1. Montage expérimental

La figure 5.2 représente le dispositif expérimental utilisé pour les expériences. Ce montage consiste en un transducteur ultrasonique de fréquence centrale 0,5MHz joue le rôle de l'émetteur et le récepteur. Ce capteur est émergé dans une cuve cubique remplie d'eau où l'échantillon à été placé à 2cm de transducteur. Le capteur ultrasonique est relié à un générateur d'impulsion de type (Sofranel Model 5073 PR, Sofranel Instruments) qui envoie le signal électrique à l'oscilloscope de stockage numérique (Hewlett Packard, HP). L'oscilloscope numérique est relié à un micro-ordinateur par un câble GPIB en vue de traitement des signaux non disponible sur l'oscilloscope et analyser les grandeurs déterminées.

Le contrôle commence par l'acquisition des signaux figurés sur l'écran de l'oscilloscope et rétrodiffusés par différentes structures (béton armé) en utilisant une application d'acquisition réalisée par le langage de programmation graphique *LabVIEW*. Les échantillons préparés sont des structures de mortier (béton) renforcées par des tiges cylindriques en fer. La circonférence des tiges est de l'ordre de la longueur d'onde  $\lambda = C_{\text{fer}} / f$  ( $\lambda \approx 10^{-2} \text{ m}$ ).

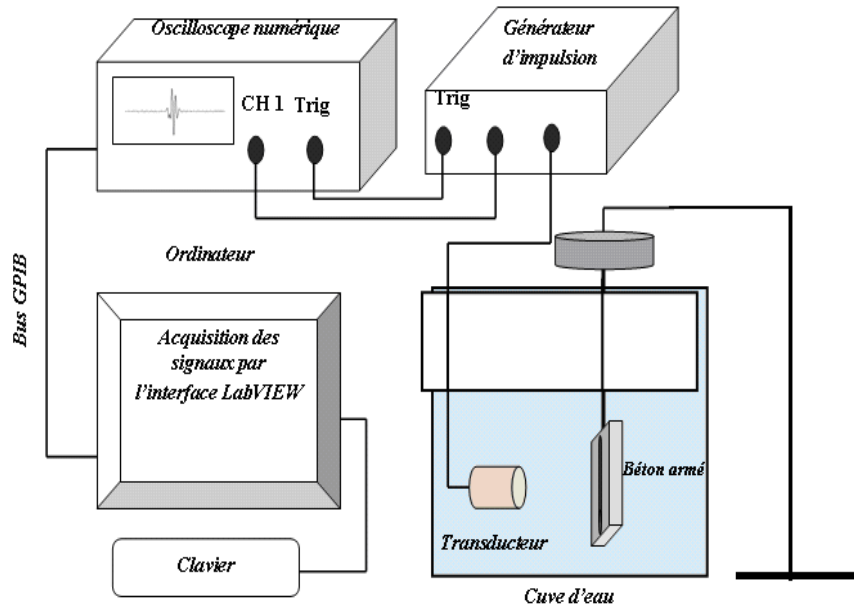


Figure 5. 2. Montage expérimental

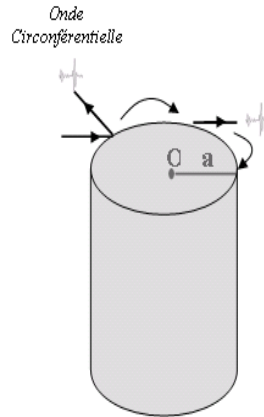
### 5.3.2. Technique de contrôle

L'étude expérimentale des ondes géométriques, rétrodiffusées par les cylindres pleins, a été entreprise par *M.de Billy* [3], et a été poursuivie jusqu'à ce jour par différents travaux de chercheurs. Ces travaux ont montré la validité de la théorie de l'optique géométrique présentée à la deuxième partie du chapitre 1, surtout la prédiction des échos observés lors de la diffusion par un cylindre plein de propriétés élastiques et géométriques connues. Les expériences de contrôle non destructif par les ultrasons réalisées sont effectuées par la technique de la réflexion des signaux ultrasonores [4]. Les mesures ont été réalisées sur des échantillons avec des rapports massiques eau/ciment ( $e/c = 0,65$ ) et ciment/sable ( $c/s = 0,5$ ). Ces échantillons ont été préparés avec du Ciment Portland CPJ 45 produit par la cimenterie d'Agadir. Les tiges en fer enrobées par le mortier (béton) sont celles commercialisées par les vendeurs de produits de constructions.

Grace à cette technique, nous étudions la réponse ultrasonore de la tige cylindrique de diamètre 6mm en fonction de leurs profondeurs ( $d = 2, 4$  et  $6 \text{ cm}$ ) dans le mortier d'enrobage. Les tiges dont les diamètres 8 et 10mm ne sont pas étudiées à cause de leurs formes géométriques compliqués, elles sont entourées complètement sur sa longueur par des nervures constituant presque un filetage



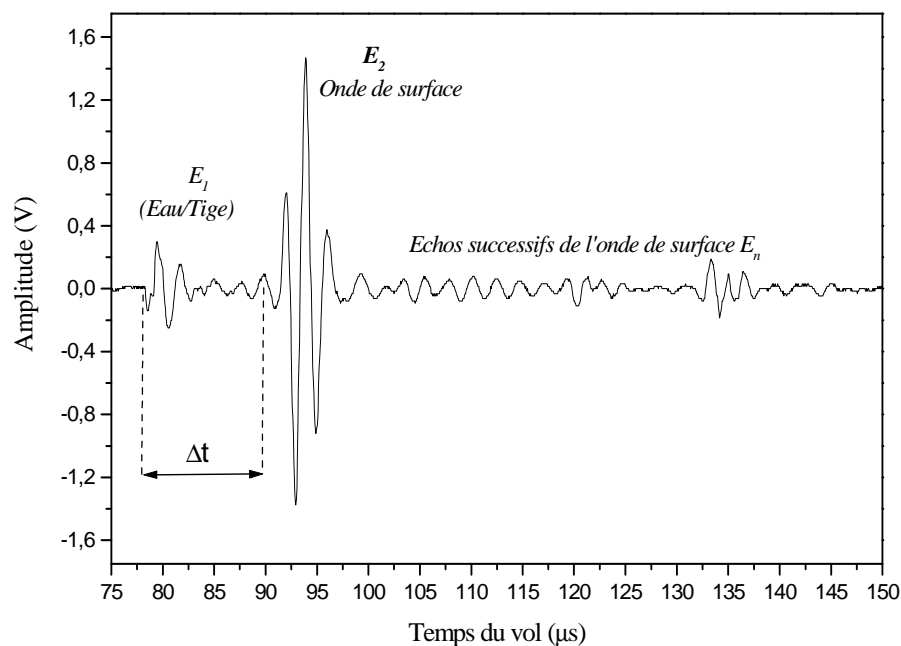
(photo 2). La figure 5.4 montre le type des signaux temporels obtenus par l'oscilloscope dans le cas d'incidence normale  $0^\circ$ , et dans la figure 5.3 nous schématisons le parcours de l'onde de surface rétrodiffusée le long de la circonférence d'un cylindre massif (Tige).



**Figure 5. 3. Onde circonférentielle sur un cylindre massif.**

La série des échos  $E_2$  et  $E_n$  observée dans la figure 5.4 est correspondante à aller-retour successifs de l'onde de surface le long de la circonférence de la tige. L'écho  $E_1$  correspond à la réflexion sur l'interface eau/ cylindre [5]. Ce signal est obtenu dans la rétrodiffusion géométrique dans le cas où le transducteur à ultrasons sert à la fois l'émetteur et le récepteur. Le temps entre deux échos successifs peut être lié au rayon  $a = d/2$  de la tige cylindrique et  $V_g$  la vitesse du groupe de l'onde de surface par la relation suivante :

$$V_g = \frac{2\pi a}{\Delta t} \quad (5.1)$$

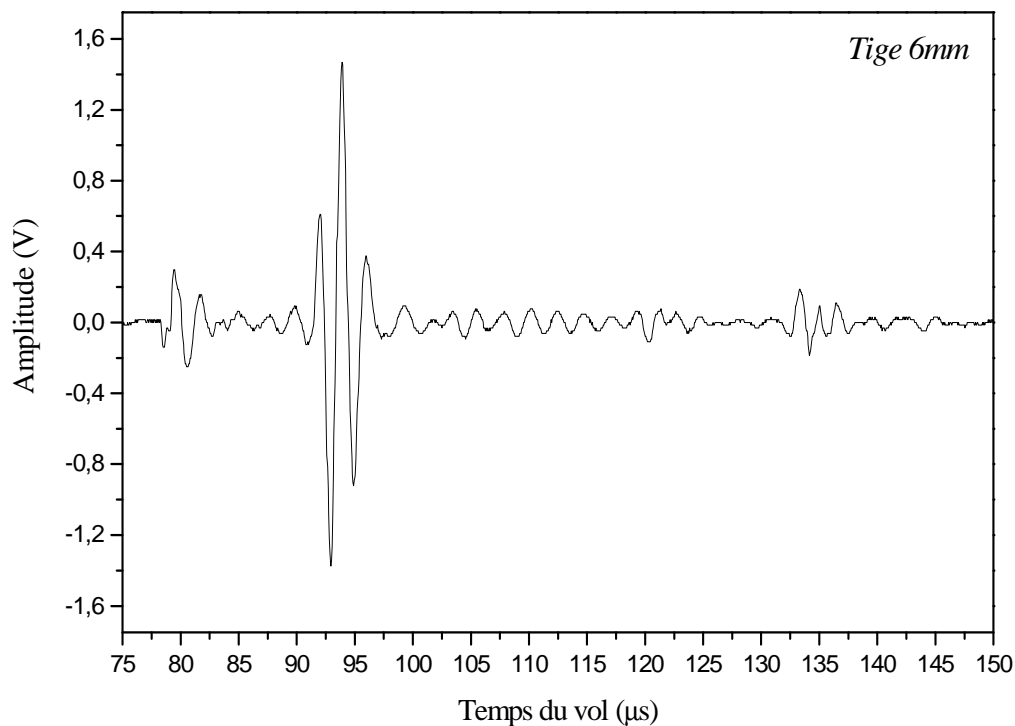


**Figure 5. 4. Type des signaux rétrodiffusés par la tige 6mm**

## 5.4. Étude de la réponse ultrasonore des tiges immergées dans l'eau.

### 5.4.1. Signal temporel

La diffusion d'une onde plane par des diffuseurs cylindriques et sphériques a été présentée plusieurs fois dans la littérature. Le cas le plus étudié est celui présenté par *Faran* [6] pour le cas du cylindre et de la sphère. Les longues expressions dans le cas du cylindre ont été reformulées sous forme de matrice par *Doolittle* et *Überall* [7]. Ensuite, des applications ont été faites par *Maze et al.* [8] et *Ripoche et al.* [9] sur la diffusion des ondes planes ultrasonores par un cylindre massif et insoné normalement à son axe, et ils ont montré que ces ondes sont strictement influencées par la propagation des ondes de surface. Puis, *Maze et al.* [10] ont montré que la vitesse de ces ondes dépend de la fréquence de l'onde et du rayon de la cible. Dans la figure 5.5 nous représentons le signal temporel, rétrodiffusé par la tige en fer de diamètres 6mm, obtenu en utilisant même transducteur de 0,5MHz et de bande passante entre 0,2 et 0,8MHz. On remarque que les deux premiers échos diffusés par la tige sont nettement visibles.

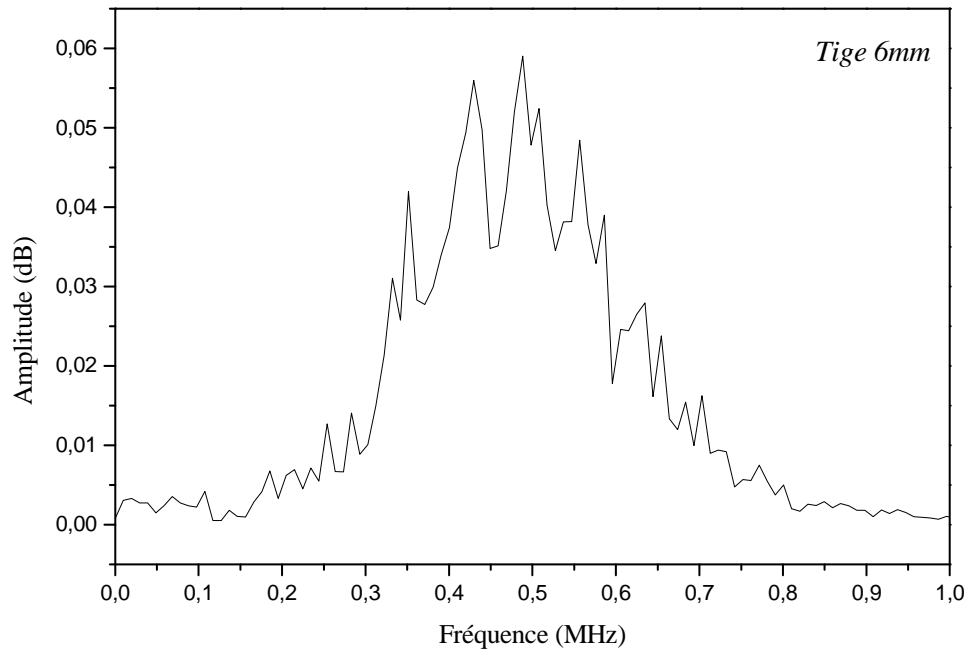


**Figure 5. 5. Signal temporel rétrodiffusé par la tige 6mm.**

### 5.4.2. Spectre de rétrodiffusion

Les résultats théoriques, obtenus par *Überall et al.* [11] et *Ugincius et Überall* [12], montrent que la structure complexe des ondes obtenue est liée à la propagation d'ondes circonférentielles (ondes de type de Rayleigh) qui forment des ondes stationnaires sur la circonférence de la cible (Cylindre, sphère...). Pour obtenir les amplitudes spectrales et les phases des échos nous appliquons

la Transformée de Fourier rapide (*FFT*) aux signaux temporels. Ces amplitudes spectrales sont en générale calculées en se limitant au cas de la rétrodiffusion. Dans la figure 5.6 nous présentons le spectre rétrodiffusé par la tige 6mm



**Figure 5. 6. Spectre rétrodiffusé par la tige 6 mm**

#### 5.4.3. Vitesse du groupe $V_g$

La vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans un solide est une propriété importante qui est utilisé dans l'évaluation non destructive pour évaluer la rigidité de matériaux. Les techniques classiques utilisées pour effectuer des mesures de la vitesse dans le matériau sont besoin de connaitre l'épaisseur du matériau étudié et le temps du vol des échos réfléchies entre les deux interfaces limitant le matériau. Dans le tableau 5.2 nous représentons la vitesse du groupe calculée par la relation (5.1). Le temps du vol entre deux échos, dus à la réflexion d'ondes de surface, est déterminé.

Diamètre des tiges $d$ (mm), $d = 2a$	Temps du vol des échos ( $\mu s$ )		$\Delta t$ ( $\mu s$ )	$V_g = \pi d / \Delta t$ (m/s)
	Écho $E_1$	Écho $E_2$		
Tige 6mm	78,30	89,95	11,65	1617,17

**Tableau 5. 2. Vitesse du groupe  $V_g$  de l'onde circonférentielle diffusée. Tige 6mm**

### 5.5. Application aux mortiers renforcés par les tiges en fer

Les ouvrages en béton tiennent une grande part de leurs propriétés mécaniques et de leurs armatures. Le premier réseau de ferrailage se situe à quelques centimètres de profondeur sous la

surface (entre 2 et 6 cm). Cette couche de béton, appelée béton d'enrobage, est en contact direct avec le milieu extérieur et soumise aux dégradations. Le principal rôle de cette couche est d'assurer la protection de ces armatures contre les agents agressifs venant du milieu ambiant entourant l'ouvrage (air, eau, ions, . . .) [13]. Il est donc important de déterminer les caractéristiques de cette couche du béton (Vitesse ultrasonore dans le béton, la profondeur des armatures dans le béton...).

Les méthodes non destructive utilisant la propagation des ondes mécaniques pour évaluer le béton peuvent être utilisées pour obtenir des informations à différentes échelles (millimétrique, centimétrique, voire dizaine de centimètres) en fonction de la longueur d'onde utilisée [14]. Les ondes acoustiques peuvent être employées aussi pour détecter des fissures, des vides, ou mesurer des épaisseurs.

### 5.5.1. Vitesse ultrasonore dans le mortier

#### 5.5.1.1. Géométrie du problème

La structure de mortier (béton) est préparée dans des moules d'épaisseur de 6cm. La description de la préparation de ces échantillons est décrite au paragraphe 5.2. Le schéma de la figure 5.7 présente le parcours de différents signaux rétrodiffusés par le mortier. Ces échantillons sont situés à une distance de 2cm avec le transducteur.

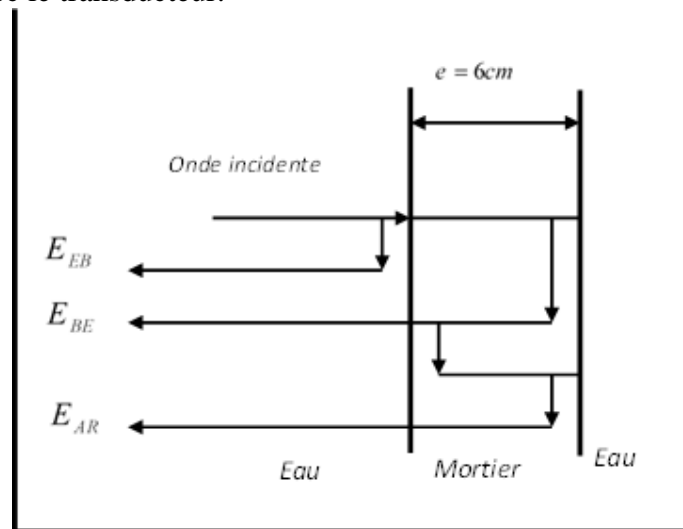
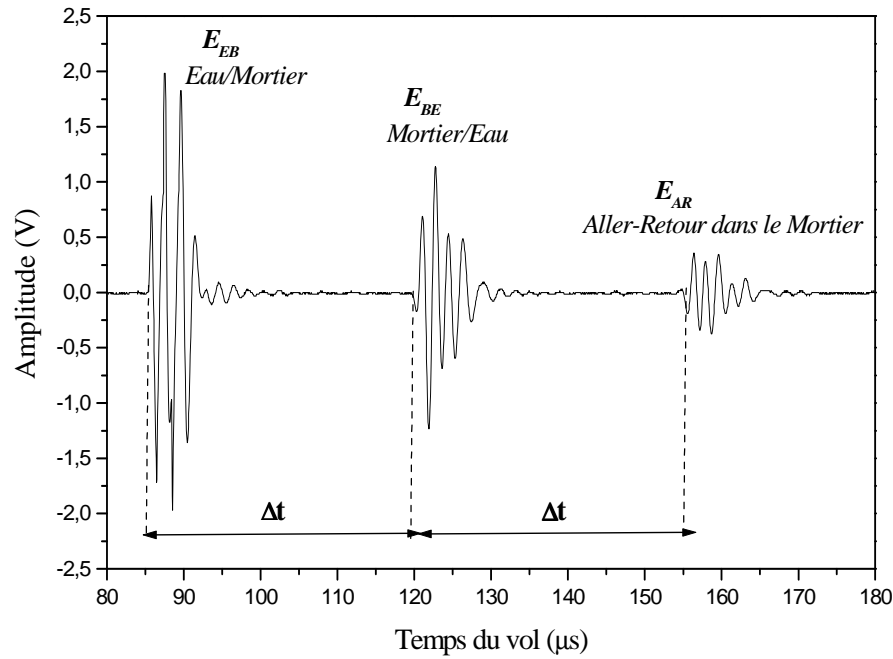


Figure 5. 7. Parcours du signal dans le mortier

La figure 5.8 présente type des signaux ultrasonores rétrodiffusés par une structure de mortier de forme parallélépipédiques et d'épaisseur 6cm (figure 5.7). Ce signal comporte un écho principal  $E_{EB}$  qui correspond à la réflexion de l'onde incidente sur l'interface entre l'eau et le premier plan du mortier. Puis des échos secondaires,  $E_{BE}$  qui correspond à la réflexion de l'onde incidente sur l'interface entre le deuxième plan du mortier et l'eau, et l'écho  $E_{AR}$  correspond à un aller retour de l'onde dans l'épaisseur du mortier.



**Figure 5. 8. Types des signaux rétrodiffusés par une structure de mortier.**

#### 5.5.1.2. Détermination de la vitesse ultrasonore dans le mortier

Grâce aux propriétés piézoélectriques du transducteur l'énergie électrique émise est transformée en énergie mécanique ultrasonore, le transducteur détecte les temps du chaque échos au cours de la propagation de l'onde dans les différentes interfaces du mortier et l'eau. Connaissant donc l'épaisseur  $e$  du mortier, il est possible de déterminer la vitesse de propagation de l'onde dans le mortier, elle est exprimée par la formule (5.2).

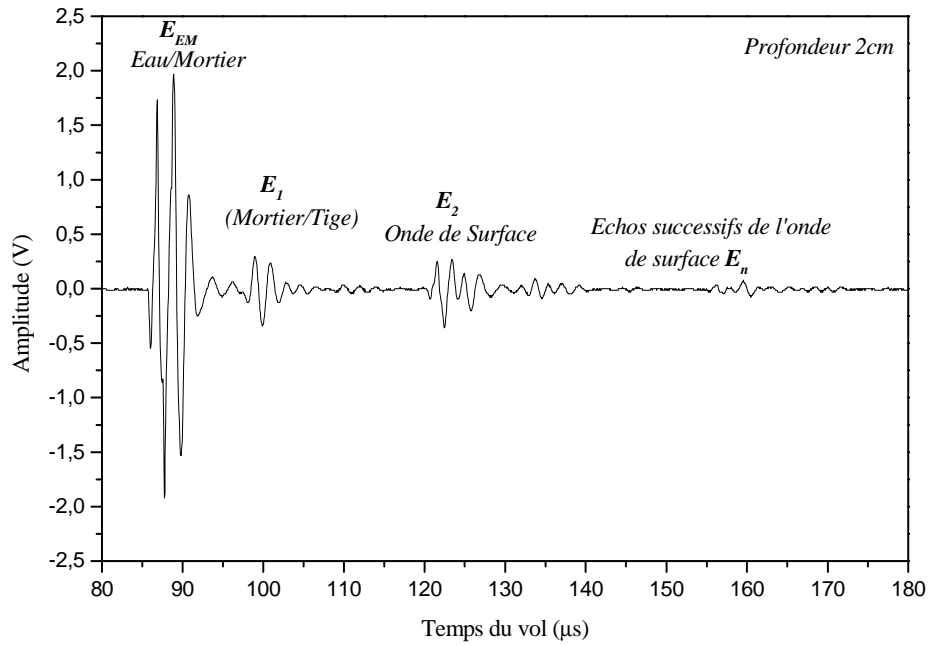
$$V_{mor} = \frac{2e}{\Delta t} \quad (5.2)$$

Où  $\Delta t = 34,7 \mu s$  est la variation du temps de vol entre les échos  $E_{EB}$  et  $E_{BE}$  (figure 5.8).  $e$  est l'épaisseur du mortier  $e = 6cm$ . Par conséquent, la vitesse ultrasonore dans le mortier est égale à  $V_{mor} = 3458,21 m/s$ .

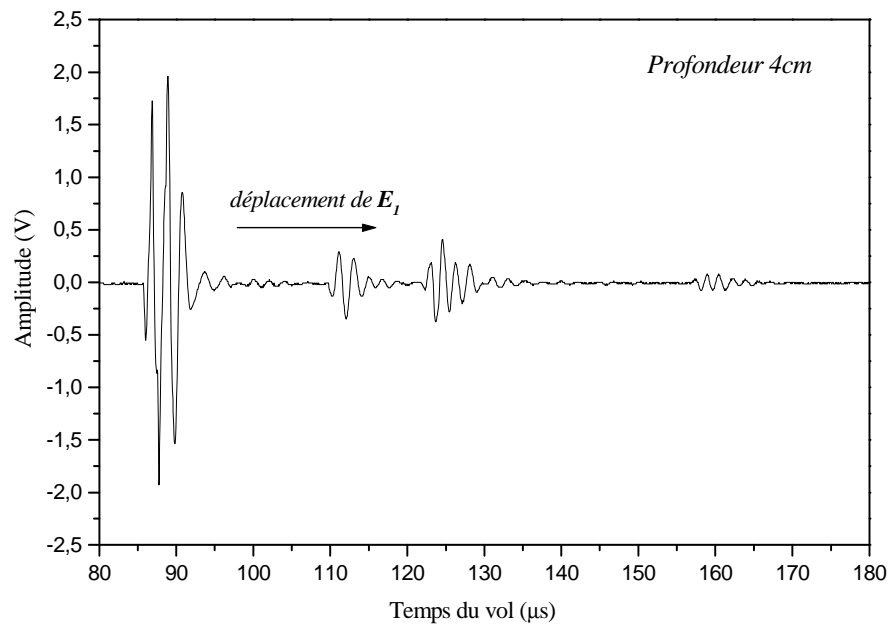
#### 5.5.2. Échos du signal rétrodiffusé par le mortier renforcé par le fer.

La figure 5.9 représente type des signaux obtenus pour des acquisitions à travers des structures d'enrobage de longueur égale à 10 cm. Ce signal comporte un écho principal  $E_{EB}$  d'environ  $8,25 \mu s$ , qui correspond à la réflexion de l'onde incidente sur l'interface entre l'eau et le premier plan du mortier.  $E_1$  correspond à la réflexion entre le mortier et la tige,  $E_2$  convient à des allers retours de l'onde de surface autour de la circonférence de la tige. Enfin les échos  $E_n$  correspondent à des réflexions successives de l'onde de surface. En comparant la position de l'écho  $E_1$  dans les figures

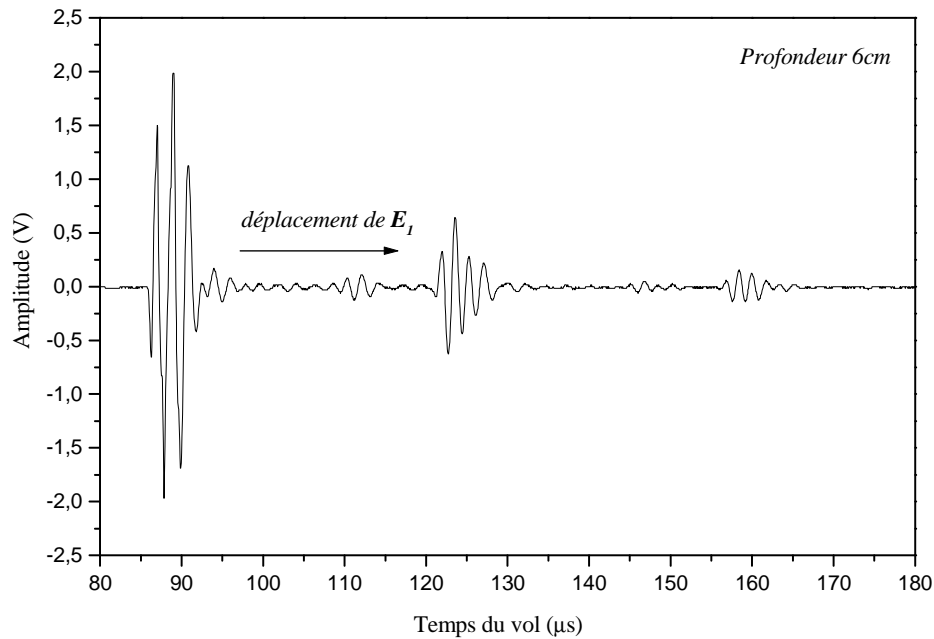
5.9, 5.10 et 5.11. On remarque que l'écho  $E_1$  se déplace vers  $E_2$  lorsqu'on varie la profondeur de la tige dans la couche du mortier.



**Figure 5. 9. Signal rétrodiffusé par la tige 6mm enfouie dans le mortier, p=2cm**



**Figure 5. 10. Signal rétrodiffusé par la tige 6mm enfouie dans le mortier, p=4cm**



**Figure 5. 11. Signal rétrodiffusé par la tige 6mm enfouie dans le mortier, p=6cm**

### 5.5.3. Détermination de la profondeur de la tige

Les armatures en fer sont utilisées dans le domaine de génie civil en tant qu'armatures de renforcement par lequel on obtient des bétons armés. Elles sont introduites dans le béton pour améliorer la résistance des dalles, poutres et des ouvrages d'art (bâtiments, maison, édifices ...). Le diamètre et la profondeur des armatures dans le béton peuvent garantir la rigidité et la qualité des structures d'enrobage en termes de la nature de fer utilisé. L'utilisation des ultrasons apparaît comme une solution qui permet de déterminer la profondeur des armatures dans le béton et d'évaluer leurs diamètres dans le béton. L'utilisation des ondes ultrasonores permet aussi de localiser les armatures en fer, identifier les zones altérées ou fissurées près de la surface des ouvrage en béton et d'évaluer l'épaisseur d'une structure de béton [15]. À partir des signaux temporels rétrodiffusés par le béton armé, nous déterminons le temps du vol entre les deux échos  $E_{EB}$  et  $E_I$  dus respectivement à la réflexion aux interfaces eau/mortier et mortier/tige. En conséquence, la profondeur de la tige dans la structure est déterminée par la relation suivante :

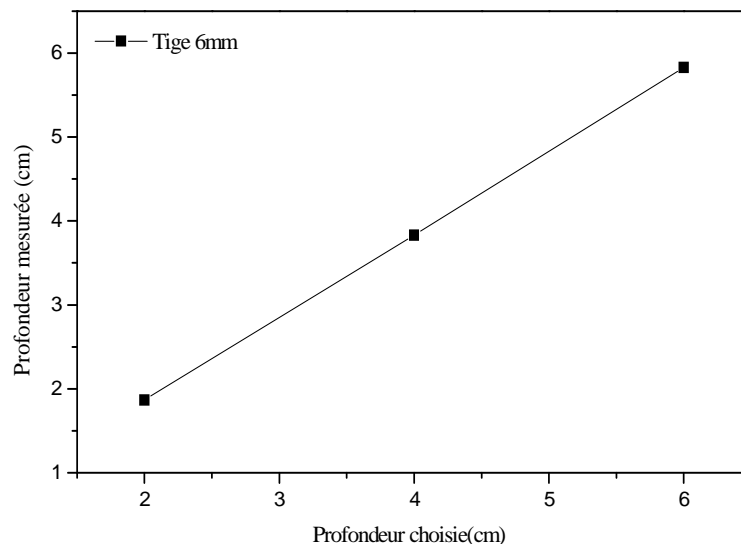
$$p = \frac{(V_{mor} \times \Delta t)}{2} \quad (5.3)$$

Le tableau 5.3 représente les résultats obtenus pour les différentes structures d'enrobage de diamètre 6mm et de profondeur choisis. L'erreur  $|\Delta p|$  est la variation entre la profondeur choisie et la profondeur mesurée. En valeur moyenne, cet erreur est d'ordre 0,158cm pour la tige de diamètre 6mm.

Diamètres des Tiges (d)	Profondeur choisie (p)	Temps du vol des échos ( $\mu s$ )		$\Delta t$ ( $\mu s$ )	Profondeur mesurée $p=(V_{mr} \times \Delta t)/2$ (cm)	L'erreur $ \Delta p $ (cm)
		Écho $E_{EB}$	Écho $E_I$			
6mm	2cm	85,40	96,20	10,80	1,867	0,133
	4cm	85,40	107,55	22,15	3,830	0,170
	6cm	85,40	119,10	33,70	5,827	0,173

**Tableau 5. 3. Détermination de la profondeur de la tige dans la structure d'enrobage**

Pour tous les échantillons réalisés l'épaisseur de la couche du mortier d'enrobage est invariable et fixe à 10cm, et toutes les acquisitions ont été réalisées avec le même transducteur qui nous permet d'évaluer la variation de la profondeur des tiges enrobées. Dans la figure 5.12 nous montrons l'allure comparative entre la profondeur choisie et la profondeur mesurée. Nous remarquons que cette courbe est linéaire, ça vaut dire qu'il a une coïncidence entre la profondeur choisie et celle déterminée par mesure ultrasonore. En effet, la vitesse du groupe ultrasonore est un outil important pour déterminer la profondeur des armatures dans les couches du mortier (béton).

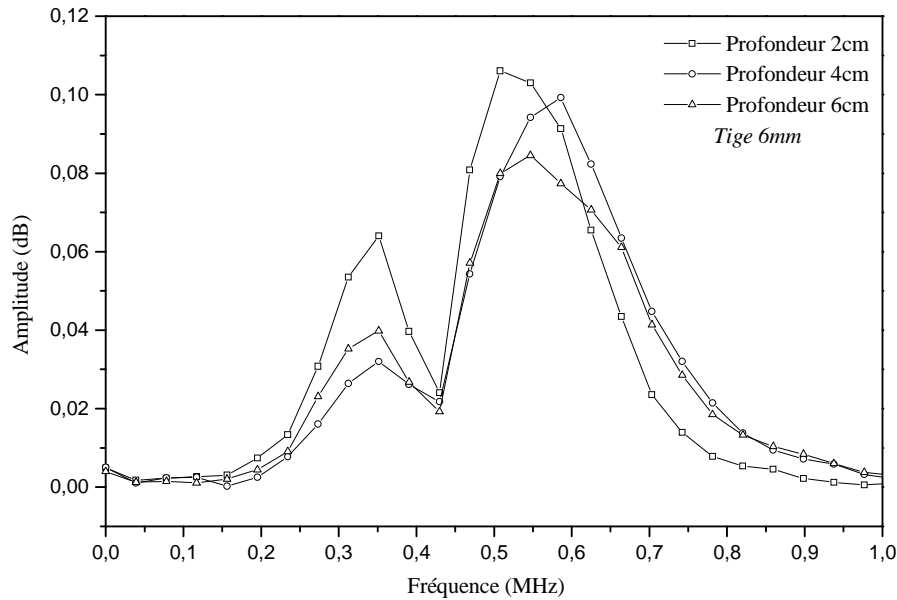
**Figure 5. 12. Comparaison de la profondeur mesurée et choisie.**

#### 5.5.4. Amplitude spectrales de l'écho $E_2$

Dans ce paragraphe, nous allons représenter les amplitudes spectrales obtenues à partir de filtrage de l'écho  $E_2$  due à la réflexion sur la circonférence de la tige enrobée par le mortier. Pour ceci nous isolons l'écho dans son domaine de temps du vol et nous déterminons le spectre rétrodiffusé (l'amplitude en fonction de la fréquence). La figure 5.13 illustre la variation de l'amplitude spectrale en fonction de la fréquence. L'interprétation de ces courbes permet d'observer l'influence de la profondeur de la tige dans la structure, et que l'amplitude spectrale est diminuée avec l'augmentation de la profondeur des tiges cylindriques enfouies dans le mortier. Nous



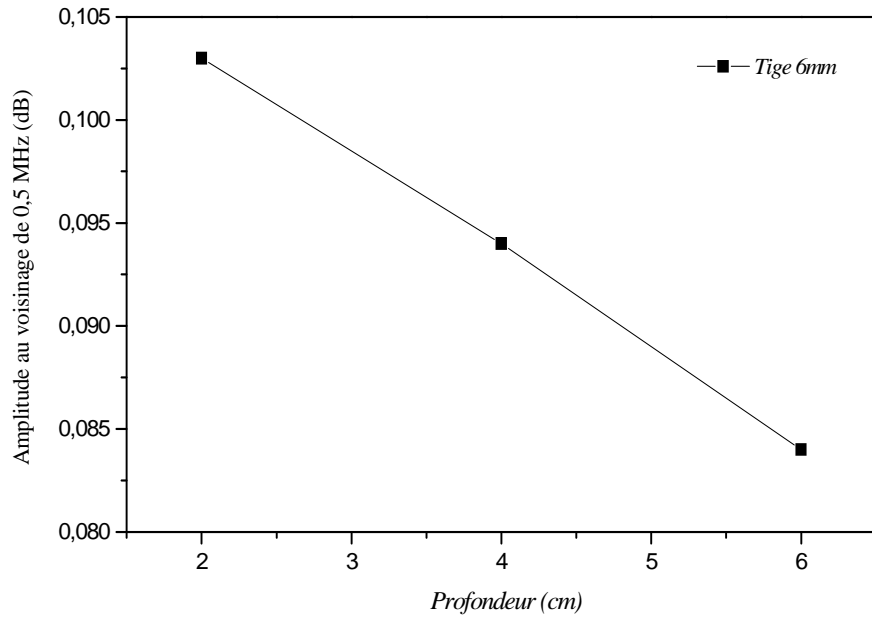
constatons aussi dans ces spectres qu'ils ont presque la même bande passante et leurs maximums sont approximativement correspond à des valeurs voisines de 0,5 MHz qu'est exactement la fréquence du transducteur utilisé. Ce qui montre qu'il n'a pas de dispersion des ondes. Dans le tableau 5.4, nous représentons les valeurs des maximums de l'amplitude spectrale pour la tige 6mm et pour les profondeurs 2, 4 et 6cm. Dans la figure 5.14, nous montrons les variations de l'amplitude spectrale en fonction de la profondeur.



**Figure 5. 13. Spectre rétrodiffusé (l'écho  $E_2$ ), tige 6 mm enrobée par le mortier.**

<i>Profondeur p (cm)</i>	<i>Amplitude en dB</i>
2	0,103
4	0,094
6	0,084

**Tableau 5. 4. Amplitude spectrale au voisinage de 0,5 MHz, tige 6mm**



**Figure 5. 14. Variation de l'amplitude spectrale en fonction de la profondeur de la tige.**

#### 5.5.5. Détermination de diamètre des tiges enrobées par le mortier

Le tableau 5.5 représente les variations du temps du vol  $\Delta t$  entre les échos  $E_1$  et  $E_2$ . Le diamètre de la tige est déterminé à partir de la relation (5.1) soit donc la relation (5.4).

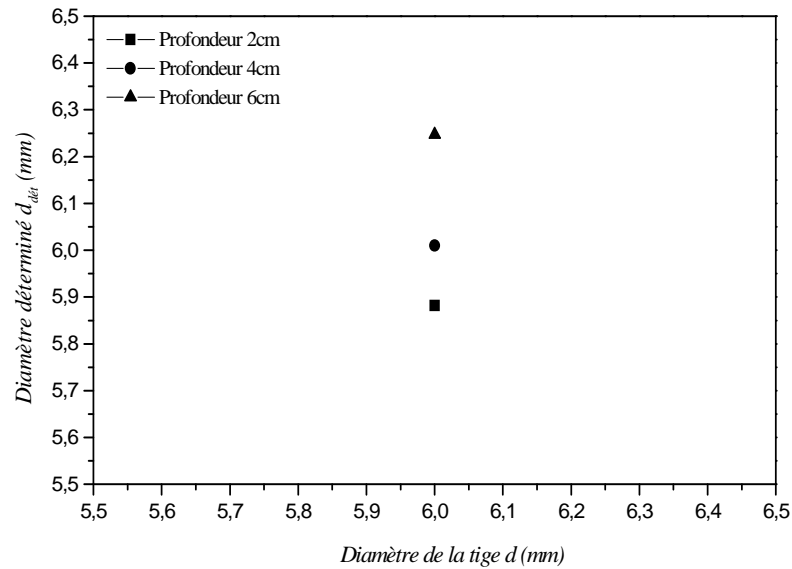
$$d_{\text{dét}} = \frac{V_g \times \Delta t}{\pi} \quad (5.4)$$

Dans la figure 5.15 nous représentons le diamètre déterminé  $d_{\text{dét}}$  en fonction de diamètre de la tige  $d$ . En remarque que les diamètres  $d_{\text{dét}}$  déterminés sont proche au diamètre réel de la tige. Par conséquent, ce résultat nous permet de faire la résolution inverse dans le but de déterminer le diamètre de la tige enrobée par le mortier.

Il est clair donc que nous pourrions facilement distinguer entre les tiges utilisées dans les ouvrages, en se basant sur la mesure de la vitesse du groupe des ondes circonférentielles rétrodiffusées par les tiges enrobées. La comparaison des diamètres déterminés pour les deux cas (tige isolée ou enrobée) montre que le mortier (béton) d'enrobage n'a pas une grande influence sur la rétrodiffusion des ondes circonférentielles des tiges enrobées.

Diamètres des Tiges, $d = 2a$	Profondeur ( $p$ )	Temps du vol des échos ( $\mu s$ )		$\Delta t$ ( $\mu s$ )	$d_{\text{dét}} = V_g \times \Delta t / \pi$ (mm)
		Écho $E_1$	Écho $E_2$		
6mm	2cm	96,20	107,62	11,42	5,882
	4cm	107,55	119,22	11,67	6,010
	6cm	119,10	131,23	12,13	6,247

**Tableau 5. 5. Diamètres déterminés quand les tiges sont enrobées.**



**Figure 5. 15. Diamètre déterminé  $d_{det}$  en fonction de diamètre de la tige  $d$**

## 5.6. Conclusion

Pour une analyse de béton armé, nous avons mis au point une technique d'investigation non destructive pour étudier les signaux rétrodiffusés par les structures cimentaires renforcées par des tiges en fer. Cette méthode est basée sur l'analyse des signaux temporels rétrodiffusés par différents mortiers renforcés par le fer. La mesure de la vitesse du groupe des ondes de surface rétrodiffusées par la circonférence de la tige 6mm permet de déterminer son diamètre et leur profondeur dans la couche du mortier.

Les résultats obtenus témoignent que l'utilisation des ondes ultrasonores permet d'évaluer le mortier (béton) d'enrobage et localiser les armatures dans la couche de mortier, en déterminant leurs diamètres (épaisseurs) et leurs profondeurs. Pourtant, la validation de cette méthode nécessite des travaux supplémentaires comme l'étude de l'interface fer/mortier, car il joue un rôle important sur la résistance et la qualité des structures renforcées (béton armé).

## 5.7. Références bibliographiques

- [1] D.G. Aggelis, E.Z. Kordatos, M. Strantza, D.V. Soulioti, et T.E. Matikas. " NDT approach for characterization of subsurface cracks in concrete". *Construct. Build. Mat* .Volume 25, Issue 7, Pages 3089–3097 (2011).
- [2] M.Ismail, B.Muhammad, E.Ismail." Compressive strength loss and reinforcement degradations of reinforced concrete structure due to long-term exposure", *Construction and Building Materials*, Volume 24, Issue 6, Pages 898–902 (2010).
- [3] G.Quentin, M. de Billy, A.Hayman. "Comparison of backscattering of short pulse solid spheres and cylinders at large  $ka$ ". *J.Acoust.Sco.Am*. 70, pp. 870-878. (1981).

- [4] Faiz. B, Maze.G, Decultot. D, Aassif. E and Ezzaidi. M, “ Ultrasonic characterization of the quality of an epoxy resin polymerization “.IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics ,and frequency control, vol. 46, pp.188-196, No. 1, (1999).
- [5] Pascal Rembert, "Etude des résonances acoustiques par des méthodes quasi harmoniques et impulsionsnelles phase spéculaire", thèse de doctorat, Université du Havre. (1991). Pp207.
- [6] J.J. Faran." Sound scattering by solid cylinders and spheres". *J. Acoust. Soc. Am.* , 23(4) 405–418, (1951).
- [7] R.D. Doolittle and H. Uberall. Sound scattering by elastic cylindrical shells". *J. Acoust. Soc. Am.* , 39(2) :272–275, (1966).
- [8] Maze .G, Mercier, Marical. S et Lecroq. F , " Diffusion d'une Onde Acoustique Plane Par Des Sphéroïdes ", *J. Phys. Colloques* 51, C2-419-C2-422,(1990).
- [9] Ripoché. J, Maze.G, and Izbicki J.L, “ A new acoustic spectroscopy: Resonance spectroscopy by the MIIR “, *J. Non destructive Evaluation*, vol. 5, no. 2, pp. 69-79, (1985).
- [10] Maze G, Ripoché J, Derem A and Rousselot J L, " Diffusion d'une onde ultrasonore par des tubes remplis d'air immergés dans l'eau ", *Acustica*, pp 55- 69, (1984).
- [11] Überall, H., Dragonette, L. R., Flax, L., *J. Acoust.Soc. Amer.* 61 711. (1977)
- [12] Ugincius and H. Uberall. "Creeping-Wave Analysis of Acoustic Scattering by Elastic Cylindrical Shells." *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 43. p. 1025. (1968)
- [13] P.E. Grattan-Bellew. "Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes". *Construct. Build. Mat.* , 10(1) :3–16, (1996).
- [14] D. Breyse and O. Abraham. "Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en bétons" . Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, (2005).
- [15] ASTM D4748-06 "Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar", Norme ASTM, (2006).

# Conclusion générale

Nous avons présenté, dans cette thèse, une technique de contrôle non destructif (CND) basée sur l'émission des ondes ultrasonores et l'analyse des signaux rétrodiffusés par les matériaux en question. Le travail effectué avait pour objectif d'intégrer cette technique de caractérisation ultrasonore pour détecter l'endommagement des matériaux cimentaires hétérogènes et de suivre l'évolution de leur hydratation en temps réel. Pour cela nous avons choisi d'étudier la structuration des mortiers suivant la microstructure du sable et la température du milieu d'hydratation. Nous avons étudié aussi la réponse ultrasonore des tiges en fer de diamètre 6mm enfouies dans une couche de mortier (béton) aux profondeurs 2, 4 et 6 cm.

Une analyse théorique des ondes ultrasonores nous a permis d'établir les expressions des paramètres ultrasonores suivants, l'atténuation, coefficient de réflexion, impédance acoustique et vitesse de propagation. Le suivi du durcissement des mortiers est effectué par la détermination de ces paramètres en utilisant un transducteur piézoélectrique de fréquence centrale égale à 0,5MHz.

À partir des résultats présentés dans ce travail, nous avons remarqué que l'hydratation de mortier se déroule en quatre périodes avant son durcissement. La période initiale qui s'interprète par une diminution rapide de coefficient de réflexion dans la première heure d'hydratation, en suite la période dormante où la vitesse ultrasonore devient minimum, dans ce stade le mortier passe de l'état visqueux à un solide insoluble dans l'eau. Après il viendra la période de la prise, dans laquelle l'atténuation devient nulle. Dans cette période la valeur de l'impédance acoustique du mortier atteint celle de plexiglas, et l'atténuation change ensuite de signe et augmente en valeur absolue. Cette évolution de l'atténuation est liée à l'augmentation de la rigidité du mortier. Enfin, la période de durcissement au cours de laquelle la vitesse ultrasonore augmente rapidement et tend vers une valeur constante à la fin de l'évaporation totale de l'eau dans le mortier.

Les courbes qui représentent les variations de la vitesse ultrasonore peuvent être découpées en trois phases : Une phase rapide d'hydratation, une phase lente et une phase de stabilité. Nous avons remarqué que l'augmentation de la vitesse ultrasonore est directement liée à la diminution de la porosité de la pâte de mortier qui est due à la consommation totale de l'eau dans le mortier. Pour le

mortier réalisé par les tailles de sable 0,315mm, la vitesse mesurée passe de 2550 m/s à 24h pour atteindre 2900 m/s à 48h. À partir de 48h à 72h la vitesse passe de 2900 m/s à 3020 m/s. Dans cette intervalle du temps la valeur de l'atténuation diminue et elle passe de 248 jusqu'à 109 Np/m. Ces variations montrent le durcissement du mortier et la diminution partielle de la teneur en eau qui ralentit la vitesse ultrasonore.

Nous avons constaté également que la présence des impuretés dans les petites tailles du sable et leur composition minérale inhibe la prise et le durcissement des mortiers. De même pour les grosses tailles du sable, la vitesse ultrasonore et l'amplitude réfléchie sont faibles en raison de l'interconnexion entre les grains du sable d'où formation des anomalies, des vide et des fissures dans le mortier. Nous avons montré aussi que la prise des mortiers dépend de la température. Pour les températures jusqu'à 42°C, le durcissement est plus rapide, cependant le mortier est moins rigide. À l'inverse pour les températures inférieures à 25°C la montée de la vitesse est plus lente. En conséquence, la meilleure qualité et rigidité du mortier est celle réalisée avec des grains de tailles moyennes et à des températures avoisinantes de 25°C. Nous avons montré aussi que la mesure de la vitesse du groupe des ondes de surface rétrodiffusées par la circonférence de la tige, nous permet de déterminer son diamètre et profondeur dans la couche du mortier.

Les résultats obtenus dans cette étude témoignent l'utilisation des ondes ultrasonores pour suivre la prise et le durcissement des mortiers d'une part, et d'autre part d'évaluer le mortier d'enrobage et localiser le dimensionnement des tiges en fer dans le mortier en déterminant leur diamètre et leur profondeur. Pourtant la validation de cette méthode nécessite des résultats supplémentaires, à savoir l'interprétation des phénomènes physico-chimiques intervenant dans les premières heures d'hydratation et l'étude de l'interface fer/mortier, car il joue un rôle important sur la résistance à la compression et à la flexion des ouvrages.

Ce travail a donc permis de mettre en évidence l'intérêt des méthodes ultrasonores pour étudier différents processus des matériaux utilisés dans les grandes constructions cimentaires. Du fait de leur sensibilité, leur caractère non destructif et invasif et de leur rapidité d'investigation, cette technique s'avère bien adaptée pour le contrôle dans le domaine de génie civil.