

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene
Faculté de Physique



These de Doctorat
Présentée pour l'obtention du grade de Docteur
en: PHYSIQUE

Spécialité: Physique des Matériaux
par
Rafika AISSANI

Intitulée:

Propagation d'ondes ultrasonores de surface dans le béton

Soutenue publiquement, le 10 /02/2025 devant un jury composé de :

M. Mohamed	KECHOUANE	Professeur à l'U.S.T.H.B.	Président
M. Tarek	BOUTKEDJIRT	Professeur à l'U.S.T.H.B.	Directeur de thèse
M. Redouane	DRAI	Directeur de Recherche à l'C.R.T.I., Chéraga	Examineur
M. Said	KENAI	Professeur à l'U.S.D.B.1, Blida	Examineur
M. Mohand	AIT OUARABI	Maître de Conférences /A à l'U.S.T.H.B.	Examineur
Mme. Saliha	GACHI	Maître de Conférences /A à l'U.S.T.H.B.	Examinatrice
M. Kamal	ABDELLI	Maître de Conférences B à l'U.S.T.H.B.	Invité

Résumé

La caractérisation des matériaux par les méthodes ultrasonores est une technique très intéressante dans différents domaines. Parmi ces domaines, nous citons le domaine médical, l'industrie alimentaire et le domaine du contrôle non destructif (CND). La caractérisation des structures et des ouvrages en béton et leur contrôle en fait partie.

Le contrôle non destructif du béton par les ondes ultrasonores est effectué par des méthodes d'investigation non invasives. Ces méthodes ont l'avantage de caractériser le matériau sans dégradation et sans prélèvement (carottage), quelque que soit l'âge de la structure à contrôler.

Le processus corrosif du béton commence toujours de la surface qui est en contact direct avec le milieu extérieur et qui interagit avec les agents agressifs de l'environnement conduisant ainsi à la dégradation du matériau. Dans cette étude, nous nous intéressons à la caractérisation du béton d'enrobage qui couvre les armatures de la structure. Cette caractérisation est réalisée en utilisant des ondes ultrasonores de surface (onde de Rayleigh) qui se propagent près de la surface à quelques centimètres de profondeur.

Le béton est un matériau poreux, fortement hétérogène. L'étude de ce matériau est conduite analytiquement, numériquement et expérimentalement.

L'étude théorique est basée sur les propriétés des ondes de surface se propageant dans un matériau homogène, isotrope et élastique ou viscoélastique. L'étude est, par la suite, généralisée à la propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu hétérogène comme le béton. La théorie du milieu effectif et les modèles d'homogénéisation, ISA et de Waterman et Truell, permettent de prédire la propagation de ce type d'ondes dans un milieu hétérogène qui se compose d'une matrice et des inclusions. La simulation numérique permet de prévoir les variations de vitesse de phase dans le matériau hétérogène qui est le béton et pour différentes concentrations d'hétérogénéités.

L'étude expérimentale est appliquée à des spécimens de béton pour lesquels un paramètre de composition, à savoir le rapport eau/ciment (E/C), est varié. Ce dernier affecte la densité et la porosité du matériau et donc ses propriétés mécaniques. En outre, l'évolution des paramètres acoustiques et mécaniques du béton pendant sa période de durcissement est étudiée. Les paramètres acoustiques tels que les vitesses de phase et de groupe des ondes de Rayleigh ainsi

que le coefficient d'atténuation sont déterminés, en exploitant le temps de vol et l'amplitude des signaux ultrasonores reçus.

Cette étude montre que la variation du rapport eau/ciment affecte la vitesse de propagation des ondes de surface et entraîne également une variation de la résistance mécanique du béton. Elle conclut qu'il existe une forte corrélation entre la résistance du béton, la vitesse des ultrasons et le rapport eau/ciment.

Les résultats obtenus par l'évaluation destructive, qui fournit une mesure de la résistance à la compression par un essai d'écrasement mécanique, confirment ceux obtenus par l'évaluation non destructive. L'étude montre que ce type de contrôle non destructif utilisant les ondes ultrasonores de surface est utile, notamment lorsque la structure du béton n'est accessible qu'à partir de la surface ou lorsque la propagation des ondes de volume est perturbée par la présence d'armatures.

Mots clés : contrôle non destructif CND, béton d'enrobage, ondes ultrasonores de surface, onde de Rayleigh, rapport eau-ciment, homogénéisation, vitesse de propagation, coefficient d'atténuation, résistance à la compression, corrélation.

Abstract

The characterization of materials by using ultrasonic methods is a very interesting technique in various fields, such as the medical field, the food industry, and non-destructive testing (NDT) of materials. This also includes the characterization and testing of concrete structures.

Non-destructive testing of concrete using ultrasonic waves is carried out using non-invasive investigative methods. These methods have the advantage of characterizing the material without degradation or sampling (coring), whatever the age of the structure to be inspected is.

It is well known that the corrosive process in concrete always begins at the surface, which is in direct contact with the external environment and interacts with aggressive environmental agents, leading to material degradation. This study focuses on characterizing the concrete, which covers the structural reinforcement. This characterization is carried out using surface ultrasonic waves (Rayleigh waves) which propagate close to the surface to a depth of a few centimeters.

We have conducted the study of concrete, which is a porous, highly heterogeneous material, analytically, numerically, and experimentally.

The theoretical study is based on the properties of surface waves propagating in a homogeneous, isotropic, and elastic or viscoelastic material. It is then generalized to Rayleigh wave propagation in a heterogeneous medium such as concrete. The effective medium theory and the homogenization models of ISA, Waterman, and Truell are used to predict the propagation of this type of waves in a heterogeneous medium consisting of a matrix and inclusions. Numerical simulation is used to predict phase velocity variations in the heterogeneous material and for different heterogeneity concentrations.

The experimental study is applied to concrete specimens for which a composition parameter, namely the water/cement ratio (W/C), is varied. The latter affects the density and porosity of the material, and hence its mechanical properties. In addition, the evolution of the acoustic and mechanical parameters of concrete during its curing period is studied. Acoustic parameters such as the phase and group velocities of Rayleigh waves, as well as the attenuation coefficient, are determined by exploiting the time-of-flight (TOF) and the amplitude of the ultrasonic signals received.

This study shows that varying the water/cement ratio affects the propagation velocity of surface waves, and also leads to a variation in the mechanical strength of concrete. It concludes that there is a strong correlation between concrete strength, ultrasound velocity, and water/cement ratio.

The results obtained by destructive evaluation, which provides a measure of compressive strength using a mechanical crushing test, confirm those obtained by non-destructive evaluation. The study shows that this type of non-destructive testing using surface ultrasonic waves is particularly useful when the concrete structure is accessible only from the surface, or when the propagation of bulk waves is disturbed by the presence of the reinforcement.

Keywords: non-destructive testing (NDT), coating concrete, surface ultrasonic waves, Rayleigh wave, water-cement ratio, homogenization, propagation velocity, attenuation coefficient, compressive strength, correlation.

توصيف المواد باستخدام طرق الموجات فوق الصوتية هو تقنية مثيرة للاهتمام للغاية في مختلف المجالات. وتشمل هذه المجالات المجال الطبي وصناعة الأغذية ومجال الاختبارات غير المدمرة (NDT). ويشمل ذلك توصيف الهياكل الخرسانية وفحصها.

يتم إجراء الاختبارات غير المدمرة للخرسانة باستخدام الموجات فوق الصوتية بطرق الفحص غير المتلفة. وتتميز هذه الطرق بميزة توصيف المادة دون تدهور أو أخذ عينات (عن طريق الحفر)، مهما كان عمر الهيكل المراد فحصه.

دائمًا ما تبدأ عملية التآكل في الخرسانة من السطح الذي يكون على تماس مباشر مع البيئة الخارجية ويتفاعل مع العوامل العدوانية في البيئة مما يؤدي إلى تدهور المادة. في هذه الدراسة نهتم بتوصيف الخرسانة التي تغطي تسليح الهيكل. يتم إجراء هذا التوصيف باستخدام الموجات فوق الصوتية السطحية (موجات رايلي) التي تنتشر بالقرب من السطح إلى عمق بضعة سنتيمترات. أجرينا دراسة الخرسانة وهي مادة مسامية وغير متجانسة للغاية تحليليًا وبالمحاكاة وكذا تجريبيًا.

تعتمد الدراسة النظرية على خصائص الموجات السطحية المنتشرة في مادة متجانسة ومتساوية الخواص ومرنة أو لزجة مرنة. ثم يتم تعميم الدراسة على انتشار موجات رايلي في وسط غير متجانس مثل الخرسانة. تتيح نظرية الوسط الفعلي ونماذج التجانس ISA و Truell & Waterman إمكانية التنبؤ بانتشار هذا النوع من الموجات في وسط غير متجانس يتكون من مصفوفة وشوائب. يتم استخدام المحاكاة العددية للتنبؤ بتغيرات سرعة الطور في المادة غير المتجانسة أي الخرسانة، ولتركيزات مختلفة لعدم التجانس.

يتم تطبيق الدراسة التجريبية على عينات الخرسانة التي يتنوع فيها معامل التركيب، أي نسبة الماء/الأسمنت (W/C). يؤثر ذلك على كثافة ومسامية المادة وبالتالي على خواصها الميكانيكية. بالإضافة إلى ذلك، تمت دراسة تطور الخواص الصوتية والميكانيكية للخرسانة خلال فترة النضج. يتم تحديد الإعدادات الصوتية مثل الطور والسرعات الجماعية لموجات رايلي ومعامل الإخماد من خلال استغلال زمن التحليق (الانتشار) وسعة الإشارات فوق الصوتية المستقبلية.

تُظهر هذه الدراسة أن التباين في نسبة الماء/الأسمنت يؤثر على سرعة انتشار الموجات السطحية ويؤدي أيضًا إلى تباين في القوة الميكانيكية للخرسانة. وتخلص الدراسة إلى وجود علاقة قوية بين قوة الخرسانة وسرعة الموجات فوق الصوتية ونسبة الماء/الأسمنت.

تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها من التقييم التدميري، الذي يوفر مقياسًا لقوة الانضغاط باستخدام اختبار التكسير الميكانيكي، النتائج التي تم الحصول عليها من التقييم غير التدميري. تُظهر الدراسة أن هذا النوع من الاختبارات غير المدمرة باستخدام الموجات فوق الصوتية السطحية مفيد بشكل خاص عندما يكون الهيكل الخرساني متاحًا فقط من السطح أو عندما يكون انتشار الموجات الحجمية مضطربًا بسبب وجود التسليح.

الكلمات المفتاحية: الاختبار غير المدمر (NDT)، خرسانة التغليف، الموجات فوق الصوتية السطحية، موجات رايلي، نسبة الماء إلى الأسمنت، التجانس، سرعة الانتشار، معامل الإخماد، قوة الضغط، الارتباط

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein de l'Equipe de Recherche Physique des Ultrasons du Laboratoire de Physique des Matériaux de la Faculté de Physique de l'USTHB.

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu de m'avoir donné la force, la volonté et la patience nécessaires à la réalisation de ce travail.

J'adresse, particulièrement, à mon directeur de thèse, Monsieur le Professeur Tarek BOUTKEDJIRT, mes sincères remerciements pour l'encadrement de cette thèse. Son savoir, son expérience, ses conseils sur l'orientation à suivre et sa compétence m'ont été d'une grande utilité dans le bon déroulement de mon travail de recherche.

Un immense merci à Mohamed KECHOUANE, Professeur à l'USTHB, d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Mes profonds remerciements vont également aux membres de Jury qui m'ont fait l'honneur de lire ce manuscrit : Dr. Mohand AIT OUARABI, MCA, enseignant-chercheur à l'USTHB, Dr. Saliha GACHI, MCA, enseignante-chercheuse à l'USTHB, M. Said KENAI, Professeur en génie civil à USDB1, Blida et Dr. Redouane DRAI, Directeur de recherche au CRTI, Chéraga, d'avoir accepté de juger ce travail en tant qu'examineurs.

J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur Kamel ABDELLI, MCB, enseignant-chercheur à la faculté du génie civil de l'USTHB pour m'avoir donné mes premières connaissances dans le domaine du génie civil. Merci pour votre aide et vos conseils.

J'adresse toute ma gratitude à l'égard des membres de l'Equipe de Recherche Physique des Ultrasons du Laboratoire Physique des Matériaux pour leur accueil et conseils : Mme D. BELGROUNE, Mme S. IDJIMARENE, Mme S. DJILI, Mme B. ALOUACHE, Mme A. OUDINA, Mme N. BAHBAH, M. N. MAGHLAOUI et un grand merci pour Mme H. KHELLADI.

Je remercie également ma collègue H. Slimani pour son encouragement et le temps agréable que nous avons passé ensemble.

Je remercie chaleureusement mes chers parents, pour leurs encouragements et leur présence durant toutes mes années d'étude. Grâce à eux, je suis là où je suis aujourd'hui.

Mes grands remerciements à mon mari Mohammed Elhafed. Merci pour ton soutien, encouragements et ta patience.

Je n'oublie pas mes chers frères et sœurs et mes amies particulièrement Sana, Fatma et Leila.

Je voudrais remercier tous ceux qui m'ont soutenue et encouragée pendant mes années d'études.

Table des matières

Résumé.....	
Abstract.....	
ملخص.....	
Introduction générale.....	I
Chapitre 1 : Caractéristiques du béton	
Introduction.....	1
1.1 Constitution des bétons.....	1
1.2 Avantages et inconvénients du béton.....	1
1.3 Production du ciment portland.....	2
1.4 Ajouts cimentaires	2
1.5 Adjuvants chimiques	2
1.6 Rapport eau-ciment E/C.....	3
1.7 Types de bétons	3
1.8 Autres classifications de bétons.....	4
1.9 Formulation du béton.....	5
1.10 Cure.....	5
1.11 Béton d'enrobage.....	6
1.12 Propriétés mécaniques.....	6
1.13 Caractéristiques du béton durci.....	8
1.14 Relation entre la contrainte et la déformation dans le béton.....	16
Conclusion.....	16
Chapitre 2 : Généralité sur la propagation des ondes ultrasonores de surface dans le béton.....	
Introduction	17
2.1 Propagation des ondes guidées dans un milieu élastique, homogène et isotrope.....	17
2.2 Génération et détection de l'onde de Rayleigh.....	18
2.3 Interfaces de propagation.....	20
2.4 Ondes de surface dans le béton.....	21
2.5 Champ ultrasonore.....	23
2.6 Phénomène de diffusion.....	27
Conclusion.....	32
Chapitre 3 : Modélisation et simulation de la propagation des ondes de Rayleigh dans le béton.....	
Introduction.....	33
3.1 Propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu homogène élastique et isotrope.....	33
3.2 Propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu homogène viscoélastique et isotrope.....	40
3.3 Propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu élastique hétérogène.....	46

3.4 Simulation numérique de la propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu élastique hétérogène.....	56
Conclusion.....	63
 Chapitre 4 : Etude expérimentale de la propagation des ondes de Rayleigh dans le béton.	
Introduction.....	64
4.1 Elaboration des échantillons en béton.....	64
4.2 Dispositif expérimental.....	65
4.3 Principe de mesure.....	67
4.4 Caractérisation du matériau constituant le sabot.....	68
4.5 Résultats et discussion.....	70
4.6 Effet de l'âge de maturation.....	76
Conclusion.....	84
Conclusion générale et perspectives.....	IX
Références bibliographiques.....	
Annexes.....	
Annexe A	
Annexe B	

Abréviations

ASOR	Analyse Spectrale des Onde de Rayleigh.
ATME	Arrival Time of Maximum Energy
BAP	Béton AutoPlaçant.
BHP	Béton à Haute Performance.
BO	Béton Ordinaire.
BPR	Béton à Poudre Réactif.
CND	Contrôle non Destructif.
CPA	Coherent Potential Approximation.
C-S-H	Silicates de Calcium Hydrates.
E/C	Rapport Eau sur Ciment.
END	Evaluation Non Destructive
FW	Independent Scattering Approximation.
ISA	Modèle de Fikioris et Waterman.
ITZ	Interfacial Transition Zone.
GPR	Ground Penetration Rader.
GSCM	Generalized Self-Consistent Model.
MASW	Multichannel Analysis of Surface Wave.
PTFE	Polytétrafluoroéthylène (téflon).
PY	Modèle de Percus et Yevick.
QCA	Approximation Quasi Cristalline.
RAG	Réaction Alcalin-Granulat.
SASW	Spectral Analysis of Surface Wave.
SSRM	Steady State Rayleigh Method.
TOF	Time Of Flight.
WT	Modèle de Waterman et Truell.

Introduction générale

Introduction générale et état de l'art

Le contrôle non destructif des matériaux est une méthode très efficace pour caractériser et détecter les défauts dans les échantillons sans les dégrader. Parmi les matériaux que nous pouvons contrôler, nous citons le béton. L'évaluation non destructive (END) du béton est un défi majeur compte tenu de la complexité du matériau. Elle permet de caractériser son état de santé, même quand il est déjà intégré dans une structure et de détecter ses défauts tels que les fissures débouchantes à sa surface.

Les techniques traditionnellement utilisées pour tester les caractéristiques mécaniques du béton, sont celles qui mesurent la résistance à la compression, la résistance à la traction et la résistance à la flexion [Chek2008, Ghol2016]. Ces méthodes donnent des valeurs de la résistance assez fiables, mais elles sont destructives. Cela ne pose pas de problème lorsque l'ouvrage est en cours de construction, car la destruction concerne les échantillons prélevés lors du mélange du béton (gâchée). En revanche, si l'ouvrage est déjà construit, le carottage devient nécessaire. Cette opération peut, cependant, nuire la structure. Il existe également des méthodes dites semi-destructives comme celles utilisant un scléromètre et des tests de résistance à la pénétration (capteur Windsor). Ces méthodes fournissent des informations locales sur la surface du béton. Cependant, ces méthodes sont partiellement destructives car elles laissent des impacts et des trous dans le revêtement de la structure [Chek2008].

Pour éviter ces inconvénients, on utilise aujourd'hui plusieurs méthodes non destructives basées sur la propagation d'ondes acoustiques ou électromagnétiques telles que le GPR (Ground Penetration Radar). Cependant, la technique GPR fournit des informations sur les objets souterrains plutôt que sur le matériau lui-même. En outre, cette technique est adaptée à la détection d'objets métalliques et son efficacité dépend fortement de la fréquence des ondes électromagnétiques. Les techniques de contrôle par ultrasons sont plus adaptées à la détermination des propriétés mécaniques du béton [Chek2008]. Ces méthodes permettent de caractériser les structures en béton sans dégradation ni carottage [Ghol2016].

Dans notre étude, nous nous intéressons aux méthodes ultrasonores. De nombreux travaux dans le domaine du CND exploitent les propriétés acoustiques telles que la vitesse de propagation et l'atténuation pour la caractérisation des structures en béton (la porosité, l'endommagement, le rapport E/C) [Chek2008, Rid2021, Sli2021, Tey2022, Har2024].

Ces méthodes ont connu une large utilisation dans la caractérisation des structures en béton, en vertu de leurs nombreux avantages par rapport aux méthodes traditionnelles cités ci-dessus. Parmi ces avantages, on peut citer :

- Relier les grandeurs ultrasonores observables, que sont la vitesse de propagation et l'atténuation des ondes de volume ou de surface, aux caractéristiques structurales telles que la taille du granulats.
- Fournir des mesures rapides et précises.
- Leur facilité de mise en œuvre.

Les méthodes ultrasonores permettent également d'établir un lien direct entre les paramètres acoustiques et les caractéristiques mécaniques du matériau [Yu2018].

De nombreux travaux dans le domaine du contrôle non destructif (CND) exploitent les propriétés acoustiques telles que la vitesse de propagation et l'atténuation des ondes ultrasonores de volume pour la caractérisation des structures en béton [Chek2008, Chek2009, Weil2010, Chaix2011, Quiv2011, Tan 2014, Anh2016, Yu2018, Sli2021, Beny2023, Din2023], par interaction de ces ondes acoustiques avec le matériau. Parmi ces travaux, Yu [Yu2018, Yu.T2018] a utilisé la modélisation numérique pour améliorer l'interprétation et optimiser les paramètres de mesure ultrasonore dans l'évaluation non destructive. Cette méthode est basée sur la construction d'un modèle numérique sous le logiciel SPESFEM2D appliqué à un milieu virtuel avec un nombre d'onde complexe. Bien que ce modèle aide à la compréhension de la propagation des ondes acoustiques dans le matériau, il est peu réaliste à cause de la forme des granulats et du fait qu'il sous-estime la zone de transition interfaciale (interfacial transition zone ou ITZ) [Yu2018].

Des études ont exploité la théorie de la diffusion pour la caractérisation du béton. Quivige et al. [Quiv2011] ont également utilisé les ondes de volume afin d'identifier l'effet d'une macro-fissure réelle, localisée et débouchante en surface. Pour ce faire, ils ont développé une étude théorique, expérimentale et une simulation permettant d'étudier les paramètres issus de la diffusion ultrasonore dans des éprouvettes fissurées et entaillées de béton. L'un de ces paramètres est le temps d'arrivée du maximum d'énergie (Arrival Time of Maximum Energy ou ATME). Cette étude a été limitée par la difficulté d'appliquer ces méthodes linéaires et non linéaires à la caractérisation non destructive de fissures réelles dans le béton.

Dans plusieurs cas, les structures en béton ne sont accessibles que d'un seul côté. D'autre part, il est connu que les processus corrosifs du béton commencent le plus souvent à la surface suite à des agressions d'origine thermique (élévation de la température), chimique (carbonatation) ou mécanique (cycle gel-dégel), provenant du milieu extérieur ou à cause de mauvaises conditions d'élaboration ou de cure (voir chapitre 1). Ces dégradations influent sur les propriétés mécaniques de la structure du béton de l'extérieur vers l'intérieur. La couche extérieure correspond aux premiers centimètres près de la surface. L'interaction de cette surface avec les agents agressifs conduit à des dégradations de la structure sous forme d'endommagement sévère tel que la fissuration puis l'écaillage du béton ou encore la corrosion des armatures.

Dans ce cas, nous nous intéressons aux premiers centimètres de béton qu'on appelle le béton d'enrobage ou béton de peau [Chek2008, Aiss2024].

L'utilisation d'ondes de volume pour caractériser le béton au niveau de sa surface (béton d'enrobage) est possible [Chek2008, Chaix2011, Raa2020, Sli2021]. Cependant, le recours au mode écho devient nécessaire. Dans cette situation, le trajet de l'onde est doublé, ce qui augmente l'effet d'atténuation. De plus, la présence d'armatures dans le béton peut perturber la propagation des ondes de volume. Dans ce contexte, la norme EN 12504-4:2021 [EN2021] suggère dans ce cas d'appliquer une méthode d'essai indirecte dans laquelle deux transducteurs ultrasonores à ondes longitudinales plans sont positionnés sur la surface du même côté du matériau, l'un étant utilisé comme émetteur et l'autre comme récepteur.

La méthode proposée suggère la déduction des caractéristiques de volume du béton à partir des propriétés acoustiques de surface, à condition que ces caractéristiques de volume soient globalement homogènes dans le matériau. Dans ce cas, le recours aux ondes acoustiques de surface peut s'avérer très utile pour l'étude de ces structures, essentiellement le béton d'enrobage [Ospt2021, Hai2021, Son2022, Aiss2024].

Nous espérons que la technique proposée contribuera à une alternative plus précise que la méthode d'essai indirecte indiquée dans la norme EN 12504-4:2021. On peut alors l'appliquer dans nombreuses situations telles que le contrôle des poteaux et des colonnes accessibles d'un seul côté, des dalles et des routes en béton.

Dans ce contexte, Hassaim et al. [Hass2001] ont étudié l'aptitude de ces ondes à caractériser des bétons de propriétés mécaniques différentes par une méthode dite Analyse Spectrale des Ondes de Rayleigh (ASOR). Ces ondes ont été générées par une source d'impact mécanique. Cependant, cette méthode n'a pas permis de caractériser le béton d'enrobage à des profondeurs dépassant cinq à sept centimètres.

Un travail de recherche a été fait par Goueygou et al. [Goue2006] pour la caractérisation du béton dans les ouvrages à faible profondeur dans le but d'en évaluer sa durabilité. Des ondes de Rayleigh ont été utilisées sur des dalles en béton en laboratoire et des essais ont été effectués *in situ*. Bien que les auteurs aient obtenu des résultats concluants sur les paramètres recherchés en laboratoire, les résultats obtenus *in situ* manquaient de précision et leur interprétation a été complexe. Ceci est dû au fait que les propriétés du béton des ouvrages testés ne sont pas identiques. Les auteurs concluent sur la nécessité de corréliser leurs résultats à ceux obtenus avec d'autres méthodes d'auscultation ou bien d'exploiter toute la bande fréquentielle du signal reçu.

Chaix et al. [Chaix2011] ont fait une étude sur la caractérisation du béton d'enrobage ou de défauts de surface à l'aide d'une approche expérimentale se basant sur la génération des ondes de volume et de surface. L'étude a abouti des résultats concernant la diffusion de l'onde se propageant en présence de défauts tels que les fissures. Ce phénomène conduit à l'étalement temporel des signaux reçus et à une atténuation plus rapide des ondes cohérentes en fonction de la profondeur des défauts.

Une autre étude de la propagation des ondes de surface dans les premiers centimètres du béton a été faite par Chekroun [Chek2008]. Il a développé cette étude à l'aide d'une modélisation analytique, une simulation numérique 2D par différences finies et un protocole expérimental. Pour la partie expérimentale, il a utilisé un interféromètre laser comme un récepteur des ondes de Rayleigh. Dans cette étude, l'auteur a recherché une corrélation entre les paramètres ultrasonores et ceux mécaniques tels que le module d'Young, le coefficient de Poisson et le module de cisaillement. Il a également étudié le comportement de l'onde de Rayleigh cohérente en fonction de la nature des granulats présents dans le béton.

D'autres travaux de recherche ont exploité, en plus de l'acoustique linéaire, le domaine non linéaire. Quiviger et al. [Quiv2010] ont étudié expérimentalement l'effet des fissures de différentes profondeurs débouchant en surface sur les paramètres non linéaires. Selon les auteurs, l'étude

linéaire a permis de détecter la présence de fissures ou d'entailles mais n'était pas en mesure de détecter des fissures de grande taille (plus de 5 cm). Par contre, les paramètres non linéaires étaient plus sensibles à la variation de profondeur de ce type de fissures malgré les incertitudes importantes liées au dispositif expérimental utilisé.

Anh Vu [Anh2016] a développé de nouvelles techniques de caractérisation non destructives par ultrasons afin d'évaluer le béton d'enrobage dans le but de les appliquer sur site. Cette étude a été développée en régime non linéaire. Une étude expérimentale et une simulation numérique sous le logiciel Comsol ont été menées afin de déterminer les paramètres non linéaires du matériau. L'étude a révélé que ces paramètres sont plus sensibles aux changements microstructuraux liés aux pathologies étudiées. Les configurations étudiées correspondaient à la propagation d'ondes de surface générées par contact sur des échantillons en laboratoire mais n'étaient pas adaptées pour des mesures *in situ*.

Fenine [Fnine2006] a ausculté la peau du béton par ondes ultrasonores de surface à haute fréquence. Dans cette étude, il a utilisé un émetteur avec contact et un récepteur sans contact monté sur un chariot mobile. L'étude a été menée en laboratoire et *in situ*. Pour la mesure des vitesses, la méthode Slant Stack, qui consiste à représenter les signaux dans un domaine lenteur-fréquence, a été utilisée. Les résultats de cette méthode ont permis, de caractériser d'une manière précise, la dispersion de vitesse. Ce paramètre ainsi que l'atténuation, permettent d'obtenir des informations importantes sur les propriétés mécaniques des bétons. Malgré les résultats concluants en laboratoire, ceux obtenus sur le terrain présentaient une grande dispersion. De plus, cette méthode n'a pas été sensible aux variations de certains paramètres mécaniques tels que sous l'influence de la teneur en chlorure.

De ce fait, le travail envisagé dans le cadre de cette thèse a pour objectif de faire une étude exhaustive analytique, numérique et expérimentale du phénomène de propagation des ondes ultrasonores de surface dans le béton, dans le but de contrôler ce matériau au niveau de sa surface.

Cette thèse est subdivisée en quatre chapitres :

Nous commençons par un état de l'art sur les travaux effectués concernant l'évaluation du béton par le contrôle destructif et non destructif et les différentes méthodes de contrôle non destructif, principalement les méthodes ultrasonores. Les aspects cités dans la littérature concernent le

contrôle non destructif du béton par les ondes ultrasonores de volume et de surface et les approches utilisées, ainsi que les limites de leurs applications.

Le premier chapitre est consacré à l'étude des compositions du béton et ses propriétés mécaniques dans l'état sain et durci. Une présentation de quelques types de dégradation du béton et son influence sur leurs propriétés mécaniques est faite.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons à la propagation des ondes de surface dans le béton. La première section est focalisée sur la propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu homogène, isotrope, élastique ou viscoélastique afin de connaître les différentes caractéristiques de ces ondes, les modes de génération et de détection et les différentes interfaces de propagation.

La seconde section de ce chapitre porte sur l'étude de la propagation des ondes ultrasonores de surface dans le béton et les phénomènes qui influent sur le champ ultrasonore.

Le troisième chapitre est dédié à la partie analytique et à la simulation numérique, la théorie du milieu effectif pour les milieux hétérogènes tels que le béton et une recherche bibliographique sur les différents modèles d'homogénéisation appliqués aux ondes de volume dans le béton. Nous terminons par une simulation numérique sous le logiciel Matlab, pour présenter les différents phénomènes physiques que nous avons étudiés.

Le dernier chapitre s'intéresse à l'étude expérimentale de la propagation des ondes ultrasonores de surface dans des éprouvettes de béton avec différents rapports eau-ciment (E/C) en fonction de son âge de maturation. Un banc de mesure ultrasonore de la vitesse de propagation et du coefficient d'atténuation des ondes de Rayleigh est utilisé, et des mesures destructives de la résistance à la compression seront effectuées. Nous terminons par une recherche de la corrélation entre les deux types de mesures acoustiques et mécaniques avec l'influence du rapport eau-ciment et l'âge de maturation sur les paramètres acoustiques telles que la vitesse de propagation des ondes ultrasonores de Rayleigh et le paramètre mécanique tel que la résistance à la compression.

Cette recherche est terminée par une conclusion générale englobant les principaux résultats de cette recherche et les perspectives de ce travail.

Chapitre 1 :

Caractéristiques du béton

Introduction

Le béton est le matériau essentiel pour la construction des ouvrages de génie civil à travers le monde. Il permet d'assurer la sécurité pendant tout le service des structures comme les bâtiments d'habitation et les ouvrages d'art comme les ponts. La connaissance des constituants de ce matériau et sa formule d'élaboration nous permettent de connaître les problèmes qui peuvent y être présents lors de son élaboration ou après. Ce chapitre présente les propriétés mécaniques du béton et les différents types de dégradation qui peuvent influencer sur sa surface et leurs conséquences sur sa durabilité.

1.1 Constitutions des bétons

Le béton désigne un matériau composite. Ses constituants de base sont le ciment dont les grains ont une dimension de quelques μm , le sable qui est un élément rocheux de dimensions de $100\mu\text{m}$ à 5 mm, les granulats de dimensions variant de 5 mm à 20 mm ou plus et de l'eau. Cette constitution assure une bonne compacité du matériau donc une amélioration de ses propriétés mécaniques, qui seront définies au (§1.12) [Chek2008].

Le liant est une pâte à base de ciment et d'eau. Le mortier est l'ensemble constitué de ciment, d'eau et de sable. Le mortier avec les granulats donne ce qu'on appelle le béton. La pâte est un matériau poreux qui solidarise le sable et les granulats entre eux, la distribution des granulats au sein du béton est réalisée de façon à assurer la meilleure compacité possible [Chek2008, Quiv2012].

Le béton est caractérisé par le paramètre D_{max} qui représente le diamètre des granulats de plus grande dimension. Quand la dimension des granulats est très grosse, le béton a une très bonne résistance mécanique [Chek2008].

1.2 Avantages et inconvénients du béton

Le béton présente une large utilisation dans la fabrication des structures dans le domaine industriel et bien sûr dans notre vie quotidienne grâce à ses nombreux avantages :

- Il consomme peu d'énergie pour la fabrication,
- Il est facile à mettre en œuvre,
- Les produits rentrant dans sa fabrication sont disponibles,

- Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles [Stev2011].

Ses inconvénients sont :

- Son poids propre est élevé,
- Sa faible isolation thermique,
- Le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage [Stev2011].

1.3 Production du ciment portland

C'est un mélange de pierre calcaire broyée et d'argile (ou de matériaux similaires) cuit dans un four rotatif à température très élevée (1450°C). La pierre calcaire fournit la chaux et l'argile fournit la silice et l'alumine. Le produit obtenu s'appelle clinker. Ce dernier avec une faible quantité de gypse (5%) avec des produits d'addition (ajouts cimentaires) nous donne le ciment portland [Stev2011]. Le ciment peut offrir une très grande variabilité qui dépend des matériaux utilisés et des ajouts utilisés au cours de la fabrication et des dosages entre les différents constituants [Quiv2012].

1.4 Ajouts cimentaires

Ils sont utilisés dans le béton en remplacement partiel du ciment portland. Les plus connus et les plus utilisés sont : le laitier de haut fourneau, les Pouzzolanes naturelles (Méta-kaolin), la fumée de silice émanant de certains procédés métallurgiques et les cendres volantes générées par la combustion du charbon dans les centrales thermiques [Stev2011].

1.5 Adjuvants chimiques

Pour améliorer certaines propriétés du béton, on ajoute des adjuvants qui sont des produits organiques ou inorganiques (entraîneur d'air, réducteur d'eau, accélérateur ou retardateur de prise...) [Stev2011]. L'addition des adjuvants produit des phénomènes physico-chimiques très complexes et permet d'obtenir :

- Une diminution du coût de construction en béton.
- Donne au béton certaines caractéristiques plus efficacement que par d'autres moyens et assure la qualité du béton durant le malaxage, le transport, la mise en place et la cure.

1.5.1 Adjuvant réducteur d'eau

Ce sont des plastifiants (polymères) utilisés pour :

- Réduire la quantité de ciment et d'eau,
- Abaisser le rapport Eau/Ciment (E/C),
- Augmenter l'affaissement. Ce dernier est déterminé par la mesure de la chute du béton qui permet de connaître son comportement liquide, plastique, mou ou ferme [Oud 2020].

Il y a aussi les réducteurs d'eau de type de super-plastifiant pour les bétons de haute performance dont le rapport Eau/ liant est faible [Stev2011].

1.5.2 Adjuvant entraîneur d'air

Les bulles d'air entraînées forment des réservoirs qui reprennent l'excès d'eau introduit en force et contribuent ainsi à diminuer les pressions qui s'exercent, ce qui conduit à empêcher l'endommagement du béton.

A l'état durci, l'adjuvant entraîneur d'air fait améliorer les résistances des bétons faiblement dosés en ciment car lorsque la dose de ciment est faible, le béton devient très maniable et moins dur.

1.6 Rapport eau-ciment E/C

Le rapport de la quantité massique d'eau à celle du ciment s'appelle rapport E/C. Ce rapport a un rôle très important sur les propriétés mécaniques du béton. S'il est élevé, le béton est facile à mettre en œuvre mais l'espacement entre les grains du ciment sera très important et la quantité d'eau fait polariser la pâte. Lorsqu'il est faible, le béton est plus compact, ce qui donne de bonnes propriétés mécaniques (§1.12), mais une faible ouvrabilité (maniabilité) [Chek2008]. En général, la valeur de ce rapport est comprise entre 0,3 et 0,9 [Chek2008].

1.7 Types de bétons

On distingue essentiellement deux types de béton ;

- Les bétons bitumineux dont les liants sont à base de bitumes.
- Les bétons hydrauliques dont le liant est une pâte à base de ciment et d'eau.

Il y a aussi les bétons cyclopéens, qui sont constitués de granulats de diamètre jusqu'à 200mm. Ils sont utilisés dans le cas d'ouvrage de grandes dimensions comme les barrages [Chek2008].

1.8 Autres classifications de bétons

Il y a d'autres classifications du béton :

1.8.1 Bétons à hautes performance (BHP)

Ce sont des bétons plus écologiques que ceux conventionnels [Stev2011] car une partie des minéraux (calcaire) qui se trouvent dans le ciment est remplacée par d'autres produits qui sont les superplastifiants. Cela réduit le pourcentage de CO₂ libéré lors de la brûlure du calcaire.

Ce sont des bétons plus durables que ceux produits usuellement. Ils se caractérisent par leur faible rapport E/C qui est compris entre 0,3 et 0,4 [Stev2011] et leur résistance à la compression et bien plus élevée, soit de l'ordre de 100MPa ou plus [Chek2008].

1.8.2 Bétons autoplaçants (BAP)

Ce sont des bétons hyper fluides, extrêmement homogènes, stables et qui sont mis en œuvre sans vibration [Ben2018]. Ils s'écoulent sous l'effet de la gravité [Stev2011]. Cette caractéristique de l'écoulement offre l'avantage du remplissage des coffrages fortement armés (Fig.1.1).

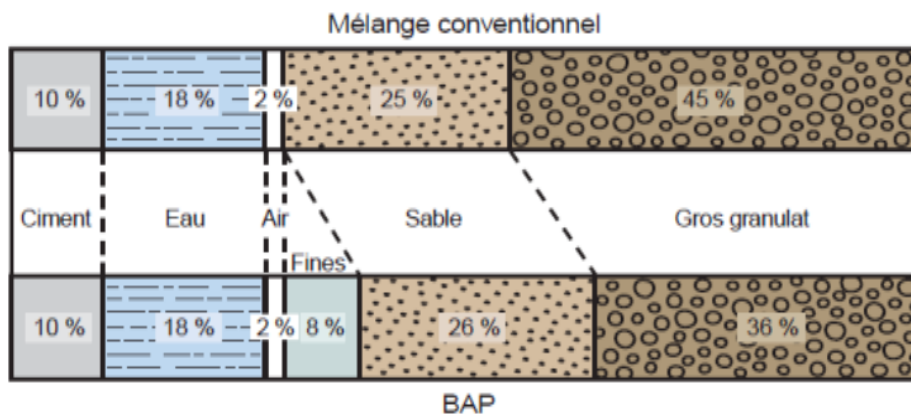


Fig.1.1. Pourcentage volumique des matériaux utilisés dans les bétons conventionnels et autoplaçant [Stev2011].

1.8.3 Béton à poudre réactif (BPR)

Ils sont constitués de poudre dont la grosseur est de 0,02 à 300 μ m [Stev2011]. Ils se caractérisent par les constituants suivants : une poudre cimentaire, du quartz broyé, des superplastifiants et des fibres.

Dans la suite, notre étude concerne le béton hydraulique.

1.9 Formulation du béton

Le mélange des différents constituants du béton lors de sa fabrication nous donne une gâchée.

Il existe plusieurs méthodes de formulation, parmi lesquelles, on peut citer la méthode de Bolomey, Faury, et Dreux- Gorisse [Mus2005]. Ces méthodes permettent d'obtenir des propriétés mécaniques recherchées, de créer un béton avec un squelette granulaire le plus compacte possible et un dosage en ciment et en eau au minimum compatible avec la résistance et l'ouvrabilité ainsi que sa durabilité [Quiv2012].

1.10 Cure

La cure est le moyen utilisé pour protéger le béton du séchage avec l'extérieur, particulièrement du séchage ce qui assure sa prise et son durcissement de manière optimale [Stev2011].

La cure, le murissement ou les mécanismes de prise du béton représentent les conditions auxquelles le béton acquière ses propriétés de durcissement afin de limiter son humidité et contrôler sa température. Ces conditions sont l'eau et la chaleur qui conduit à l'hydratation des grains de ciment. L'eau commence à entourer chaque grain de ciment. Les silicates de calcium présents dans le ciment se dissolvent pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite. Parallèlement les aluminates présentes dans le ciment réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite. Puis lorsque le gypse est épuisé la concentration en sulfate dans la solution baisse. L'ettringite devient instable et dissout pour former les monosulfate de calcium hydraté. L'ettringite se transforme totalement en monosulfo-aluminate dans quatre semaines de l'hydratation. Tous ces phénomènes s'appellent la cinétique globale de l'hydratation [Quiv2012, Loch1976] (Fig.1.2).

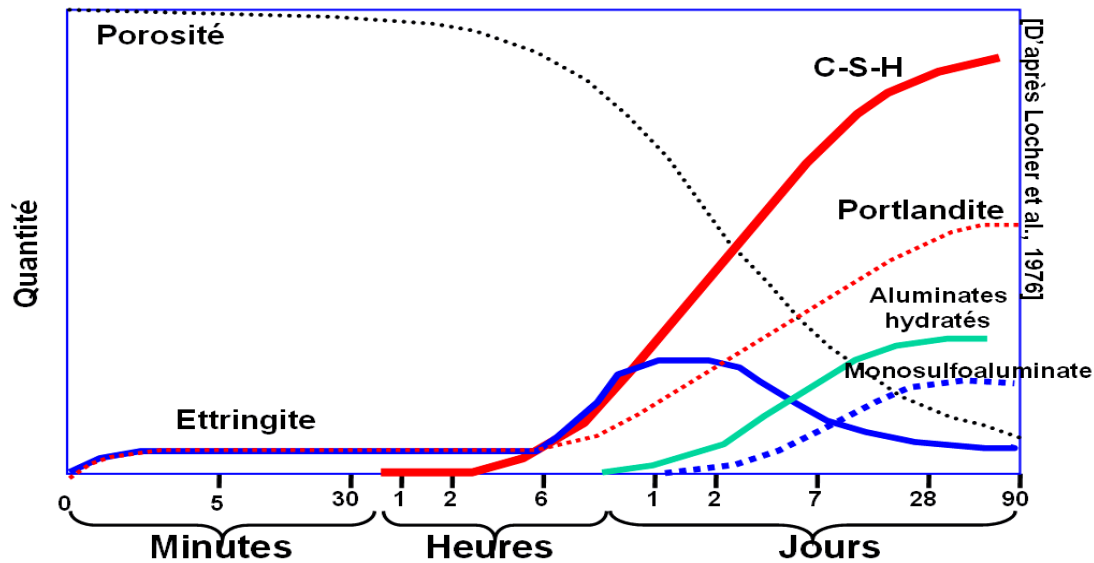


Fig.1.2. Courbes représentant la cinétique globale de l'hydratation [Loch1976].

1.11 Béton d'enrobage

La première nappe de ferrailage se situe à quelques centimètres, entre 3 et 5 cm de profondeur sous la surface. Cette couche de béton, appelée béton d'enrobage ou béton de peau, est en contact direct avec le milieu extérieur et est particulièrement soumise aux dégradations. Son rôle principal est d'assurer la protection des armatures en acier contre les agents agressifs du milieu extérieur (eau, air, ...). La corrosion des armatures provoque des gonflements de cette couche et conduit à des microfissurations du béton [Chek2008].

Cette couche de béton fera l'objet de notre investigation par ondes de surface.

1.12 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques souhaitées du béton sont atteintes au bout de 28 jours. En pratique ces propriétés ne se stabilisent qu'au bout de 90 jours ou plus jusqu'à une année [Loch1976, Chek2008].

1.12.1 Béton sain

Ses propriétés mécaniques dépendent de la qualité des constituants, le choix de la formulation et des conditions de cure.

Les caractéristiques du béton sont déterminées généralement par les essais destructifs comme les essais mécaniques par la mesure de la résistance à la compression et la résistance à la traction (après 28 jours de cure). Ces mesures sont effectuées sur des échantillons provenant de la même gâchée ou avec le carottage par prélèvement de la structure sur site [Quiv2012]. Il y a aussi les mesures non destructives avec les ultrasons qui relient la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore avec les propriétés intrinsèques du béton [Has2001, chek2009, Sli2021, Din2023, Aiss2024].

1.12.2 Porosité

Une autre propriété mécanique est la porosité qui est définie comme le volume total des vides contenus dans le béton pour 1m^3 de matériau [Chek2008]. Elle se traduit par des pores plus ou moins interconnectés. Ces pores ont des dimensions variant de l'ordre d'une dizaine de nm pour les pores capillaires à 1mm pour les vides d'air et les défauts de compaction [Quiv2012]. Ils peuvent être remplis d'air ou d'eau selon la teneur. Cette teneur désigne l'eau présente dans les vides du béton et qui n'a pas participé à l'hydratation [Chek2008]. Celle-ci est une réaction chimique entre les liants hydrauliques et l'eau [Blou2019] qui produit un dégagement de chaleur "réaction exothermique" qui permet de remplir l'espace entre les grains de ciment et d'avoir un durcissement du béton [Stev2011].

Lors de la formulation du béton, nous cherchons à obtenir un matériau de faible porosité pour assurer une meilleure résistance mécanique de la structure ainsi que leur durabilité [Quiv2012]. Cela peut être atteint grâce à une bonne hydratation du ciment en augmentant la durée de la cure. L'augmentation de la porosité à la surface du béton favorisera la pénétration de l'eau et des ions agressifs vers les aciers et conduit à la corrosion des armatures donc à la dégradation du béton sous forme de micro- ou macro-fissurations [Chek2008].

1.12.3 Béton endommagé

Il y a plusieurs cas d'endommagement du béton. Cet endommagement peut être d'origine chimique (réaction alcaline, attaque par des acides...), physique (fissuration dues au chargement, ...) ou thermique (variation de la température, cycle de gel-dégel, ...), [Quiv2012, Fnine2006]. Quel que soit le type de dégradation du béton, celui-ci conduit à une augmentation de la perméabilité du béton d'enrobage.

La présence de certains éléments peut nuire aux propriétés du béton. En effet, l'acide corrode les armatures et les chlorures et les sulfates font dégrader le béton à cause de la réaction du sulfate avec les produits d'hydratation du liant qui provoque des pressions conduisant à des fissurations dans le béton [Stev2011, Quiv2012].

Dans la suite, notre étude concerne l'état sain du béton.

1.13 Caractéristiques du béton durci

La connaissance des propriétés mécaniques du béton durci est importante pour le calcul du dimensionnement des ouvrages. Les caractéristiques essentielles sont la résistance à la compression, la résistance à la flexion et aussi à la traction [Stev2011].

1.13.1 Cure humide

Selon la norme (CSAA23.1-3C), la cure dans des conditions d'humidité relative $HR \geq 80\%$ permet aux grains de ciment non hydratés de s'hydrater et donc le béton continuera à durcir dans le temps. Si $HR < 80\%$, l'hydratation peut s'arrêter [Stev2011], ce qui favorise la création des pores puis l'endommagement du béton.

1.13.2 Résistance

La résistance à la compression est la résistance de référence la plus utilisée pour caractériser le béton. Elle est généralement mesurée à 28 jours selon une procédure normalisée [Fnine2006]. La contrainte maximale en compression est évaluée par un test de compression uni-axial sur une éprouvette cylindrique généralement de hauteur double du diamètre (Figure 1.3) [Dre1998]. Ceci est réalisé par l'application de deux forces opposées sur une éprouvette à l'aide d'une presse afin de mesurer la contrainte de rupture du matériau. La résistance à la traction traduit généralement la capacité de la résistance du béton à la fissuration [Fnine2006] qui consiste à appliquer une traction sur un échantillon court jusqu'à la rupture. La mesure de cette résistance à 28 jours d'âge est spécifiée par la norme (CAN/CSA A23.2-9C) [Stev2011] puisque cette résistance continue à augmenter plusieurs années après la production du béton. Sa valeur est dix fois plus faible par rapport à celle de la compression [Fnine2006]. La résistance au cisaillement consiste en l'application d'une sollicitation tangentielle et égale en tout point de la surface du matériau

[Jac2010]. Dans le béton, elle est de l'ordre de 5% par rapport à celle due à la compression [Stev2011].

La résistance à la flexion (Fig.1.3) [Dre1998] consiste à appliquer une force centrale croissante sur une éprouvette afin de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau telle que la partie supérieure de l'éprouvette est en compression et la partie inférieure est en traction [Jac2010]. Elle est beaucoup plus faible par rapport à celle due à la compression [Stev2011].

Les formules de calcul de ces résistances sont définies comme suit :

Pour un cylindre de béton de diamètre ϕ et pour une charge à la rupture N_{max} [Dre1998] :

- La résistance à la compression est donnée par :

$$R_{cJ} = \frac{4 N_{max}}{\pi \phi^2} \quad (1.1)$$

- La résistance à la traction directe est donnée par :

$$R_{tJ} = \frac{4 N_{max}}{\pi \phi^2} \quad (1.2)$$

- La résistance à la traction par flexion trois points est donnée par :

$$R_{tJ} = 0,6 \times \frac{9 N_{max}}{2 a^2} = 2,7 \times \frac{N_{max}}{a^2} \quad (1.3)$$

- La résistance à la traction par flexion quatre points est donnée par :

$$R_{tJ} = 0,6 \times 3 \frac{N_{max}}{a^2} = 1,8 \times \frac{N_{max}}{a^2} \quad (1.4)$$

- Il y a aussi la résistance de traction par fendage [Fnine2006] qui consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est appelé essai Brésilien [Dre1998]. Dans ce cas, la résistance en traction est donnée par :

$$R_{tJ} = 0,637 \frac{N_{max}}{\phi.L} \quad (1.5)$$

ou L est la longueur du cylindre, a l'épaisseur d'une poutre de béton, J l'âge du béton en jours et $R_{c/tJ}$ la résistance de compression / traction en MPa.

Les figures suivantes représentent les différents types des résistances mécaniques du béton :

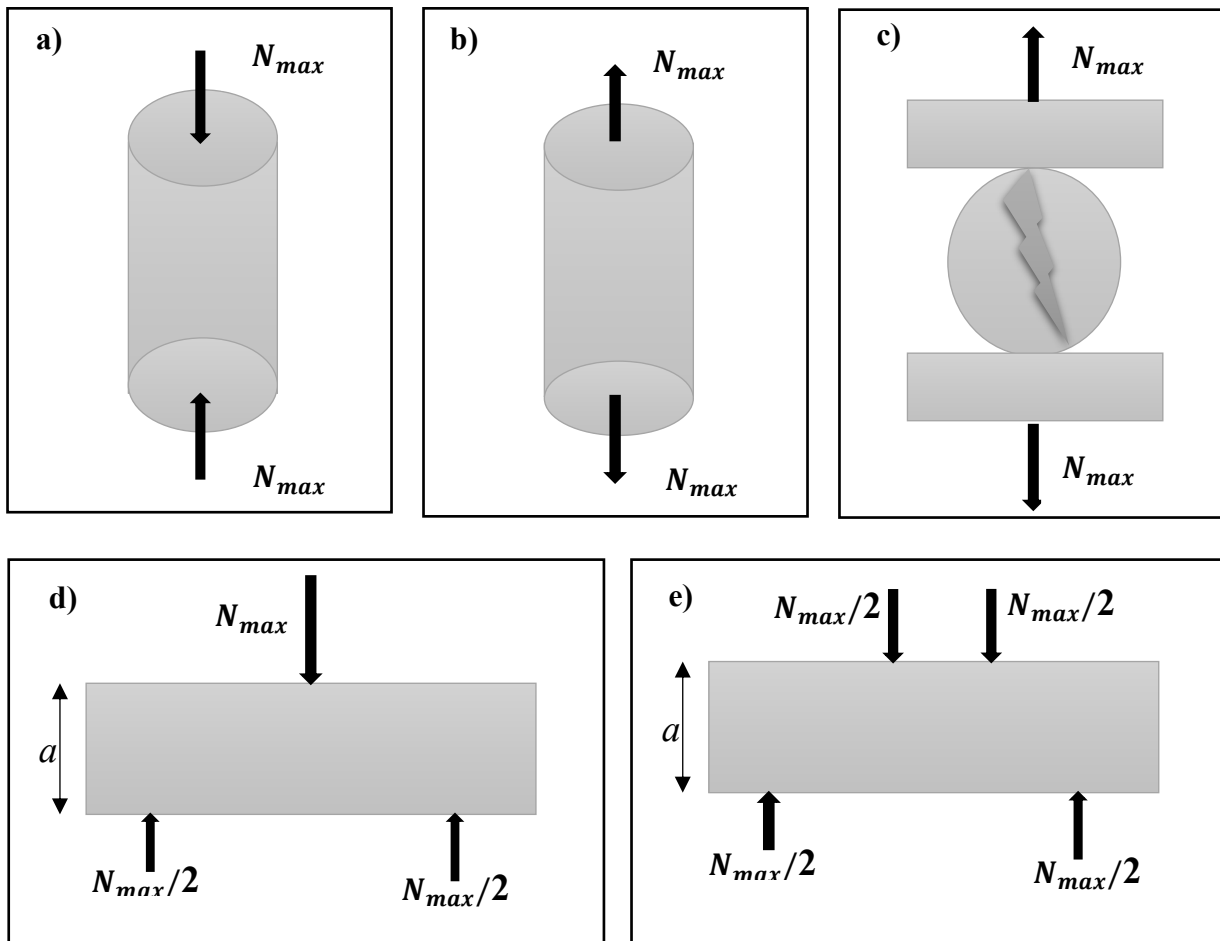


Fig.1.3. Représentation des différents types des résistances mécaniques du béton :
 (a) Mode de rupture en compression, (b) Traction directe, (c) Traction par fendage.
 (d) Traction par flexion trois points, (e) Traction par flexion quatre points.

1.13.3 Masse volumique du béton durci

La masse volumique d'un béton ordinaire utilisé dans les structures usuelles est de l'ordre de 2240 kg/m³ à 2400 kg/m³ et, pour un béton armé, elle est estimée à 2400 kg/m³. Cette masse volumique dépend de la quantité et de la densité des matériaux et de la quantité d'air emprisonné et entraîné. La masse d'un béton sec est égale à la masse d'un béton frais moins la masse d'eau évaporée [Stev2011].

L'eau de gâchage se divise en deux parties, une se combine chimiquement avec le liant pour former des hydrates et une autre partie est emprisonnée dans les pores et capillaires puis s'évapore lentement, dépendant des conditions d'environnement [Stev2011].

1.13.3 Durabilité

C'est le pouvoir du béton à résister aux mécanismes de dégradation auxquelles il peut être exposé de son environnement. Elle s'explique en grande partie par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux du béton comme une barrière protectrice face aux agents agressifs externe [Tou2010]. Plusieurs facteurs l'affectent :

a. Résistance au gel dégel et écaillage

Les bétons exposés aux conditions atmosphériques sévères subissent assez souvent des cycles de gel-dégel pendant leur durée de vie, ce qui conduit à leur détérioration.

Le gel a pour cause l'eau qui pénètre à l'intérieur des pores et aussi des sels de déverglaçage versé en surface (appliqué sur des routes en bétons de certains pays). Ce gel fait augmenter le volume ainsi que les tensions internes et provoque des fissurations et des écailllements du béton [Stev2011].

Pour remédier à ce phénomène, il faut augmenter le volume d'air (adjuvant entraîneur d'air).

Les facteurs qui influent sur la résistance au gel-dégel des bétons sont : le volume d'air entraîné, le rapport E/C et la période de séchage avant l'exposition au gel-dégel.

b. Perméabilité des bétons

C'est la mesure de la migration d'eau à travers le béton. Un béton perméable est facile à l'exposition aux différents agents agressifs extérieurs qui causent la corrosion des armatures et la

dégradation du matériau. A l'inverse, un béton étanche est très peu perméable ; c'est un béton durable.

La perméabilité du béton est donnée par la profondeur pénétrée par l'eau par unité de temps. Pour un béton de bonne qualité, elle est de 10^{-10} cm/s environ [Stev2011].

c. Résistance à l'abrasion

La surface du béton est souvent soumise à certains types de chargement (freinage des véhicules, lavage à forte pression). La mesure de cette résistance consiste à déterminer la résistance à l'abrasion d'une surface horizontale d'un béton. Donc, le but est de vérifier la résistance de la pâte du liant utilisée pour la fabrication du béton, qui elle-même dépend de la zone de transition et de l'adhérence pâte – granulats [Stev2011].

Les facteurs indispensables qui peuvent affecter cette résistance selon la norme CSA A23.1 sont : la résistance à la compression qui doit être supérieure à 35 MPa à 28 jours, le rapport E/C maximal qui doit être égal à 0,5, le type de finition à la surface du béton et le processus de murissement [Stev2011].

d. Stabilité volumique

Dès la fin de sa mise en œuvre, le béton est soumis à des variations de volume (déformations) même en absence de charge. La diminution de longueur est environ de 0,01 et 0,08%. Cette variation est due essentiellement au mouvement d'eau dans la matrice cimentaire. Il y a quatre types de retrait :

- Retrait plastique dû à la dessiccation (avant et pendant la prise) séchage de la pâte de ciment en début de la prise [Stev2011]. C'est une diminution du volume du béton à l'état frais engendrée par une évaporation de l'eau de surface à un taux plus élevé que le taux de ressuage ou par l'absorption de l'eau contenue dans le mélange par le substrat d'une façon inhomogène [Blou2019]. Les fissures se présentent sous forme d'un maillage [Quiv2012].
- Retrait par auto-dessiccation : qui se produit en l'absence d'échange hydrique avec le milieu extérieur [Stev2011] et qui agit sur le matériau tout au long de la réaction d'hydratation du ciment [Blou2019].

- Retrait thermique (après la prise) : la phase de durcissement s'accompagne avec un élèvement de la température qui conduit à des expansion et contraction du béton [Quiv2012].
- Retrait à long terme causé par le séchage par évaporation de l'eau contenue dans le béton [Stev2011]. Cette évaporation se fait par un processus de diffusion de l'eau depuis les pores capillaires vers l'extérieur qui provoque une dépression à l'échelle macroscopique dans le béton et qui mène à un équilibre entre le béton et le milieu extérieur après la prise [Lau2001].

La variation de volume permet de mesurer :

d.1. Dilatation

Les solides se dilatent au chauffage et se contractent au cours de leur refroidissement [Mich2012]. Les fluctuations de la température peuvent provoquer des contraintes dans le béton et conduire à des fissurations [Stev2011]. La dilatation est décrite par la formule :

$$\Delta l = a_T \cdot \Delta T \cdot l \quad (1.6)$$

Telle que Δl est la variation de la longueur, a_T le coefficient de dilatation linéaire du matériau qui s'exprime en K^{-1} , ΔT la variation de la température et l la longueur de l'échantillon.

d.2. Fluage

Le béton a un comportement viscoélastique. Le fluage est la déformation instantanée qu'il subit au moment de l'application d'une charge qui est suivie d'une déformation lente ou différée et qui se stabilise au bout de quelques années. Pour le béton, cette période est égale pratiquement à 3 ans [Stev2011].

La figure suivante montre la variation de déformation de fluage propre [$\mu m.m^{-1}$] en fonction du temps en jours pour différents rapports E/C

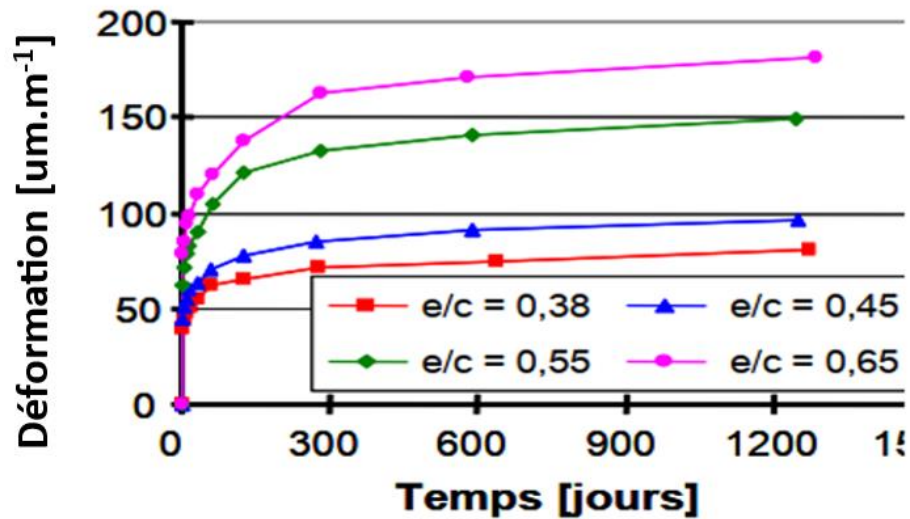


Fig. 1.4. Variation de déformation de fluage propre d'un béton en fonction du temps pour différents rapports E/C [Rev2009].

La figure 1.4 montre que le comportement du matériau est viscoélastique avec le temps jusqu'à 150 jours, puis la déformation augmente lentement jusqu'à 300 jours. À partir de 300 jours, la déformation devient presque constante. Le matériau a un comportement plastique jusqu'à 1200 jours. D'autre part, on remarque aussi que lorsque le rapport E/C est important la déformation de fluage devient très importante en fonction du temps parce que lorsque le rapport E/C augmente, la résistance mécanique du matériau diminue [Quiv2012] donc la déformation de fluage devient très importante et vice-versa.

1.13.4 Réactions chimiques

Il y a plusieurs familles de réactions chimiques causant la dégradation du béton. Ces réactions ont pour source le milieu environnant ou sont déjà présentes dans le matériau. Parmi ces réactions les plus dangereuses, on peut citer :

- Réaction alcalin-granulat (RAG) : c'est la réaction entre les alcalins provenant de liants et la silice réactive des granulats. Cette réaction produit un gonflement et peut entraîner des fissurations et la création de pores sous forme de faïençage sur la surface du béton (Fig.1.5) causées par son expansion interne [Fnine2006, [Stev2011].

- Résistance au sulfate : le béton en contact avec le sol ou l'eau ayant une teneur élevée en sulfate d'origine naturelle, biologique ou provenant de la pollution domestique ou industrielle [Fnine2006] réagit avec les ions sulfates de béton conduit à des cristallisations sous forme des aiguillés. Le développement de ces cristaux engendre des contraintes internes importantes (expansion) (Fig.1.5) [Fnine2006, [Stev2011].
- Carbonatation : C'est la réaction du gaz carbonique avec les produits d'hydratation du liant qui génère des calcites. La carbonatation augmente le retrait de séchage donc le risque de fissuration et la corrosion des armatures (Fig.1.5) [Stev2011, Rev2009].

La figure 1.5 montre quelques types de dégradation du béton de surface d'origine chimique :

a)



b)



c)



Fig.1.5. Effets des réactions chimiques sur le béton d'enrobage : (a) réaction alcalis-granulats [Stev2011], (b) réaction du sulfate [Stev2011], (c) réaction de carbonatation [Rev2009].

1.14 Relation entre la contrainte et la déformation dans le béton

La figure 1.6 représente la variation de la contrainte en fonction de la déformation pour différents types de bétons :

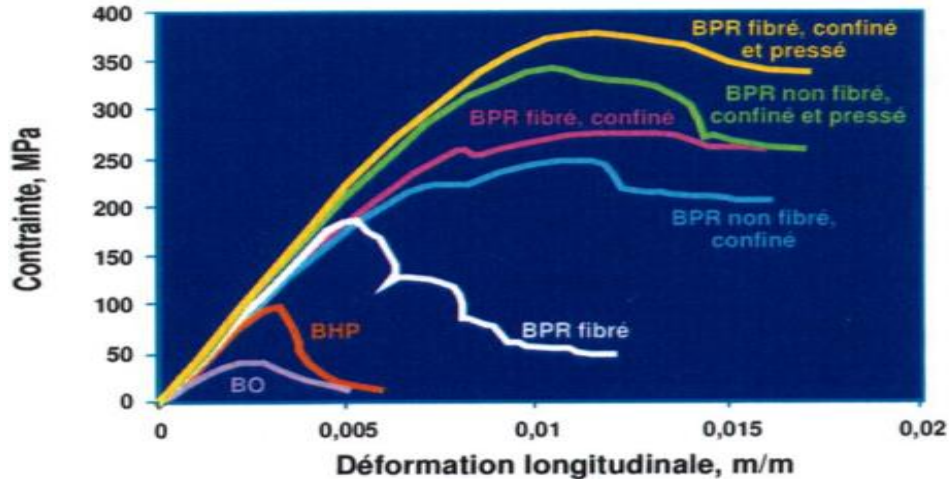


Fig.1.6. Courbes représentant la variation de la contrainte en fonction de la déformation pour différents types de bétons. BO : béton ordinaire, BPR : béton à poudre réactif, BHP : béton à haute performance [Stev2011].

On remarque que les différents types de béton peuvent être classés de ceux qui présentent la plus faible contrainte maximale, soit le béton ordinaire avec une contrainte maximale (à la rupture) de l'ordre de 48 MPa pour une déformation de l'ordre de 0,0025, jusqu'au béton ayant la plus grande contrainte maximale, soit le béton à poudre réactif, fibré, confiné et pressé qui a une contrainte maximale égale à 375 MPa pour une déformation d'environ 0,012. Ce type de béton a donc la plus forte résistance à la rupture à l'inverse du béton ordinaire.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les caractéristiques fondamentales du béton à l'état sain et durci, les propriétés mécaniques du béton durci et l'influence de la formulation et la cure sur ces propriétés mécaniques. Nous avons cité quelques types d'endommagement de l'état de la surface du béton, principalement le béton d'enrobage pendant sa durée de vie.

**Chapitre 2 : Généralités sur
la propagation des ondes
ultrasonores de surface dans
le béton.**

Introduction

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons définir la propagation des ondes guidées, particulièrement les ondes de Rayleigh dans un milieu élastique, homogène et isotrope et les principaux modes de génération et de détection ainsi que les différentes interfaces de propagation. La deuxième partie concerne la propagation des ondes de Rayleigh dans le béton, le choix de la matière du sabot pour générer ce type d'onde, ainsi que les avantages de ce mode de génération des ondes ultrasonores de surface pour la caractérisation des structures de béton, particulièrement le béton d'enrobage. Après, nous allons présenter les différents phénomènes que peut rencontrer le champ ultrasonore et comment ils influent sur son énergie dans la structure du béton.

2.1 Propagation des ondes guidées dans un milieu élastique, homogène et isotrope

Les ondes guidées sont des ondes qui se propagent dans les milieux élastiques finis ou semi-infinis. L'existence d'une telle onde nécessite plusieurs surfaces (frontières) libres pour permettre la réflexion multiple des ondes de volume afin de donner naissance aux ondes guidées. Leur propagation s'effectue parallèlement à la surface et elles véhiculent l'énergie le long de cette surface.

Parmi ces ondes, nous nous intéressons aux ondes de Rayleigh. Ce sont des ondes guidées se propageant dans un milieu semi-infini avec une interface solide/ vide, air ou liquide. L'amplitude de ces ondes diminue exponentiellement avec la distance normale à l'interface où l'onde se propage [Bou2006] et devient négligeable à partir d'une profondeur égale au double de la longueur d'onde $2\lambda_R$ [Tan2014, Debou2012]. Elles n'affectent donc que les particules du matériau qui se trouvent près de la surface [Bou2006]. Ces ondes possèdent deux composantes de déplacement, une transverse verticale et l'autre longitudinale (superposition des ondes longitudinales et transversales) [Sait2016]. Les composantes longitudinales et transversales sont déphasées de $\frac{\pi}{2}$ et contenus dans le plan sagittal [Debou2012].

Les ondes de Rayleigh se propagent sur une épaisseur de l'ordre de la longueur d'onde [Bou2006]. Leur vitesse est plus faible que celle des ondes de volume [Sait2016]. Cela est dû à l'absence des forces de cohésion élastique sur les particules qui sont situés à la surface libre que d'un seul côté contrairement aux ondes de volume pour lesquelles les particules sont entourées par la matière occupant tout le volume du milieu [Bou2006]. Il est à noter que l'onde de surface, se trouvant à

une distance loin de son point de génération, domine toutes les autres ondes de volume puisque son intensité varie comme l'inverse de la profondeur de pénétration, contrairement à l'onde de volume qui varie comme le carré de l'inverse de la profondeur de la pénétration [Bou2006].

2.2 Génération et détection de l'onde de Rayleigh

Il existe plusieurs méthodes pour générer des ondes de Rayleigh. Les plus courantes sont la méthode du transducteur à peigne et la méthode d'angle d'incidence variable (des sabots).

2.2.1 Génération de l'onde de Rayleigh par peigne

Cette méthode consiste à utiliser une structure sous forme d'un peigne monté sur un transducteur appliqué directement sur la surface du matériau à caractériser. Ce transducteur émet des ondes de volume qui se convertissent en ondes de surface à travers un réseau de dents de peigne périodique de période λ_R . La polarisation des ondes émises est normale à la surface de propagation du matériau étudié [Debou2012].

La condition de génération de ce type d'onde étant que l'espace entre les dents du peigne doit être égal à la largeur de la dent, qui doit être égale à la moitié de la longueur d'onde de l'onde de Rayleigh $\frac{\lambda_R}{2}$. L'avantage de cette méthode est que ce type de transducteur est capable d'exciter l'onde de Rayleigh très efficacement [Debou2012], mais elle est difficile à mettre en œuvre. La bande passante décroît avec le nombre de dents du réseau et si on limite le nombre de dents, cela réduit le rendement [Ourak1986]. D'autre part, la longueur d'onde varie avec la fréquence et la vitesse de l'onde de surface. Dans ce cas, on est obligé de changer le peigne pour chaque fréquence utilisée et pour chaque type du matériau (Fig.2.1).

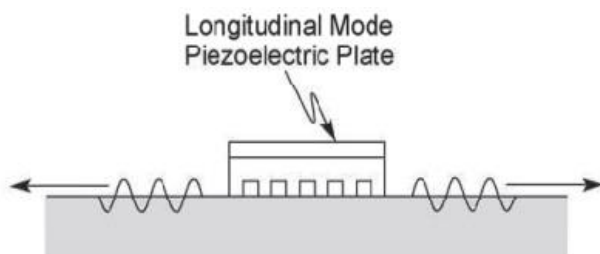


Fig.2.1. Représentation de la méthode de génération de l'onde de Rayleigh par l'intermédiaire d'un peigne [Debou2012].

2.2.2 Génération par l'intermédiaire d'un sabot

Une onde longitudinale se propageant dans un sabot (Fig.2.2) à la célérité V_L et qui arrive sur une interface plane le séparant d'un milieu solide semi-infini avec un angle d'incidence critique θ_R (angle de Rayleigh) est convertie en une onde de Rayleigh qui se propagera à la célérité V_R [Palerm2018].

Le principe de conversion est utilisé pour obtenir à partir d'une onde de volume, une onde de surface respectant les lois de réfraction de Snell-Descartes. Le sabot est un prisme orienté d'un angle θ_R de façon que la composante horizontale de la vitesse des ondes de volume soit égale à la vitesse de l'onde de surface du matériau à caractériser [Vik1967].

θ_R vérifie la loi de Snell-Descartes :

$$\sin(\theta_R) = \frac{V_L}{V_R} \quad (2.1)$$

Pour pouvoir générer une onde de Rayleigh par un sabot dans la structure à caractériser, il faut respecter la condition $V_L < V_R$.

Les avantages de cette technique sont :

- Le pouvoir de convertir l'onde longitudinale en onde de Rayleigh. Cette dernière est toujours inférieure à la vitesse de l'onde transversale et longitudinale,
- La conservation de la forme d'onde après la conversion de mode [Hurle2015],
- Elle est plus pratique et efficace sur le plan industriel.

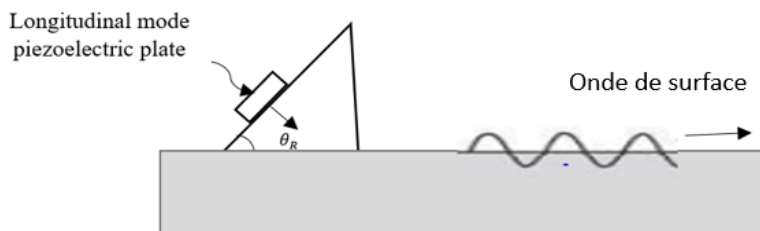


Fig.2.2. Représentation de la méthode de génération de l'onde de Rayleigh à l'intermédiaire d'un sabot [Debou2012].

Pour la détection des ondes de Rayleigh, les chercheurs ont utilisé plusieurs méthodes en mode contact telles que les sabots et sans contact comme l'interféromètre laser [Chek2008].

2.3 Interfaces de propagation

2.3.1 Interface (vide / solide)

L'onde se propage à la surface d'un solide semi-infini limité par le vide, sur laquelle le mouvement des particules est elliptique avec une amplitude qui diminue exponentiellement en épaisseur, et qui s'annule à environ deux fois la longueur d'onde en profondeur. L'énergie véhiculée par l'onde de surface reste confinée sur une épaisseur de l'ordre de la longueur d'onde au-dessous de l'interface solide/vide [Bou2006]. Cette propriété rend ces ondes très sensibles à la perturbation de la surface [Sait2016].

2.3.2 Interface (liquide / solide)

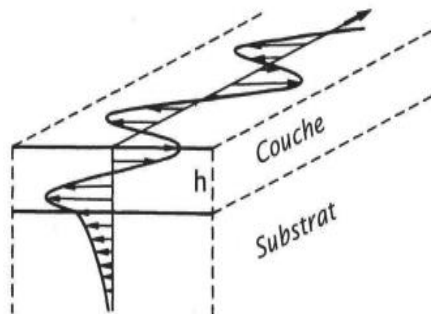
Dans le cas de la propagation de l'onde de Rayleigh à l'interface liquide/solide, ces ondes réémettent de l'énergie dans le liquide, générant des ondes se propageant à un angle critique de Rayleigh θ_R .

L'approximation de Viktorov, nous donne une expression approchée de la vitesse de Rayleigh en fonction des vitesses longitudinales et transversales dans le matériau [Bou2006] (voir chapitre 3):

$$V_R = V_T \frac{\left[0,718 - \left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2\right]}{\left[0,750 - \left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2\right]} \quad (2.2)$$

2.3.3 Ondes de Stoneley

C'est un cas particulier de l'onde de Rayleigh où l'onde se propage à l'interface plane entre deux milieux élastiques semi-infinis (solide/ solide) [Bou2006], lorsque le matériau se compose de deux solides isotropes et les conditions de continuité sont satisfaites [Debou2012]. Dans le cas où le matériau se compose de deux solides isotropes (Fig. 2.3), le premier étant une couche mince solide déposée sur un solide semi infini (substrat) et lorsque la vitesse transversale dans la couche mince est inférieure à la vitesse transversale dans le substrat, on parle de l'onde de Love. Le déplacement de cette onde non dispersive s'effectue dans le plan sagittal et diminue sur les côtés des frontières entre les deux solides [Debou2012].



h : l'épaisseur de la couche.

Fig.2.3. Représentation de la propagation de l'onde de Love dans une structure de type couche sur substrat [Debou2012].

2.4 Ondes de surface dans le béton

Les ondes de surface sont très utilisées pour la caractérisation du béton car elles sont faciles à générer et permettent de remonter aux caractéristiques mécaniques du matériau en profondeur à partir d'un dispositif expérimental posé en surface [Tan2014]. Elles présentent les avantages suivants :

- Mesures faites sur une seule face de la structure.
- Sensibilité aux modifications des propriétés mécaniques du béton.
- Possibilité de considérer la variation de la vitesse en fonction de la profondeur dans le cas du béton stratifié, par exemple [Tan2014].

Des nombreux travaux ont étudié la propagation des ondes de surface dans le béton [Piwak2004, Chek2008, Weil2010, Chaix2011, Tan 2014, Anh2016, Kan2021, Din 2023].

Piwakowski et al [Piwak2004] ont caractérisé des dalles en béton d'enrobage de quelques mm à quelques cm d'épaisseur, en utilisant des transducteurs montés sur un sabot à angle fixe. Le choix de la matière constituant le sabot peut être fait en considérant plusieurs paramètres tels que la bande passante B et la fréquence maximale f_{\max} du signal généré par le transducteur, et les indices d'absorption dans le sabot. La bande passante la plus large et la valeur maximale de fréquence correspond au minimum d'absorption. Ces transducteurs sont mis en contact avec le béton avec un couplant.

Chapitre 2 : Généralités sur la propagation des ondes ultrasonores de surface dans le béton

Les critères qui ont été pris en compte pour le choix du couplant par Piwakowski et al. [Piwak2004] sont :

- Epaisseur (distance parcourue par l'onde dans l'agent de couplage) la plus petite possible pour diminuer l'erreur sur la vitesse de groupe,
- Absorption le plus petit possible du couplant (valeur maximale pour la fréquence f_{\max} et la bande passante le plus large B),
- Répétabilité des résultats (erreur minimale sur la variation relative de la vitesse de groupe et vitesse de phase minimale $\frac{\Delta V_g}{V_g} = f\left(\frac{\Delta V_g}{V_g}\right)$,
- Facilité d'utilisation et prix abordable.

A partir de ces critères Piwakowski et al. [Piwak2004] ont testé quelques types de couplants, dans deux configurations : par contact direct et à travers des films minces de plastique.

Les avantages de ces films sont :

- Déplacement plus facile du transducteur pendant les mesures sans utilisation de couplant,
- Diminution des frottements entre le sabot et le béton,
- Utilisation de grilles prédéfinies pour les points de mesure avec un film imperméable,
- Empêchement de séchage de l'agent de couplage pendant la mesure.

La mesure de f_{\max} , de la vitesse de groupe et de l'atténuation dans trois matériaux utilisés pour le sabot montre que le téflon (polytétrafluoroéthylène ou PTFE) était le meilleur.

Pour le matériau de couplage, les résultats expérimentaux montrent que la meilleure largeur de bande est obtenue pour le gel D (sofranel) et la kératine de cheveux avec l'utilisation des films de plastique, ce qui permet d'augmenter la largeur de bande pour tous les couplant.

La faible atténuation est obtenue par le gel D par rapport à la kératine des cheveux. A partir de ces deux résultats, il s'avère que le gel D est le plus approprié vu qu'il donne de bons résultats à haute fréquence.

De plus, l'utilisation des films de plastique diminue l'incertitude de mesures.

2.5 Champ ultrasonore

Lors de la propagation de l'onde ultrasonore dans un matériau hétérogène tel que le béton, le faisceau ultrasonore va interagir avec la matière qu'il traverse. Cela conduit à plusieurs phénomènes (réflexion, diffraction, dispersion, diffusion.) qui ont pour effet une atténuation de l'onde qui se traduit par la perte d'une partie de son énergie.

2.5.1 Phénomène d'atténuation

L'atténuation est une perte d'amplitude (énergie) de l'onde reçue par rapport à celle de l'onde initiale émise. L'étude de l'atténuation nous permet d'évaluer des informations très importantes sur le matériau à inspecter. Il y'a plusieurs types d'atténuation ;

a. Atténuation intrinsèque

L'atténuation intrinsèque ou l'absorption est définie comme l'atténuation de l'amplitude du signal due à la propriété dissipative du milieu. Cette diminution due au processus de viscosité du milieu. L'atténuation intrinsèque est définie par le facteur de qualité adimensionné Q qui est égal à [Lag2007] :

$$\frac{1}{Q(\omega)} = -\frac{\Delta E}{2\pi E} \quad (2.3)$$

ΔE : Correspond à l'énergie dissipée dans le milieu à une fréquence donnée et E l'énergie maximale introduite dans le milieu.

En utilisant la forme générale du déplacement particulière pour un milieu visco-élastique :

$$u(x, z, t) = G(z) \underbrace{e^{j(kx - \omega t)}}_{\text{Propagation}} \overbrace{e^{-\alpha_a x}}^{\text{Atténuation intrinsèque}} \quad (2.4)$$

α_a : Désigne le coefficient d'absorption.

$G(z)$: fonction décrivant la variation de l'amplitude du déplacement particulière suivant z .

α_a est en général proportionnel à la fréquence. Les hautes fréquences de l'onde seront absorbées plus rapidement que les basses fréquences. Une relation approximative reliant α_a , Q et f est donnée par :

$$\alpha_a \approx \frac{\pi f}{Q V_R} \quad (2.5)$$

Q est compris entre 30 (pour des terrains viscoélastiques type argiles) et 600 (pour des terrains quasi-élastique de type granite) [Lag2007].

b. Atténuation géométrique (diffraction)

Elle est liée à la répartition de l'énergie sur toute la surface du front d'onde. Le déplacement des particules des ondes de volume décrit des demi sphères concentriques [Anh2016]. Pour les ondes de Rayleigh, le front d'onde d'une source ponctuelle a une forme cylindrique. Dans les deux cas, plus l'éloignement de la source de l'onde est important plus la surface du front d'onde augmente [Lag2007].

En tenant compte des deux types d'atténuation par diffusion et par dissipation, on peut définir le nombre d'onde complexe k_R associé à la fréquence f de l'onde par la formule :

$$k_R(\omega) = \frac{\omega}{V_R(\omega)} + j \cdot \alpha_R(\omega) \quad (2.6)$$

où $\omega = 2\pi f$ est la pulsation de l'onde. La partie imaginaire définit le coefficient d'atténuation α_R . Donc la vitesse de phase et l'atténuation dépendent de la fréquence [Yu2018].

2.5.2 Phénomène de dispersion

Un milieu non dispersif est un milieu où la vitesse de phase ne dépend pas de la fréquence. Par contre, pour un milieu dispersif lorsqu'un paquet d'onde composé d'ondes de plusieurs fréquences se propage dans ce milieu, la vitesse de groupe $V_g = \frac{\partial \omega}{\partial K}$ correspond à la vitesse de propagation de l'enveloppe de l'onde résultante (énergie). La vitesse de phase $V_\phi = \frac{\omega}{K}$ est couramment utilisée pour caractériser le milieu dispersif [Yu2018].

Dans un milieu semi-infini, homogène, élastique et isotrope les ondes de compression, de cisaillement et de Rayleigh sont non dispersives. Cependant, dans un milieu hétérogène comme le béton ou dans un milieu multicouche, la propagation des ondes est caractérisée par différents phénomènes comme la dispersion, la réflexion et surtout la diffusion des ondes à l'interface et entre les couches [Weil2010].

Chekroun [Chek2008] a fait une étude numérique et expérimentale de la dispersion des ondes de Rayleigh dans le béton à partir de la détermination des vitesses et des coefficients d'atténuation des ondes de volume. Il a également étudié la variation de la vitesse de Rayleigh en fonction des propriétés mécaniques et géométriques du milieu.

2.5.3 Mesure de la dispersion des ondes de surface

Le domaine d'application des ondes de surface est très large, permettant l'investigation des structures dont la taille varie de millimètre à kilomètre. L'emploi du principe de dispersion fut tout d'abord en sismologie à l'échelle terrestre pour déterminer les épaisseurs et les caractéristiques mécaniques des différentes couches de la terre [Lag2007].

Le principe des méthodes de mesure de la dispersion reste le même. Les méthodes diffèrent par le type de source (active ou passive), de capteur et de la géométrie de dispositif mis en œuvre et les traitements effectués pour l'extraction des informations utiles de l'étude du phénomène de la dispersion [Lag2007].

a) Steady State Rayleigh Method SSRM

C'est la plus ancienne méthode qui utilise un seul capteur. Par l'intermédiaire d'un vibreur mono fréquentiel, on impose une force verticale sinusoïdale entretenue à la surface du matériau.

Un capteur est déplacé le long du profil jusqu'à annuler le déphasage entre le signal émis par la source et le signal enregistré par le capteur. La distance entre la source et le capteur est un multiple de la longueur d'onde [Lag2007].

La vitesse de phase associée à la fréquence de la source est donnée par :

$$V_R(\omega) = \frac{\lambda_R(\omega)\omega}{2\pi} \quad (2.7)$$

L'opération est effectuée pour plusieurs fréquences afin de déterminer le profil de la vitesse de phase qui est utilisé pour déterminer le profil de vitesse des ondes de cisaillement [Sfaxi2002].

Cette méthode fut rapidement abandonnée car elle est coûteuse en temps et la courbe de dispersion donnant les valeurs de la vitesse de phase pour chaque fréquence rend la distinction entre les modes difficile [Lag2007].

b) Spectral Analysis of Surface Wave SASW

Elle consiste à enregistrer avec deux capteurs séparés par une distance, le signal émis par une source vibratoire. Le déphasage $\Delta\phi$ entre les deux capteurs pour chaque fréquence est obtenu en effectuant le rapport de la transformée de Fourier des deux signaux [Lag2007].

Connaissant la distance entre les deux capteurs X et le temps de propagation entre les deux capteurs $\Delta t(\omega)$ pour une fréquence donnée ω , on déduit la vitesse de phase :

$$V_R = \frac{X}{\Delta t(\omega)} \quad (2.8)$$

et ainsi
$$\Delta t(\omega) = \frac{\Delta\phi(\omega)}{\omega} \quad (2.9)$$

V_R la vitesse de propagation de l'onde de surface.

Cette méthode est largement utilisée en géophysique appliquée, mais elle pose le même problème que la méthode précédente SSRM [Lag2007].

c) Multichannel Analysis of Surface Wave MASW

C'est la méthode la plus récente par rapport aux précédentes. Elle consiste à l'acquisition de signaux temporels qui correspondent à la réponse du sol à une sollicitation mécanique, enregistrée par N capteurs localisés le long d'un profil à la position $x_i = 1, \dots, N$.

Un traitement du signal permet, ensuite, d'extraire la dispersion de ces N signaux temporels [Lag2007].

Les avantages d'utilisation de cette méthode sont :

- Facile à mettre en œuvre,
- L'utilisation d'un grand nombre de capteurs et le traitement du signal effectué permet un bon contrôle du rapport signal sur bruit,
- Possibilité d'extraire les modes supérieures de propagation [Lag2007],

d) L'analyse modale des ondes de Rayleigh MASW

Dans cette méthode les signaux permettant d'obtenir la courbe de dispersion sont déterminés à partir d'une seule étape, en disposant de 16 capteurs séparés d'un intervalle de distance constant, sur la pièce à inspecter. Dans cette méthode, les courbes de dispersion sont obtenues non seulement pour le mode fondamental mais aussi pour un ou plusieurs modes supérieurs [Sfaxi2002].

2.6 Phénomène de diffusion

C'est une perte d'énergie du faisceau ultrasonore lorsqu'elle interagit avec la matière. Il est dû à la présence de diffuseurs dans un matériau hétérogène.

On distingue deux types de diffusion de l'onde :

2.6.1 Diffusion simple

Elle correspond à la réémission de l'énergie de l'onde ultrasonore dans toutes les directions de l'espace. De ce fait, l'amplitude de l'onde transmise dans la même direction de l'onde incidente diminue [Anh2016] (Fig.2.4).

Dans le cas du béton, le phénomène de diffusion est dû à la différente nature des obstacles qui peuvent être du sable, des granulats, du ciment, des porosités (des bulles d'air ou/ et d'eau) ou des

fissures [Anh2016]. Ce phénomène joue un rôle très important dans l'atténuation de l'onde ultrasonore.

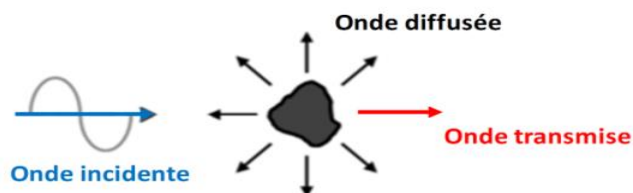


Fig.2.4. Représentation du phénomène de diffusion simple sur une hétérogénéité [Anh2016].

2.6.2 Diffusion multiple

Elle se traduit par la diffusion successive de l'onde incidente par les différents diffuseurs qu'elle rencontre. Le béton est un matériau très hétérogène qui se compose de 70% de volume total de granulats ainsi que les pores contenus dans la matrice [Quiv2012, Anh2016] (Fig.2.5).

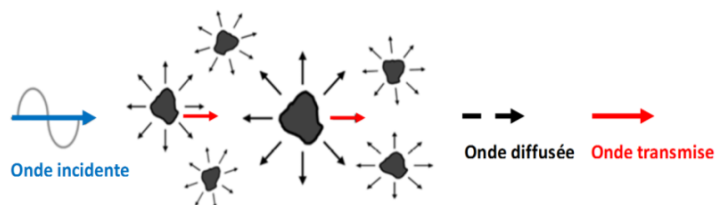


Figure 2.5 : Représentation de la diffusion multiple sur les granulats du béton [Anh2016].

Le rapport entre la longueur d'onde λ_R et la taille de diffuseur d est un facteur très important. Selon ce rapport, on peut distinguer trois régimes :

Quand la longueur d'onde devient comparable à la taille des granulats, c'est le régime stochastique. Lorsque la taille du diffuseur est plus grande que la longueur d'onde, on l'appelle le régime géométrique [Yu2018] et lorsque la taille de diffuseur est faible par rapport à la longueur d'onde, c'est le régime de Rayleigh [Anh2016].

Dans le régime stochastique, le phénomène de diffusion devient très important. Cela conduit à l'atténuation de l'onde.

La diffusion multiple de l'onde dans un milieu hétérogène conduit à un phénomène d'atténuation important [Chaix2011]. Les ondes de Rayleigh sont non dispersives en milieu homogène mais

deviennent dispersives dans le cas d'un milieu dont les propriétés varient avec la profondeur. Cette propriété peut être utilisée pour caractériser des matériaux stratifiés [Anh2016]. De ce fait, il faut élargir le domaine fréquentiel d'étude vers les hautes fréquences afin d'améliorer la caractérisation du matériau [Chaix2011]. En fait, tous ces phénomènes (atténuation, dispersion, diffusion) sont liés entre eux.

Le champ observé (la réponse) se scinde en deux parties (Fig.2.6); une partie cohérente qui résiste au calcul de moyennes sur plusieurs réalisations indépendantes du désordre (plusieurs configurations de position et taille d'hétérogénéités (diffuseurs), et une partie incohérente également appelé « coda » qui s'étend temporellement sur plusieurs dizaines de fois la durée de l'impulsion d'émission [Chek2008]. Cette partie s'annule lors d'un moyennage spatiale [Yu2018].

Ces deux parties du champ contiennent des informations différentes sur la nature du matériau.

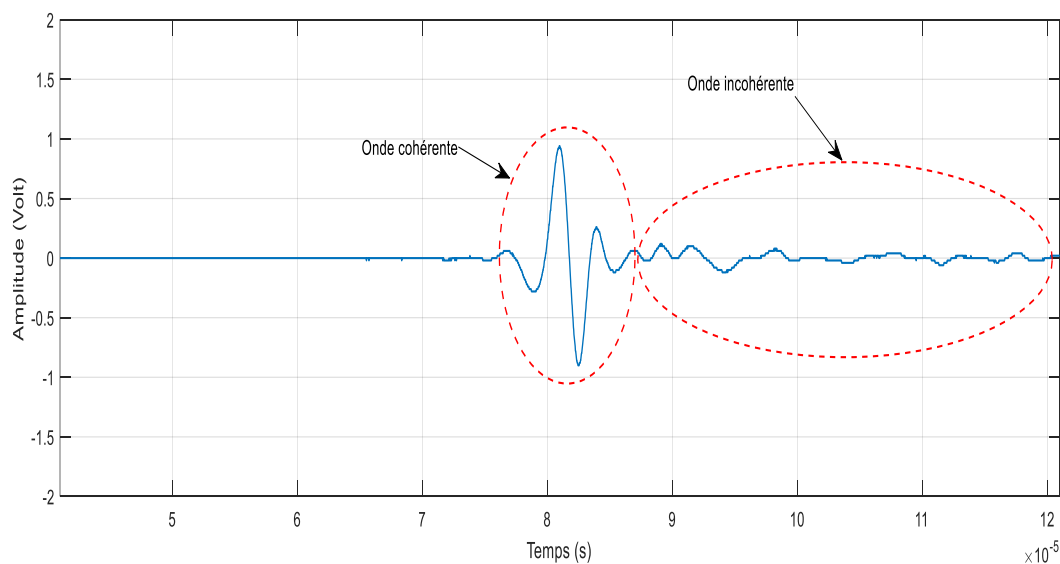


Fig.2.6. Exemples d'onde de Rayleigh cohérente et incohérente transmise à travers un échantillon du béton de rapport $E/C=0,4$ pour $f= 500$ kHz.

Pour l'explication des phénomènes d'atténuation, de dispersion et de diffusion, des modèles analytiques ou numériques basés sur l'acoustique linéaire avec la prise en compte de coexistence des inclusions (granulats) et de la matrice (ciment) sont utilisés [Quiv2012, Anh2016, Chaix2017].

2.6.3 Propagation en régime linéaire

La propagation du champ acoustique peut être considérée linéaire lorsque la réponse du milieu varie proportionnellement avec l'amplitude de la sollicitation, et que les fréquences de la réponse sont celles de la sollicitation [Yu2018]. Elle est décrite dans les matériaux par la loi de Hooke qui traduit la proportionnalité entre la contrainte σ et la déformation ε [Quiv2012].

- La partie cohérente des ondes (onde balistique)

Lorsque la longueur d'onde est suffisamment élevée par rapport à la dimension de l'hétérogénéité comme les granulats alors le phénomène de diffusion est faible (Régime de Rayleigh), et le milieu peut être considéré comme élastique, homogène, linéaire et isotrope [Yu2018]. Cette partie du champ porte des informations sur les vitesses et l'atténuation comme celles mesuré dans un milieu homogène. La partie incohérente est traitée comme du bruit [Chek2008]. Les vitesses de l'onde longitudinale V_L et transversale V_T sont liées aux coefficients de Lamé λ et μ ou bien au module d'Young E et au coefficient de Poisson ν par les relations [Yu2018].

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.10)$$

et

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2.11)$$

ou ρ est la masse volumique du milieu.

- La partie incohérente de l'onde

La partie incohérente est due à des diffractions de l'onde par les obstacles rencontrés dans le béton (sable, granulat, pore d'air ou/et d'eau) ayant parcouru des chemins très complexes et longs. Elle se compose de multiples trains d'onde se propagent dans toutes les directions [Chek2008]. Cette partie est sensible aux propriétés mécaniques du milieu et porte des informations sur leur microstructure [Quiv2012]. Pour exploiter cette propriété, on n'observe plus la propagation de l'onde mais la diffusion de l'énergie [Yu2018].

Dans un milieu viscoélastique hétérogène, l'équation de diffusion s'écrit :

$$D \cdot \Delta \langle E(r, t) \rangle - \frac{\partial \langle E(r, t) \rangle}{\partial t} - \sigma \cdot \langle E(r, t) \rangle = E_0 \delta(r) \delta(t) \quad (2.12)$$

ou D le coefficient de diffusion, appelé la diffusivité en $[\text{m}^2 \cdot \text{s}]^{-1}$, est caractéristique de la structure du matériau. $\langle E(r, t) \rangle$ est la densité locale d'énergie moyenne à la position r au temps t . E_0 est l'énergie initiale à l'instant $t = 0$ liée au terme source. σ est le coefficient de dissipation en $[\text{s}^{-1}]$ qui reflète les propriétés viscoélastiques du milieu. Dans le cas du béton, elle caractérise l'absorption (dissipation) liée à la propriété de la pâte de ciment. Δ est l'opérateur Laplacien et δ la fonction de Dirac. D et σ dépendent de la fréquence [Yu2018].

Des solutions particulières de $\langle E(r, t) \rangle$ pour différentes configurations spatiales : 1D, 2D et 3D respectant les conditions initiales et aux limites, et en utilisant des méthodes d'optimisation. Ceci permet d'estimer les paramètres de cette équation pour approcher les résultats expérimentaux obtenus et ainsi déterminer les observables D et σ et le temps d'arrivée de l'énergie maximale (the arrival time of maximum Energy, ATME) [Yu2018].

2.6.4 Propagation en régime non linéaire

La non linéarité définit le comportement élastique non linéaire des matériaux. En acoustique, elle se traduit par la modification de la vitesse des ondes et par la génération d'harmoniques [Quiv2012]. Il s'agit alors d'étudier les propriétés particulières de la propagation des ondes dans les matériaux lors de fortes sollicitations [Anh2016].

Le CND du béton faisant appel à l'acoustique non linéaire peut être classé en deux grandes familles selon la loi de comportement élastique non linéaire classique et non classique [Quiv2012, Yu2018].

- Elasticité non linéaire classique :

L'application d'une sollicitation statique sur des matériaux comme le béton donne lieu à une loi de comportement non linéaire. La contrainte n'est pas linéaire avec la déformation. Afin de décrire ce problème, des expressions liant la contrainte à la déformation d'ordre deux ou plus ont été proposées. Il s'agit de l'élasticité non linéaire classique [Yu2018].

- Elasticité non linéaire non classique

Elle s'appelle la non linéarité hystérétique, lorsque la déformation observée sur certains matériaux dépend de l'historique du chargement (croissant ou décroissant) pour une même contrainte appliquée. Elle permet de rendre compte des phénomènes d'hystérésis observés dans les matériaux hétérogènes [Quiv2012]. Elle a été observé dans le béton sous une sollicitation quasi-statique cyclique [Yu2018]. D'autres phénomènes non linéaires sont également observés dans le béton. Sous une sollicitation dynamique sur le béton (onde de forte amplitude), le module d'élasticité chute rapidement (quelques millisecondes) et le phénomène est appelé la dynamique rapide. Il est décrit par le comportement non linéaire non classique et le béton devient dans un état conditionné. Lorsque la sollicitation s'arrête, le béton conditionné recouvre ses propriétés initiales (relaxation) sur une durée importante (de quelques dizaines de minutes à quelques heures). Ce phénomène est appelé dynamique lente [Yu2018].

Les méthodes non linéaires non classiques décrivent bien le béton endommagé (carbonatation, endommagement thermique, ...).

Donc les phénomènes précédents vont influencés sur le champ résultant de la propagation de l'onde ultrasonore.

Dans notre étude, nous nous intéressons à la partie cohérente du champ des ondes de surface (Rayleigh) dans le béton en régime d'acoustique linéaire.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu homogène, élastique et isotrope et les modes de génération par peigne et à travers d'un sabot ainsi que les avantages de ce mode de génération (le sabot). Nous avons considéré la propagation des ondes ultrasonores de surface dans le béton et le choix de la matière constituant le sabot. Puis, nous avons présenté les phénomènes qui peuvent influencer sur le champ ultrasonore lors de sa propagation, telles que la dispersion, la diffusion et les différents types de l'atténuation.

**Chapitre 3 : Modélisation
et Simulation de la
propagation des ondes de
Rayleigh dans le béton**

Introduction

Les ondes ultrasonores de surface (Rayleigh) qui se propagent le long de la surface libre ont l'avantage d'être plus adaptés à la caractérisation de l'état de surface des ouvrages de béton que les ondes ultrasonores de volume (*in situ*). Ce chapitre présente une étude analytique de la propagation des ondes de Rayleigh dans le béton. Dans un premier temps, nous allons étudier la propagation de ces ondes dans un milieu homogène, isotrope élastique puis viscoélastique. Par la suite, nous allons considérer la propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu hétérogène à l'aide de la théorie du milieu effectif ainsi que les modèles d'homogénéisation qui peuvent décrire cette propagation, particulièrement dans le béton. Nous terminerons cette étude par une simulation numérique qui traduit la propagation des ondes de Rayleigh dans le béton.

3.1 Propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu homogène élastique et isotrope

On considère un milieu semi-infini homogène, élastique et isotrope qui présente une surface libre en contact avec le vide dans le plan $z = 0$. Ce milieu est caractérisé par une masse volumique ρ et les constantes de Lamé λ et μ (Fig.3.1).

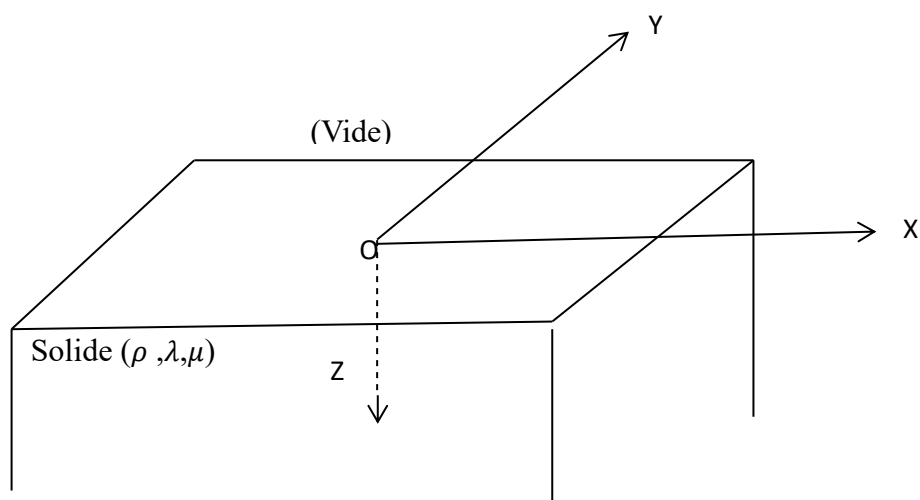


Fig.3.1. Milieu semi-infini en contact avec le vide.

Le milieu est infini dans la direction x et y . Nous étudions la propagation des ondes de Rayleigh dans le plan (x, z) .

Chapitre 3 : Modélisation et Simulation de la propagation des ondes de Rayleigh dans le béton

Le déplacement de particule dérive d'un potentiel acoustique scalaire ϕ et d'un potentiel acoustique vecteur $\vec{\psi}$. Ces potentiels satisfont aux équations de propagation. Il vient :

$$\vec{U} = \vec{\nabla}\phi + \vec{\nabla} \wedge \vec{\psi} \quad (3.1)$$

Les potentiels obéissent aux équations de propagation suivantes :

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi - \frac{1}{V_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \\ \nabla^2 \psi - \frac{1}{V_T^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

V_L et V_T sont respectivement la vitesse de propagation de l'onde longitudinale et celle de l'onde transversale dans le solide. Elles sont définies par les relations :

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (3.3)$$

et

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (3.4)$$

Les vecteurs d'onde s'écrivent : $k_L = \frac{\omega}{V_L}$, $k_T = \frac{\omega}{V_T}$ et $k_R = \frac{\omega}{V_R}$, avec V_R la vitesse de l'onde de Rayleigh.

Pour une onde se propageant selon x, on peut écrire :

$$\frac{\partial}{\partial X} = \partial_X = -jk_R \quad (3.5)$$

Si la surface libre est perpendiculaire à l'axe z et en négligeant la diffraction selon l'axe y, on a :

$$\frac{\partial}{\partial Y} = \partial_Y = 0 \quad (3.6)$$

Les déplacements particuliers s'expriment en fonction des potentiels acoustiques comme :

$$\begin{cases} U_x = \partial_x \phi - \partial_z \psi = -jk_R \phi - \partial_z \psi \\ U_y = \partial_z \psi - \partial_x \psi = -jk_R \psi - \partial_z \psi \\ U_z = \partial_z \phi + \partial_x \psi = \partial_z \phi - jk \psi \end{cases} \quad (3.7)$$

L'onde de Rayleigh est polarisée dans un plan sagittal xz du solide (plan défini par la normale à la surface et la direction de propagation). La propagation ne dépend que de x , z et du temps t . Dans ces conditions, $\vec{\psi}$ ne possède qu'une composante selon la direction oy .

Les composantes du vecteur déplacement sont données alors par :

$$\begin{cases} U_x = \partial_x \phi - \partial_z \psi = -jk_R \phi - \partial_z \psi \\ U_z = \partial_z \phi + \partial_x \psi = \partial_z \phi - jk_R \psi \end{cases} \quad (3.8)$$

En remplaçant ϕ et $\vec{\psi}$ par leurs expressions dans le système (3.2) tels que :

$$\begin{cases} \phi = F(z) e^{j(\omega t - k_R x)} \\ \vec{\psi} = G(z) e^{j(\omega t - k_R x)} \vec{e}_y \end{cases} \quad (3.9)$$

alors

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = \gamma_L^2 F \\ \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = \gamma_T^2 G \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\text{avec } \gamma_L = \sqrt{k_R^2 - k_L^2} \quad \text{et } \gamma_T = \sqrt{k_R^2 - k_T^2}.$$

Pour que l'onde soit retenue près de la surface, il faut que :

$$k_R > k_T > k_L;$$

La vitesse de phase de l'onde de Rayleigh est inférieure à V_L et V_T .

$F(z)$ et $G(z)$ satisfont aux équations (3.2), qui deviennent :

$$\begin{cases} \partial_z^2 F + (k_R^2 - k_L^2) F(z) = 0 \\ \partial_z^2 G + (k_R^2 - k_T^2) G(z) = 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

Chapitre 3 : Modélisation et Simulation de la propagation des ondes de Rayleigh dans le béton

Le système d'équation différentielles (3.11) admet deux solutions mathématiques de la forme :

$$F(z) = Ae^{-\gamma_L z} + A'e^{+\gamma_L z} \quad (3.12)$$

$$G(z) = Be^{-\gamma_T z} + B'e^{+\gamma_T z} \quad (3.13)$$

où γ_L et γ_s étant des réels positifs

Les amplitudes $F(z)$ et $G(z)$ correspondant à la solution physique doivent décroître avec la profondeur z .

Leurs expressions doivent donc satisfaire aux conditions aux limites donc obéissent à :

$\lim_{z \rightarrow \infty} F(z) = 0$ et $\lim_{z \rightarrow \infty} G(z) = 0$. Elles deviennent :

$$F(z) = Ae^{-\gamma_L z} \quad (3.14)$$

$$G(z) = Be^{-\gamma_T z}$$

Finalement ϕ et $\vec{\psi}$ s'écrivent sous la forme :

$$\begin{cases} \phi(x, z, t) = Ae^{-\gamma_L z} e^{j(\omega t - k_R x)} \\ \psi(x, z, t) = Be^{-\gamma_T z} e^{j(\omega t - k_R x)} \end{cases} \quad (3.15)$$

Elles doivent satisfaire aux conditions aux limites sur la surface libre, $z = 0$, qui annulent les contraintes normales T_{xz} et T_{zz} .

Dans un solide homogène et isotrope, la loi de Hooke s'exprime sous la forme :

$$T_{ij} = \lambda \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \mu \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \quad (3.16)$$

Les expressions des composantes du tenseur des contraintes en fonction des potentiels ϕ et $\vec{\psi}$ sont :

$$T_{zx} = \mu \left[2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right] \quad (3.17)$$

$$T_{zz} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \lambda \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + 2\mu \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \quad (3.18)$$

On calcule T_{zx} et T_{zz} en tenant compte des expressions de ϕ et $\vec{\psi}$, puis dans les résultats on pose $z = 0$ pour écrire les conditions aux frontières, c.-à-d. les contraintes sont nulles en $z = 0$.

On a alors :

$$[(\lambda + 2\mu)\gamma_L^2 - \lambda k_R^2]A + 2j\mu\gamma_T k_R B = 0 \quad (3.19)$$

$$2j\gamma_L k_R A - (\gamma_T^2 + k_R^2)B = 0 \quad (3.20)$$

C'est un système linéaire de deux équations homogènes. Il admet une solution non nulle si et seulement si son déterminant est nul :

$$\begin{vmatrix} [(\lambda + 2\mu)\gamma_L^2 - \lambda k_R^2] & 2j\mu\gamma_T k_R \\ 2j\gamma_L k_R & -(\gamma_T^2 + k_R^2) \end{vmatrix} = 0 \quad (3.21)$$

On obtient ainsi :

$$(\gamma_T^2 - k_R^2)[(\lambda + 2\mu)\gamma_L^2 - \lambda k_R^2] - 4\mu\gamma_T \gamma_L k_R^2 = 0 \quad (3.22)$$

Compte tenu de γ_L et γ_S et des expressions des vitesses V_L et V_T , et en posant

$$\xi = \frac{V_T}{V_L} = \frac{k_L}{k_T} \quad \text{et} \quad \eta = \frac{V_R}{V_T} = \frac{k_T}{k_R},$$

on obtient finalement :

$$16(1 - \eta^2)(1 - \eta^2 \xi^2) - (2 - \eta^2)^4 = 0 \quad (3.23)$$

En développant cette équation, on obtient :

$$\eta^6 - 8\eta^4 + 8\eta^2(3 - 2\xi^2) + 16(\xi^2 - 1) = 0 \quad (3.24)$$

Cette équation (3.24), établie par Lord Rayleigh, est valable dans le domaine de validité du module de Poisson $0 < \nu < 0,5$ [Dieu1996]. Elle n'a qu'une seule racine positive réelle k_R inférieure à l'unité qui correspond à l'existence de l'onde de Rayleigh avec :

$$0 < V_R < V_T < V_L$$

Si la vitesse V_R est indépendante de la fréquence, la propagation de l'onde de Rayleigh n'est pas dispersive. Une approximation utile du rapport $\eta = \frac{V_R}{V_T}$ a été proposée par Victorov [Dieu 1996] :

$$\eta \simeq \frac{0,718 - \xi^2}{0,750 - \xi^2} \quad (3.25)$$

avec $0 < \xi = \frac{V_T}{V_L} < 1/\sqrt{2}$

L'expression approchée de cette équation en fonction du coefficient de Poisson s'écrit :

$$\eta \simeq \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \quad (3.26)$$

avec $0 < \nu < 0.5$

A partir des équations (3.8) et (3.15), on peut établir l'expression de chaque composante du déplacement particulière, soit :

$$\begin{cases} U_x = \partial_x \phi - \partial_z \psi = -jk_R A e^{-\gamma_L z} + \gamma_T B e^{-\gamma_T z} \\ U_z = \partial_z \phi + \partial_x \psi = -\gamma_L A e^{-\gamma_L z} - jk_R B e^{-\gamma_T z} \end{cases} \quad (3.27)$$

$$\text{avec } B = \frac{2jk_R \gamma_L}{\gamma_T^2 + k_R^2} \cdot A \quad (3.28)$$

Compte tenu de l'expression (3.27) et en prenant la notation réelle, on obtient les composantes du déplacement selon x et z :

$$\begin{cases} U_x = k_R A \left[e^{-\gamma_L z} - 2 \frac{\gamma_L \gamma_T}{\gamma_T^2 + k_R^2} e^{-\gamma_T z} \right] \sin(\omega t - k_R x) \\ U_z = \gamma_L A \left[e^{-\gamma_L z} - 2 \frac{k_R^2}{\gamma_T^2 + k_R^2} e^{-\gamma_T z} \right] \cos(\omega t - k_R x) \end{cases} \quad (3.29)$$

En posant $\Gamma(z) = k_R \left[e^{-\gamma_L z} - 2 \frac{\gamma_L \gamma_T}{\gamma_T^2 + k_R^2} e^{-\gamma_T z} \right]$

et $\Omega(z) = \gamma_L \left[e^{-\gamma_L z} - 2 \frac{k_R^2}{\gamma_T^2 + k_R^2} e^{-\gamma_T z} \right]$,

on aura :

$$\begin{cases} U_x = A\Gamma(z)e^{j(\omega t - k_R x - \pi/2)} \\ U_z = A\Omega(z)e^{j(\omega t - k_R x)} \end{cases} \quad (3.30)$$

Soit :

$$\begin{cases} U_x = -jA\Gamma(z)e^{j(\omega t - k_R x)} \\ U_z = A\Omega(z)e^{j(\omega t - k_R x)} \end{cases} \quad (3.31)$$

Ces deux composantes sont déphasées de $\pi/2$. Les particules décrivent une ellipse qui se déforme en dessous de la surface car les amplitudes varient différemment avec la profondeur z . L'onde de Rayleigh est non dispersive en milieu homogène quel que soit la fréquence [Ham2014].

3.1.1 Déplacement longitudinal et transversal en fonction de la profondeur normalisée

A l'aide du logiciel Matlab, nous traçons les amplitudes des composantes des déplacements longitudinal et transversal (U_x et U_z) de l'équation (3.31) en fonction de la profondeur normalisée, z/λ_R , pour un mortier avec une vitesse de l'onde longitudinale, transversale et de Rayleigh, $V_L=3950\text{m/s}$, $V_T=2250\text{m/s}$ et $V_R=2072\text{m/s}$ respectivement, à la fréquence $f=500\text{ kHz}$. L'évolution de ces amplitudes en fonction de la profondeur normalisée, z/λ_R , est représentée sur la figure 3.2.

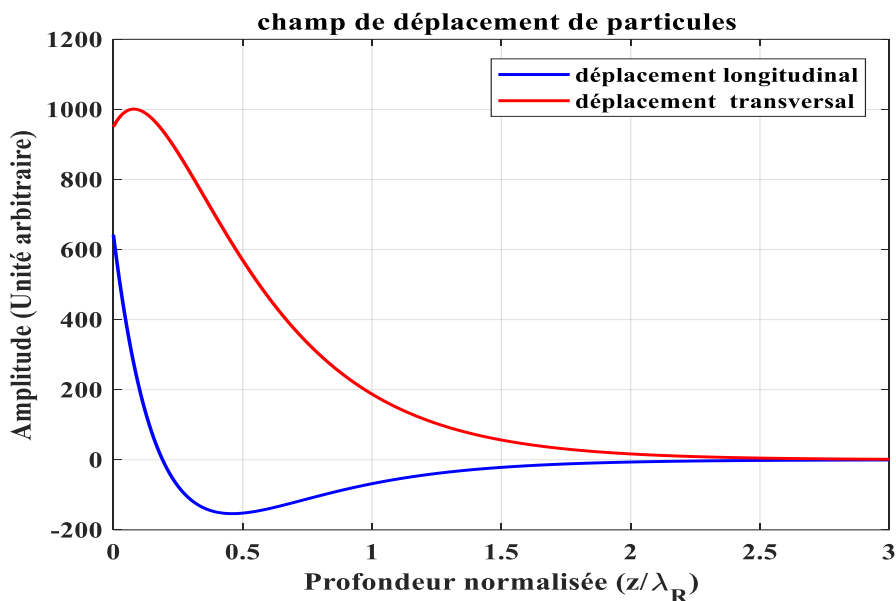


Fig.3.2. Représentation des amplitudes des déplacement longitudinal et transversal des ondes de Rayleigh en fonction de la profondeur normalisée z/λ_R .

On constate que l'amplitude du déplacement longitudinal diminue, change son signe pour $x = 0,2\lambda_R$ et passe par un minimum négatif puis tend vers zéro. Le déplacement de particules des ondes de Rayleigh est elliptique, majoritairement orienté vers l'axe z , donc la polarisation de l'onde a un mouvement elliptique [Chek2008]. Cela est très remarquable lorsque la profondeur est de l'ordre de $(0,2\lambda_R)$ ou le sens de parcours des ellipses est inversé quand la profondeur augmente. L'amplitude du déplacement transversal est d'environ une fois et demi celle du déplacement longitudinal en $x = 0$. Elle augmente, passe par un maximum puis diminue exponentiellement en profondeur. Les deux amplitudes de déplacement tendent vers zéro pour une longueur d'onde de l'ordre de $2\lambda_R$. Donc, il n'y a plus de propagation de l'onde de Rayleigh après cette profondeur d'où leur nom d'ondes de surface.

3.2 Propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu homogène, viscoélastique et isotrope

La propagation des ondes de Rayleigh dans un matériau viscoélastique est décrite par les nombres d'onde complexes k_L^* et k_T^* , les vitesses de l'onde longitudinale V_L^* et l'onde transversale V_T^* . Donc la partie réelle des nombres d'onde k_L^* et k_T^* s'exprime en fonction de la vitesse de phase et la partie imaginaire représente l'atténuation [Chek2008].

La résolution du problème, dans un milieu semi-infini, avec les conditions aux limites de contrainte nulle à la surface, se fait de la même manière que dans le cas d'un milieu élastique, mais en tenant compte les célérités complexes [Chek2008].

L'expression des potentiels solutions des équations devient :

$$\begin{cases} \phi(x, z, t) = A e^{-\gamma_L^* z} e^{j(\omega t - k_R^* x)} \\ \psi(x, z, t) = B e^{-\gamma_T^* z} e^{j(\omega t - k_R^* x)} \end{cases} \quad (3.32)$$

avec $\gamma_L^{*2} = k_R^{*2} - k_L^{*2}$ et $\gamma_T^{*2} = k_R^{*2} - k_T^{*2}$

Donc, on obtient la même équation que (3.24) avec des grandeurs complexes :

$$\text{avec } \eta^* = \frac{V_R^*}{V_T^*} = \frac{k_T^*}{k_R^*} \quad \text{et} \quad \zeta^* = \frac{V_T^*}{V_L^*} = \frac{k_L^*}{k_T^*}$$

V_R^* représente la vitesse de l'onde de Rayleigh complexe en milieu viscoélastique.

$$\text{où} \quad V_R^* = \frac{\omega}{k_R^*} \quad \text{et} \quad k_R^* = \frac{\omega}{V_R} + i\alpha_R$$

De même :

$$V_L^* = \frac{\omega}{k_L^*} \quad \text{et} \quad k_L^* = \frac{\omega}{V_L} + i\alpha_L$$

$$\text{et} \quad V_T^* = \frac{\omega}{k_T^*} \quad \text{et} \quad k_T^* = \frac{\omega}{V_T} + i\alpha_T$$

α_L , α_T et α_R sont les coefficients d'atténuation réels des ondes longitudinale, transversale et de Rayleigh, respectivement.

L'équation (3.31) possède six racines complexes de l'onde de Rayleigh dont trois d'entre elles sont les conjuguées des trois autres.

On cherche les solutions qui correspondent à la propagation progressive selon l'axe x (avec atténuation). L'onde doit être évanescence selon l'axe z .

η^* et ξ^* satisfont au sens physique exprimé par les conditions suivantes :

$$V_R > 0 \rightarrow \Re(k_R^*) > 0$$

$$\alpha_R > 0 \rightarrow \Im(k_R^*) > 0$$

D'autre part, pour avoir une solution dont les potentiels s'atténuent avec la profondeur, on doit avoir $\Re(\gamma_L^*) > 0$ et $\Re(\gamma_T^*) > 0$; soit : $\omega \Re\left(\sqrt{\frac{1}{V_R^*} - \frac{1}{V_m^*}}\right) > 0$, $m \equiv L, T$.

Dans ce cas, les déplacements longitudinal et transversal des particules s'écrivent :

$$\begin{cases} U_x = k_R^* A \left[e^{-\gamma_L^* z} - 2 \frac{\gamma_L^* \gamma_T^*}{\gamma_T^{*2} + k_R^{*2}} e^{-\gamma_T^* z} \right] \sin(\omega t - k_R^* x) \\ U_z = \gamma_L^* A \left[e^{-\gamma_L^* z} - 2 \frac{k_R^{*2}}{\gamma_T^{*2} + k_R^{*2}} e^{-\gamma_T^* z} \right] \cos(\omega t - k_R^* x) \end{cases} \quad (3.34)$$

De même, en posant $\Gamma^*(z) = k_R^* \left[e^{-\gamma_L^* z} - 2 \frac{\gamma_L^* \gamma_T^*}{\gamma_T^{*2} + k_R^{*2}} e^{-\gamma_T^* z} \right]$

et $\Omega^*(z) = \gamma_L^* \left[e^{-\gamma_L^* z} - 2 \frac{k_R^{*2}}{\gamma_T^{*2} + k_R^{*2}} e^{-\gamma_T^* z} \right]$,

on a :

$$\begin{cases} U_x = A\Gamma^*(z)e^{j(\omega t - k_R^*x - \pi/2)} \\ U_z = A\Omega^*(z)e^{j(\omega t - k_R^*x)} \end{cases} \quad (3.35)$$

où

$$\begin{cases} U_x = -jA\Gamma^*(z)e^{j(\omega t - k_R^*x)} \\ U_z = A\Omega^*(z)e^{j(\omega t - k_R^*x)} \end{cases} \quad (3.36)$$

3.2.1 Déplacement longitudinal et transversal en fonction de la profondeur normalisée

Nous avons calculé, à l'aide du logiciel Matlab les amplitudes des composantes de déplacement longitudinal et transversal (U_x et U_z) de l'équation (3.36), en fonction de la profondeur normalisée, z/λ_R , pour un mortier avec des vitesses de l'onde longitudinale, transversale et de Rayleigh, $V_L=3950\text{m/s}$, $V_T=2250\text{m/s}$ et $V_R=2072\text{m/s}$, respectivement, et des coefficients d'atténuation, $\alpha_L = 5,68 \text{ Nep/m}$, $\alpha_T = 23,27 \text{ Nep/m}$, et $\alpha_R = 35 \text{ Nep/m}$, respectivement, à la fréquence $f= 500 \text{ kHz}$ [Chek2008]. L'évolution de ces amplitudes en fonction de la profondeur normalisée, z/λ_R , est représentée sur la figure 3.3.

On remarque que l'allure des amplitudes de déplacement reste la même que dans le cas élastique. La partie négative de la composante transversale devient positive parce que nous traçons le module du déplacement.

Pour les différentes distances de propagation, nous remarquons que les amplitudes sont diminuées à cause de l'atténuation qui est due à l'absorption.

La figure 3.4 représente les amplitudes des déplacements longitudinal et transversal des ondes de Rayleigh en fonction de la profondeur normalisée, pour différentes distances de propagation.

On constate que lorsque la distance de propagation augmente, l'amplitude des composantes longitudinale et transversale de l'onde de Rayleigh déminue. Cela est dû toujours à l'atténuation qui a pour cause l'absorption.

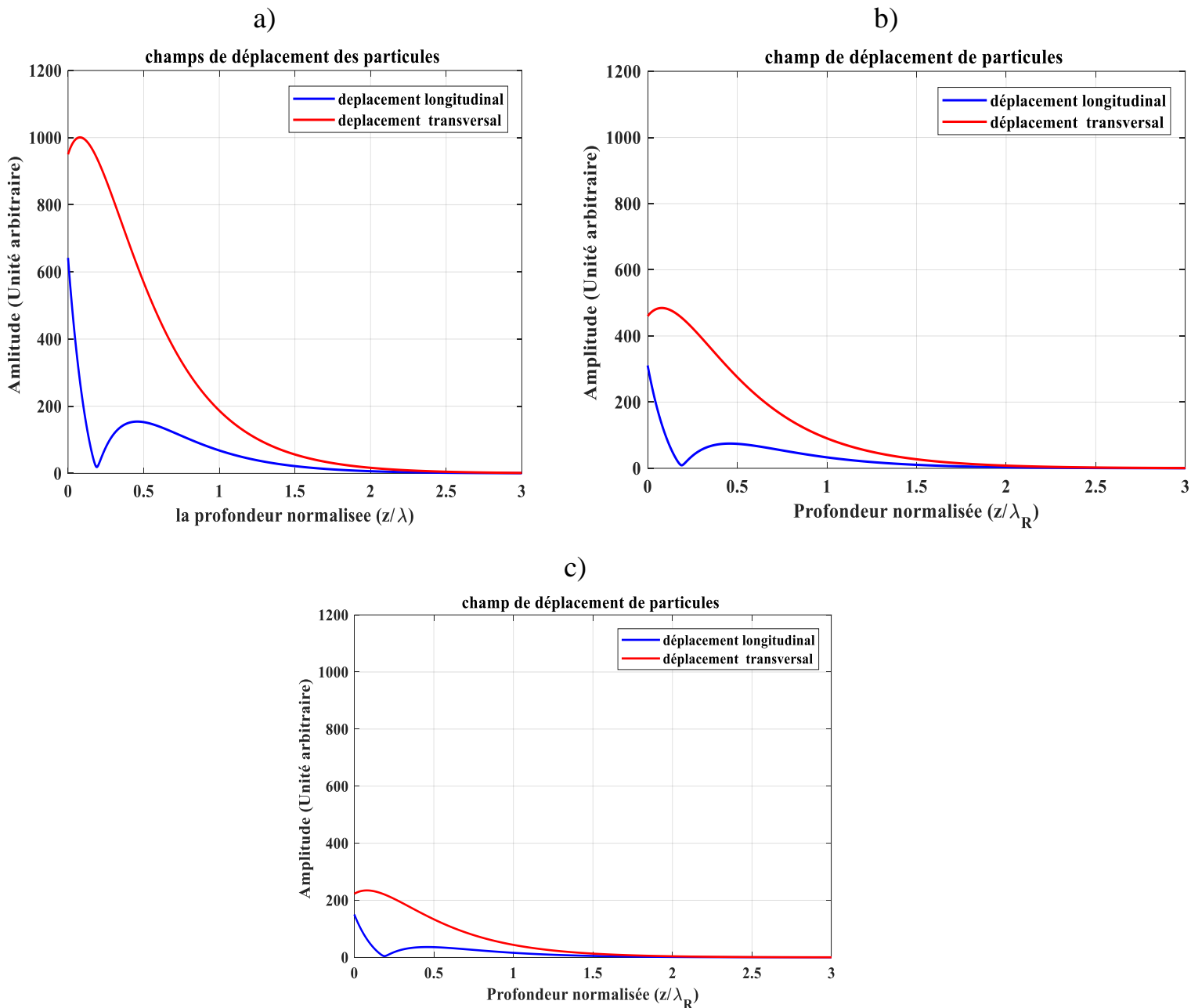
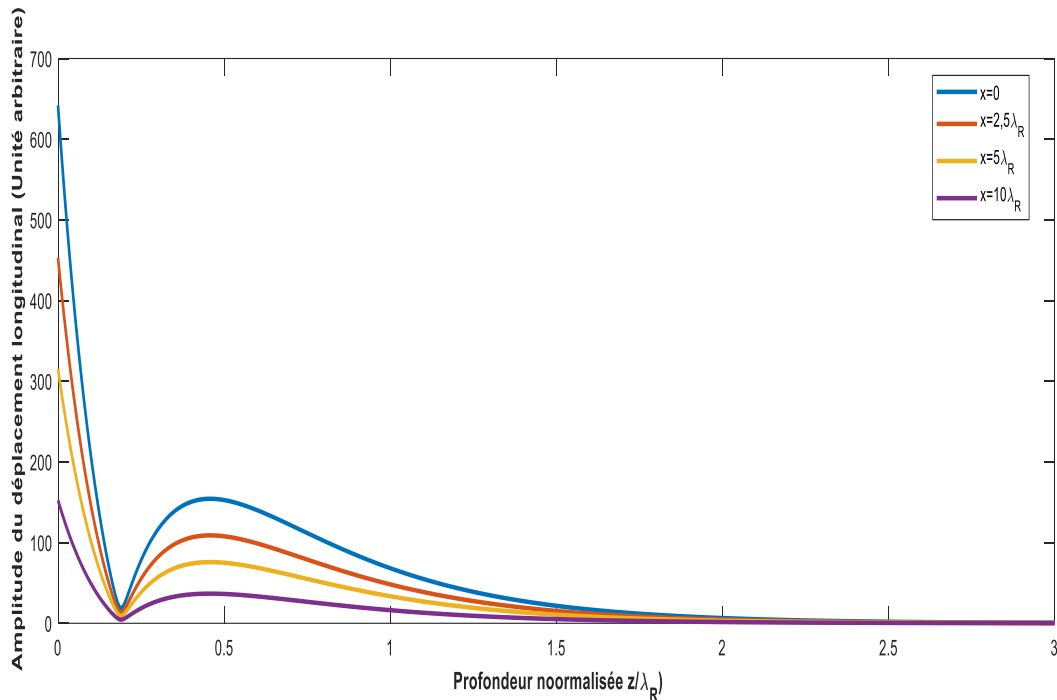


Fig.3.3. Représentation les amplitudes des déplacement longitudinal et transversal des ondes de Rayleigh en fonction de la profondeur normalisé z/λ_R pour (a) $x = 0$, (b) $x = 5\lambda_R$ et (c) $x = 10\lambda_R$.

a)



b)

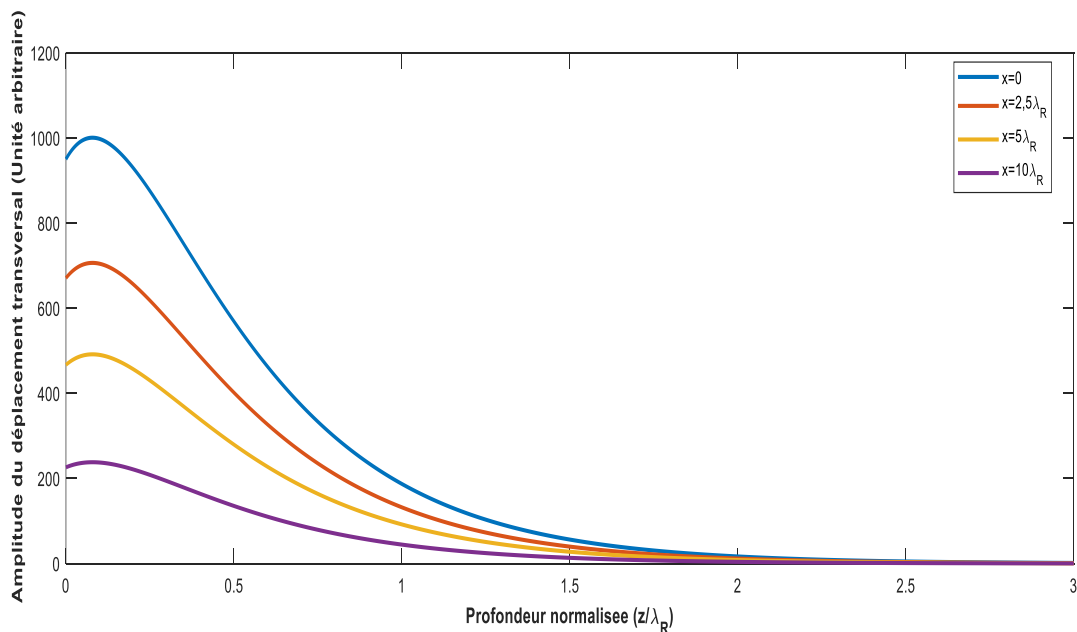


Fig.3.4. Représentation des amplitudes des déplacements longitudinal a) et transversal b) des ondes de Rayleigh en fonction de la profondeur normalisée pour différentes distances de propagation.

La figure 3.5 représente les amplitudes des déplacements longitudinal et transversal des ondes de Rayleigh en fonction de la distance de propagation pour différentes profondeurs de pénétration.

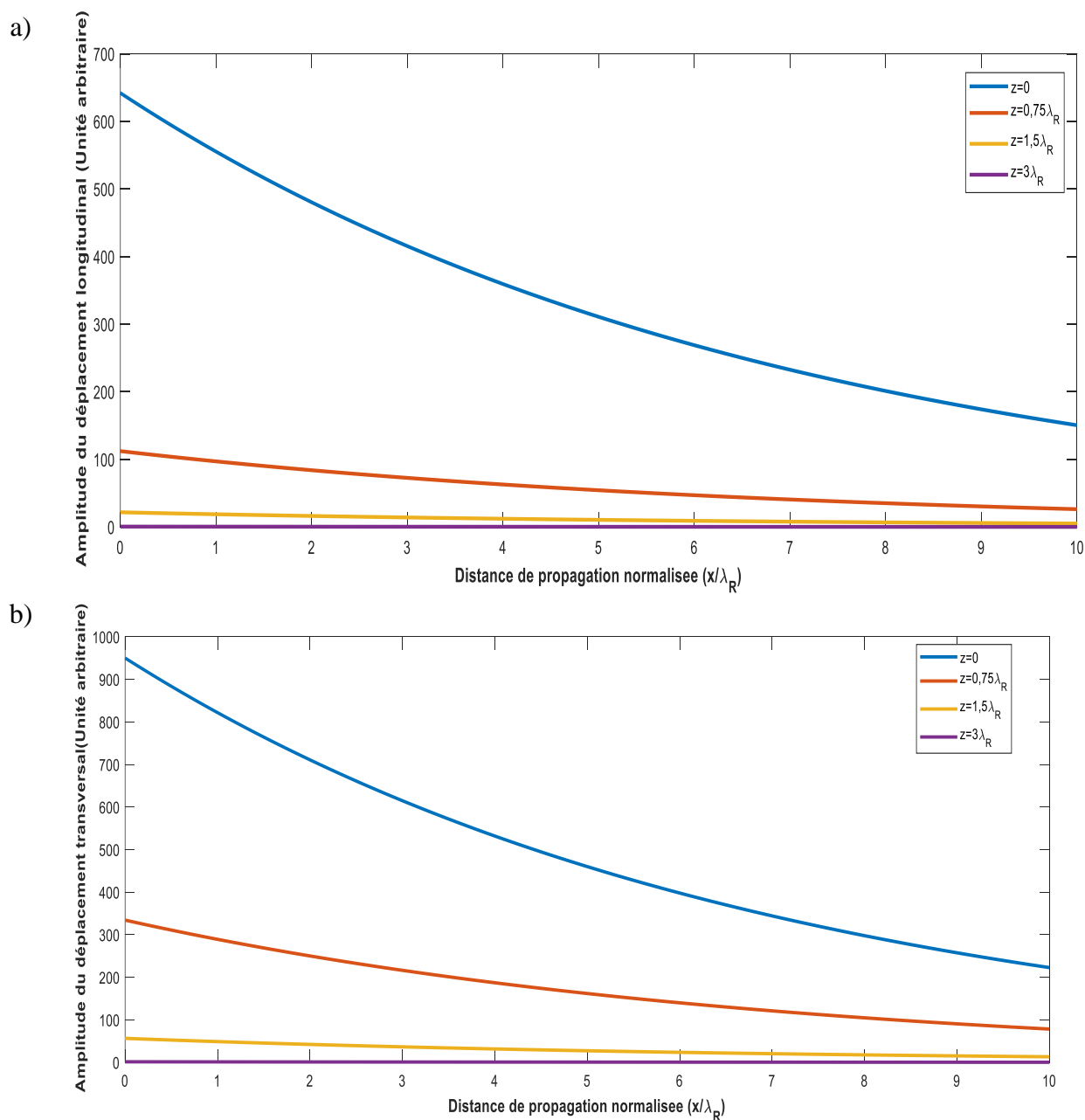


Fig.3.5. Représentation des amplitudes des déplacements longitudinal a) et transversal b) des ondes de Rayleigh en fonction de la distance de propagation normalisée pour différentes profondeurs de pénétration.

On remarque que les amplitudes des déplacements longitudinal et transversal diminuent lorsque la profondeur de pénétration augmente et s'annulent pour $z = 3\lambda_R$. La composante longitudinale s'annule avant la composante transversale. Cela est toujours dû à l'atténuation liée à l'absorption.

3.3 Propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu élastique hétérogène

L'étude théorique de la propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu hétérogène n'a été pas suffisamment traitée dans la littérature. Cette étude se base sur les développements théoriques décrivant la propagation des ondes de volume dans un milieu contenant des diffuseurs et les généralise aux ondes de Rayleigh.

L'objectif de la modélisation analytique est de définir un milieu homogène virtuel qu'on appelle le milieu effectif dont le nombre d'onde et les célérités sont complexes [Chek2008] et où le comportement des ondes serait équivalent à celui au milieu hétérogène réel. La modélisation permet prédire la propagation des ondes ultrasonores dans un milieu hétérogène comme le béton.

De nombreux modèles analytiques d'homogénéisation ont été développés afin de modéliser la propagation des ondes de volume dans un milieu hétérogène. L'un de ces modèles, en l'occurrence ISA, Foldy, Waterman et Truell, Fikioris et Waterman, sera généralisé aux ondes de surface.

3.3.1 Interaction des ondes ultrasonores de volume avec un milieu hétérogène

La propagation des ondes ultrasonores de volume dans un milieu hétérogène qui se compose d'une matrice homogène et des inclusions aussi homogènes réparties dans ce milieu d'une façon aléatoire conduit à l'interaction du champ ultrasonore avec les hétérogénéités.

Lors de cette propagation, l'interaction de l'onde ultrasonore avec les obstacles contenus dans le milieu produit une diffusion de l'onde, c'est-à-dire une redistribution du champ ultrasonore dans toutes les directions (voir chapitre.2). Dans le cas du béton, nous considérons le phénomène de la diffusion multiple [Chaix2012].

Nous distinguons trois domaines de diffusion de l'onde ultrasonore avec les inclusions dans un milieu hétérogène, selon la dimension a des diffuseurs et la longueur d'onde λ de l'onde incidente sur le diffuseur :

- Le domaine de Rayleigh lorsque $a \ll \lambda$:

Dans ce cas, la diffusion est faible et le coefficient d'atténuation s'écrit :

$$\alpha = \alpha_a \cdot f + T_1 \cdot a^3 \cdot f^4$$

- Le domaine stochastique lorsque $a \approx \lambda$:

Dans ce cas la diffusion est forte. Le coefficient d'atténuation est donné par :

$$\alpha = \alpha_a \cdot f + T_2 \cdot a \cdot f^2$$

- Le domaine géométrique lorsque $a \gg \lambda$:

Dans ce cas, la diffusion est forte avec déviation de l'onde dans l'obstacle. Le coefficient d'atténuation s'écrit :

$$\alpha = \alpha_a \cdot f + T_3 \cdot a^{-1}$$

f représente la fréquence des ondes ultrasonores, T_1, T_2 et T_3 sont les coefficients de diffusion et α_a le coefficient d'absorption.

Le domaine stochastique sera visé parce que les interactions sont importantes entre l'onde incidente et les diffuseurs ce qui nous permet d'observer le phénomène de diffusion multiple (Fig.3.6).

Diverses approches, formalismes et approximations ont été faites afin d'étudier ce phénomène et afin de déterminer les paramètres du milieu homogène équivalent.

Le champ total reçu se compose de deux parties, une partie incidente non diffusée et une partie diffusée en un point r . Il s'écrit :

$$\varphi(\vec{r}) = \varphi_{inc}(\vec{r}) + \varphi_{dif}(\vec{r}, \vec{r}_j) \quad (3.37)$$

où $\varphi(r)$ représente le potentiel acoustique scalaire au point du champ de l'espace repéré par le vecteur \vec{r}

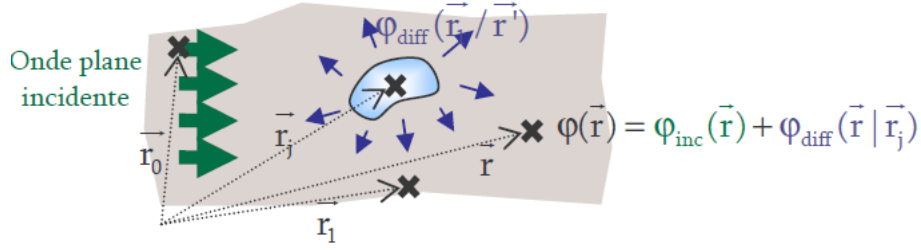


Fig.3.6. Représentation de la diffusion sur un obstacle [Ross 2007]

Waterman et Truell [Wat1961] définissent un opérateur linéaire $T(\vec{r}_j)$ qui représente le phénomène de diffusion par un obstacle placé en \vec{r}_j en fonction de la nature, de la taille et de la géométrie du diffuseur. Cet opérateur permet de relier le champ incident au champ diffusé comme suit [Othm2012] :

$$\varphi_{diff}(\vec{r}, \vec{r}_j) = T(\vec{r}_j) \cdot \varphi_{inc}(\vec{r}) \quad (3.38)$$

Dans un milieu fortement hétérogène avec N- diffuseurs, placés respectivement à $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N$, nous définissons la relation entre le champ diffusé $\varphi_{diff}(\vec{r}, \vec{r}_j; \omega)$ par le $j^{\text{ème}}$ diffuseur et le champ d'excitation $\varphi_E(\vec{r}, \vec{r}_j; \dots \vec{r}_N)$ qui agit sur ce $j^{\text{ème}}$ diffuseur, soit :

$$\varphi_{diff}(\vec{r}, \vec{r}_j; \vec{r}_1 \dots \vec{r}_N) = T(\vec{r}_j) \cdot \varphi_E(\vec{r}, \vec{r}_j; \vec{r}_1 \dots \vec{r}_N), j = 1, \dots N \quad (3.39)$$

Nous supposons connu l'opérateur de diffusion $T(\vec{r}_j)$ du diffuseur en \vec{r}_j

et nous avons

$$\varphi_E(\vec{r}, \vec{r}_j; \dots \vec{r}_N) = \varphi_{inc}(\vec{r}) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^N T(\vec{r}_k) \varphi_E(\vec{r}, \vec{r}_k; \dots \vec{r}_N) \quad (3.40)$$

Le champ total devient :

$$\varphi(\vec{r}) = \varphi_{inc}(\vec{r}) + \sum_{k=1}^N T(\vec{r}_k) \varphi_E(\vec{r}, \vec{r}_k; \dots \vec{r}_N) \quad (3.41)$$

En remplaçant l'équation (3.40) dans l'équation (3.41), nous obtenons :

$$\varphi(\vec{r}) = \varphi_{inc}(\vec{r}) + \sum_{j=1}^N T(\vec{r}_j) \cdot \varphi_{inc}(\vec{r}) + \sum_{j=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^N T(\vec{r}_k) T(\vec{r}_j) \cdot \varphi_{inc} + \dots \quad (3.42)$$

Le premier terme correspond à l'onde balistique, le second au premier ordre de diffusion (la diffusion simple), le troisième terme au second ordre de diffusion (le début de la diffusion multiple).

a. Théorie du milieu effectif

Nous considérons un milieu réel qui est un milieu hétérogène caractérisé par une matrice homogène avec les paramètres ρ_0, k_{L0} et k_{T0} , qui sont la masse volumique et les nombres d'ondes des ondes longitudinales et transversales respectivement, et des inclusions caractérisées par ρ_1, k_{L1}, k_{T1} et qui ne sont pas invariants par translation si on passe de la matrice à l'hétérogénéité et vice-versa. D'autre part, on considère un milieu proche du milieu réel qui est un milieu virtuel homogène équivalent avec les caractéristiques désignées par ρ_{eff}, k_{Leff} et k_{Teff} , et qui sont invariantes par translation. Ce milieu s'appelle le milieu effectif (Fig.3.7).

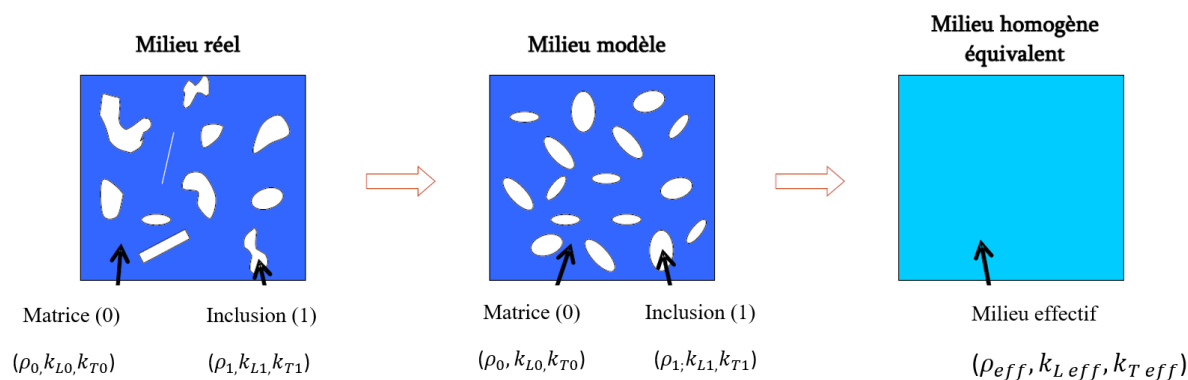


Fig.3.7. Représentation du milieu réel, modèle géométrique et milieu homogène équivalent [Chaix2012].

La modélisation analytique nous permet de déterminer les paramètres du milieu effectif ρ_{eff}, k_{Leff} et k_{Teff} [Othm2013].

De nombreuses approches et approximations ont été utilisées afin d'obtenir un milieu homogène acoustiquement équivalent ; cette opération s'appelle l'homogénéisation.

Nous distinguons trois types de modèles, quasi-statique, statique et dynamique [Othm2012].

Les modèles quasi-statique et statique, dits de Kuster, Tokso, et Berryman, ne prennent en compte que la diffusion simple. Ces modèles sont limités parce qu'ils reposent sur les équations d'équilibre

et ne font pas intervenir la fréquence des ondes, et sont conçus pour les milieux où la concentration des diffuseurs est faible [Chaix2012], [Yu2018].

Dans le cas où la longueur d'onde est de l'ordre de la taille des diffuseurs, on passe au régime stochastique qui correspond aux modèles dynamiques. Les modèles d'homogénéisation sont basés sur la moyenne statistique de plusieurs équations de diffusion [Chaix2012].

Il existe le formalisme des « T-matrices » dont le modèle de Waterman et Truell [Wat1961] et les formalismes utilisant des fonctions de Green dont l'Independent Scattering Approximation (ISA) [Yu2018], [Yu.T2018], [Chek2008], [Mam2005].

b. Formalisme de Green

Dans un milieu homogène, l'équation de Green est solution de l'équation de Helmholtz. Elle dépend des deux variables r et r' [Chek2008].

$$(\Delta + k_0^2(\omega))G_0(\omega, r, r') = \delta(r - r') \quad (3.43)$$

$G_0(\omega, r, r')$ correspond au champ généré au point r par une source ponctuelle de pulsation ω placée en r' dans le milieu homogène dont le nombre d'onde $k_0 = \frac{\omega}{v_0}$. G_0 dépend de la variable $(r - r')$. Le milieu est invariant par translation.

Dans un milieu hétérogène, l'équation de Green est solution de l'équation de Helmholtz qui dépend de la variable r [Chek2008], [Yu2018] compte tenu de l'équation (3.44) :

$$\Delta G(\omega, r, r') + k^2(r) \cdot G(\omega, r, r') = -(\log \rho(r) \cdot \nabla)G(\omega, r, r')\delta(r - r') \quad (3.44)$$

$k_{eff}(r) = \frac{\omega}{v(r)}$ est le nombre d'onde en milieu hétérogène au point r , pour le milieu effectif.

Posons :

$$k_{eff}(\omega) = k_0^2(\omega) - \Sigma(\omega) \quad (3.45)$$

Le terme Σ est appelé l'opérateur de masse. Généralement, cet opérateur dépend de ω et des deux variables d'espace r et r' et s'écrit $\Sigma(\omega, r, r')$. Dans le cas d'un milieu effectif, il se réduit à $\Sigma(\omega, r - r')$ [Mam2005].

Notons que la fonction de Green moyenne en milieu effectif vérifie la même dépendance spatiale.

La transformée de Fourier spatiale de Σ dépend de ω et du seul vecteur d'onde k avec la relation [Mam2005] :

$$\Sigma(\omega, k) = \int \Sigma(\omega, r - r') e^{j(-k \cdot (r - r'))} d(r - r') \quad (3.46)$$

Σ est une valeur complexe donc le nombre d'onde est un nombre complexe dont la partie imaginaire est non nulle. Donc le milieu effectif est un milieu non atténuant [Chek2008]. Cet opérateur n'est pas calculable analytiquement du fait de l'infinité des termes qui le composent [Mam2005]. Il est évalué selon différentes hypothèses dans les modèles d'homogénéisation [Yu2018].

3.3.2 Independent Scattering Approximation (ISA)

Les méthodes se basent sur la fonction de Green qui considère que la propagation dans le milieu hétérogène est décrite par un nombre d'onde qui dépend du point r de l'espace [Othm2013].

La résolution de la fonction de Green conduit à la fonction qui définit le nombre d'onde

Dans l'approximation ISA, $\Sigma = n \langle k_0 | t | k_0 \rangle$, où n est la densité des diffuseurs dans le milieu effectif et $\langle k_0 | t | k_0 \rangle$, est un opérateur de transition entre l'onde incidente sur un diffuseur et l'onde diffractée.

k_0 est le vecteur d'onde de l'onde incidente et de l'onde diffractée. Ainsi, nous ne considérons que la diffusion vers l'avant dans cette approximation.

Le nombre d'onde du milieu effectif devient :

$$k_{eff}^2(\omega) = k_0^2(\omega) - n \langle k_0 | t | k_0 \rangle \quad (3.47)$$

$$k_{eff} = k_0 + \frac{2\pi n_0 f(\theta)}{ik_0} \quad (3.48)$$

$f(\theta)$ est la fonction de forme ou d'amplitude telle que $f(\theta) = f(0) = \text{constante}$.

Pour la propagation de l'onde mécanique dans un milieu élastique, nous considérons deux types d'ondes, les ondes longitudinales et les ondes transversales.

Les nombres d'onde longitudinal et transversal $k_{L\,eff}$ et $k_{T\,eff}$ du milieu effectif, dans une matrice élastique, sont définis par [Chek2008] :

$$k_{L\,eff}^2(\omega) = k_{L,0}^2(\omega) - n \left\langle k_{L,0} \middle| t \middle| k_{L,0} \right\rangle \quad (3.49)$$

$$k_{T\,eff}^2(\omega) = k_{T,0}^2(\omega) - n \left\langle k_{T,0} \middle| t \middle| k_{T,0} \right\rangle \quad (3.50)$$

Les nombres d'ondes étant des nombres complexes, les vitesses de phase et l'atténuation sont définies comme suit :

$$k_{L\,eff}(\omega) = \frac{\omega}{v_L^*} + i\alpha_L^* \quad (3.51)$$

$$k_{T\,eff}(\omega) = \frac{\omega}{v_T^*} + i\alpha_T^* \quad (3.52)$$

Le nombre d'onde du milieu effectif est exprimé en fonction du nombre d'onde dans la matrice, de la densité de diffuseurs et de l'opérateur de transition correspondant au comportement en diffusion "vers l'avant" d'un diffuseur en champ lointain [Chek2008] :

Cette notation est aussi valable dans le cas 2D que dans le cas 3D.

Ce modèle est valable pour les faibles concentrations de diffuseurs ($\ll 10\%$) [Othm2013].

3.3.3 Théorie de Foldy

En 1945, Foldy [Fol1945] a proposé que la concentration des diffuseurs est faible et sa répartition est uniforme d'autre part. Il a considéré que les diffuseurs sont isotropes et ponctuels négligeant les interactions doubles et triples entre eux [Fol1945].

L'expression centrale de la théorie de Foldy [Fol1945] amène le même résultat que l'ISA :

$$k_{eff} = k_0 + \frac{2\pi n_0 f(\theta)}{ik_0} \quad (3.53)$$

$T(\vec{r}_j) = f^{rj} \cdot \varphi_E(\vec{r}, \vec{r}_j)$ est un opérateur linéaire qui représente le phénomène de diffusion d'un obstacle placé en \vec{r}_j . n_0 est la densité des diffuseurs.

3.3.4 L'approximation Quasi Cristalline (QCA)

Cette approximation est utilisée lorsque la distance entre les diffuseurs est beaucoup plus faible que la longueur d'onde utilisée. La moyenne des configurations de (QCA) ne porte plus uniquement sur la position des diffuseurs mais aussi sur leur taille [Othm2013].

3.3.5 Modèle de Waterman et Truell (WT)

A partir de l'approximation Quasi Cristalline (QCA), Waterman et Truell [Wat1961] proposent le calcul du nombre d'onde effectif. Ce modèle est similaire de l'ISA avec un terme d'ordre deux faisant intervenir la rétrodiffusion [Othm2013].

Les hypothèses proposées par Waterman et Truell sont :

- Le milieu diffusant est limité par le plan $x=0$; il est semi infini.
- La densité volumique est constante dans le milieu ;
- La répartition des diffuseurs est supposée aléatoire ;
- L'onde incidente est une onde plane ;
- Les diffuseurs sont sphériques et anisotropes ;
- Deux diffuseurs ne peuvent pas avoir leur centre au même point ;

Cette dernière condition ne permet pas d'éviter le chevauchement entre deux obstacles [Ross 2007].

Pour tenir compte des différentes taille et géométrie des diffuseurs, Waterman a proposé de faire la moyenne sur les fonctions de répartitions ou de distributions couplées aux fonctions d'amplitudes [Ross 2007].

La théorie de Waterman et Treull est donnée par [Chek2008] :

$$k_{eff}^2(\omega) = k_0^2(\omega) - n\langle k_0|t|k_0 \rangle + \left(\frac{n}{2k_0^2}\right)^2 (\langle k_0|t|k_0 \rangle^2 - \langle k_0|t|-k_0 \rangle^2), \quad (3.54)$$

où n est la densité volumique du milieu, ou par l'expression (3.55) [Wat1961] :

$$\left(\frac{k_{eff}}{k_0}\right)^2 = \left[1 + \frac{2\pi n f(0)}{k_0^2}\right]^2 - \left[\frac{2\pi n f(\pi)}{k_0^2}\right]^2 \quad (3.55)$$

avec le critère de validité $\frac{n\sigma_d}{k_0} \ll 1$.

σ_d représente la section efficace du diffuseur.

Ce modèle est le plus couramment utilisé aujourd'hui afin d'étudier le phénomène de diffusion multiple dans les roches et les ciments encore liquide [Chek2008]. Il permet aussi de traiter plusieurs types et tailles de diffuseurs d'une manière simple et peu coûteuse en temps de calcul [Othm2013].

3.3.6 Modèle de Fikioris et Waterman (FW)

Ce modèle a été établi à la base pour des diffuseurs sphériques comme le modèle de Waterman et Treull, mais le centre du diffuseur est éloigné d'un autre centre d'une distance permettant d'éviter le chevauchement possible entre les obstacles [Othm2013].

Ce formalisme n'a été validé par aucune expérimentation à part le cas de diffusion élastique cylindrique dans une matrice fluide [Othm2013].

3.3.7 Modèle de Percus et Yevick (PY)

Ce modèle a été établi également sur la base de diffuseurs sphériques. Il donne la possibilité de prendre en compte la variation locale de la densité conditionnelle. Ceci est très intéressant dans le cas de la localisation forte [Othm2013].

Nous constatons qu'à partir d'une certaine distance de rapprochement entre deux obstacles, la variation de densité est quasiment constante.

Comme pour le cas du modèle de Fikioris [Fik1964] et Waterman [Wat1961] le nombre d'onde effectif doit être complexe k_{eff} [Othm2013].

3.3.8 Coherent Potential Approximation (CPA)

Dans cette approche, nous ne caractérisons plus la propagation dans la matrice par le nombre d'onde k_0 mais par un nombre d'onde inconnu \bar{k} . L'idée de CPA est de trouver le nombre d'onde dans l'expression de Foldy (ou de l'ISA) par itération [Othm2013].

Cette méthode est plus robuste mais plus coûteuse en temps de calcul que les modèles de Waterman & Treull ou Fikioris et Waterman [Othm2013].

3.3.9 Generalized Self-Consistent Model (GSCM)

Un processus est caractérisé par une équation implicite, résultat des itérations sur les modèles précédents : ISA, WT, FW... [Othm2013] afin de converger vers un milieu effectif. Le processus consiste à remplacer les paramètres effectifs par ceux calculés à l'itération précédente. Par exemple, l'ISA sert de base au modèle « Cohérent Potential Approximation » (CPA) et le modèle de Waterman-Truell (WT) pour « Generalized Self Consistent Model » (GSCM) [Yu2018].

La validité expérimentale de ces modèles dynamiques a été réalisée dans des milieux avec une matrice liquide ou solide et des diffuseurs liquides ou gazeux (air), et avec une faible fraction des diffuseurs, ce qui correspond à l'hypothèse d'un milieu dilué, entre quelques pourcents à 30%. Le cas d'une matrice solide avec des diffuseurs solides comme le béton a été rarement étudié [Chaix2012].

Chaix [Chaix2012] a fait une étude expérimentale comparative entre le modèle de WT et le modèle de GSCM dans le cas des matériaux cimentaires contenant des billes de verre pour une fraction volumique de diffuseurs de l'ordre de 30%, avec les paramètres de comparaison qui sont toujours la vitesse de propagation de phase et l'atténuation des ondes longitudinales. Les billes ont une taille entre 3 et 10 mm dans la gamme des fréquences entre 200 kHz et 1,2 MHz (les basses fréquences). Les résultats obtenus montrent que le modèle de GSCM montre un bon accord avec les données expérimentales en termes de vitesse de phase et d'atténuation, alors que le modèle de WT ne montre qu'un bon accord avec la vitesse de phase pour une fraction de 34,1% des billes de verre de diamètre de 3 mm et de fraction de 32,1% de billes de verre de diamètre de 10 mm [Chaix2012].

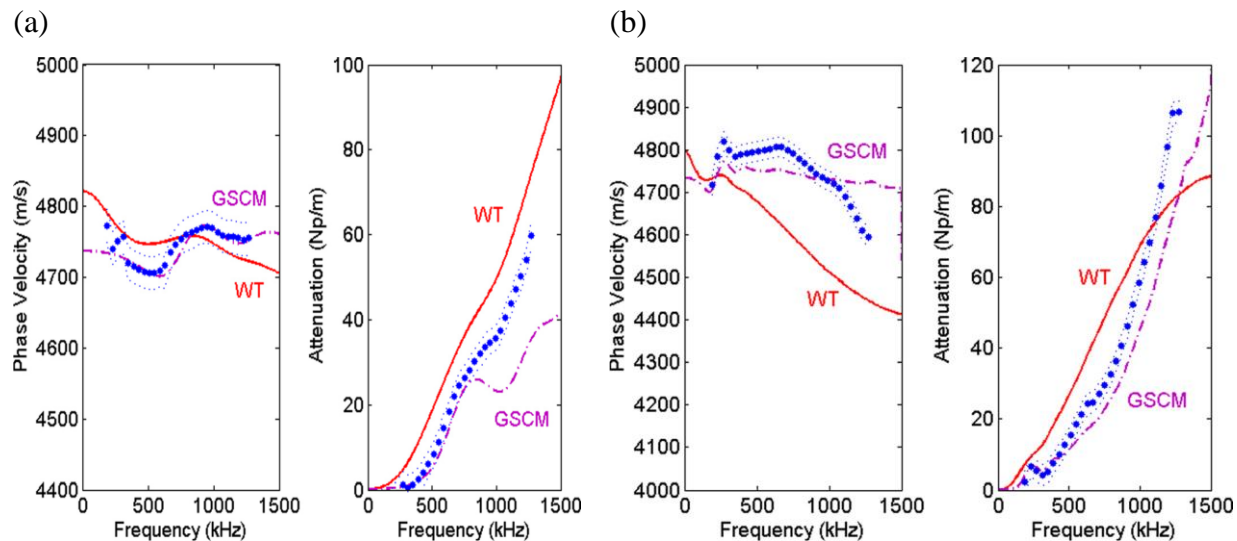


Fig3.8. Validation expérimentale (points bleus) du modèle de WT (rouge) et de GSCM (violet) sur des matériaux cimentaires contenant (a) 34,1 % de sphères de verre de diamètre 3 mm et (b) 32,1 % de sphères de verre de diamètre 10 mm [Chaix 2012].

A notre connaissance, la modélisation de la propagation des ondes ultrasonores de surface dans un milieu hétérogène élastique n'a pas été faite auparavant. Nous allons faire une projection sur les modèles étudiés pour la propagation des ondes ultrasonores de volume cités plus haut dans l'état de l'art. Les paramètres du milieu effectif trouvés vont être injectés dans le modèle que nous avons utilisé pour l'étude de la propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu homogène élastique isotrope.

3.4 Simulation numérique de la propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu élastique hétérogène

Dans notre simulation, nous utilisons deux modèles d'homogénéisation ISA et Waterman-Truell sur une matrice cimentaire qui est un mortier. La matrice comprend des diffuseurs sphériques identiques (Fig.3.9). Dans cette simulation, la matrice et les inclusions sont supposés être des matériaux élastiques, homogènes et isotropes. Les inclusions sont distribuées aléatoirement et d'une manière homogène dans la matrice. Les constantes acoustiques des différents matériaux sont données par le tableau (Tab.3.1) d'après [Chek2008].

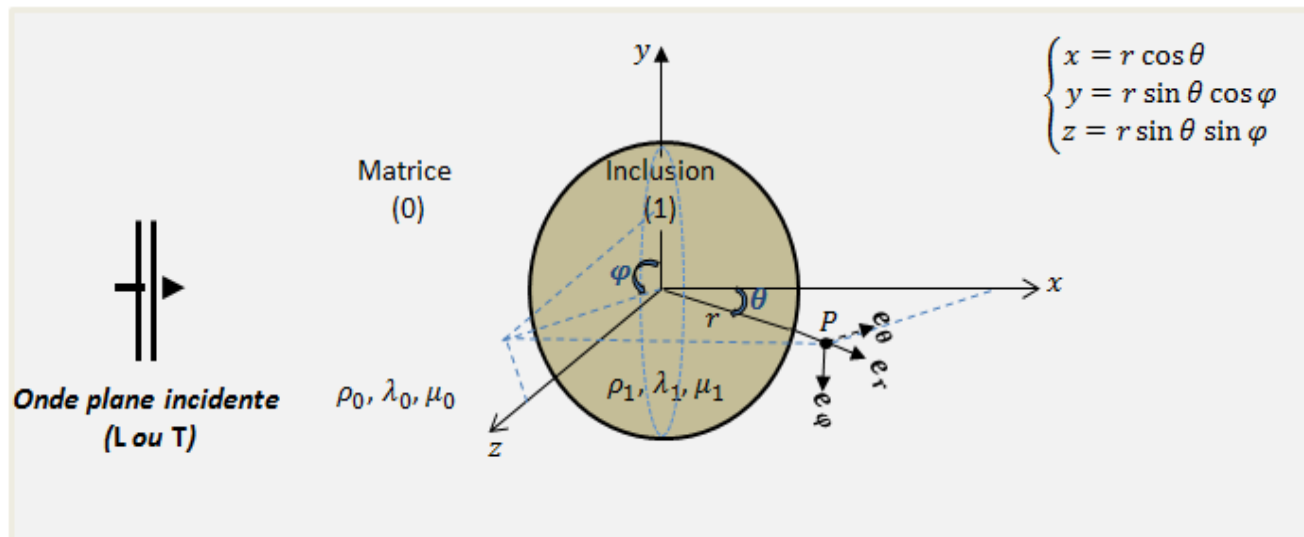


Fig.3.9. Inclusion sphérique élastique suspendue dans une matrice homogène élastique [BA2016].

	Vitesse longitudinale V_L (m/s)	Vitesse transversale V_T (m/s)	Masse volumique ρ (kg/m ³)
Mortier	3950	2250	2050
Gravier	4300	2475	2610

Tab.3.1. Propriétés de la matrice (mortier) et des inclusions (granulats) utilisés dans la simulation numérique.

La figure 3.10 représente la variation de la vitesse de phase longitudinale pour un mortier avec la taille du diffuseur (Gravier) $d=3\text{mm}$ pour une concentration volumique, $\tau=1\%$, selon les modèles de WT (en bleu) et le modèle ISA (en rouge) Eq. (3.48) et (3.55).

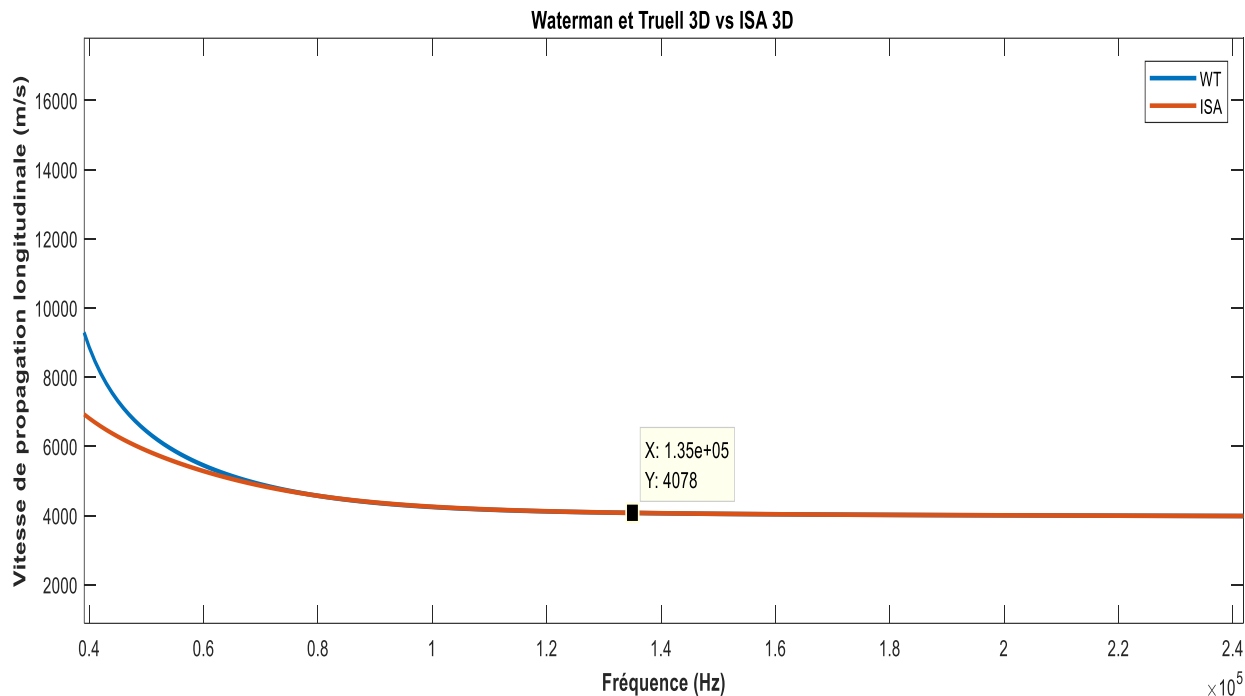


Fig.3.10. Evolution de la vitesse de l'onde longitudinale en fonction de la fréquence selon les modèles de WT et ISA.

Nous observons que la vitesse de l'onde longitudinale est autour de 4078 m/s selon les deux modèles. Les résultats obtenus à l'aide des deux modèles sont similaires avec un léger écart dans la gamme des basses fréquences. Nous pouvons expliquer cet écart par le fait que le modèle de WT considère deux directions de diffusion vers l'avant et vers l'arrière alors que le modèle ISA ne prend en compte que la diffusion vers l'avant [Chek2008]. Cette différence dans les directions de diffusion n'est importante que dans la gamme des très faibles fréquences (inférieures à 10 kHz pour cette taille de diffuseur).

La figure 3.11 représente la variation de la vitesse de phase transversale pour un mortier avec des diffuseurs en gravier de mêmes caractéristiques et dans les mêmes conditions ($d=3$ mm, $\tau=1\%$).

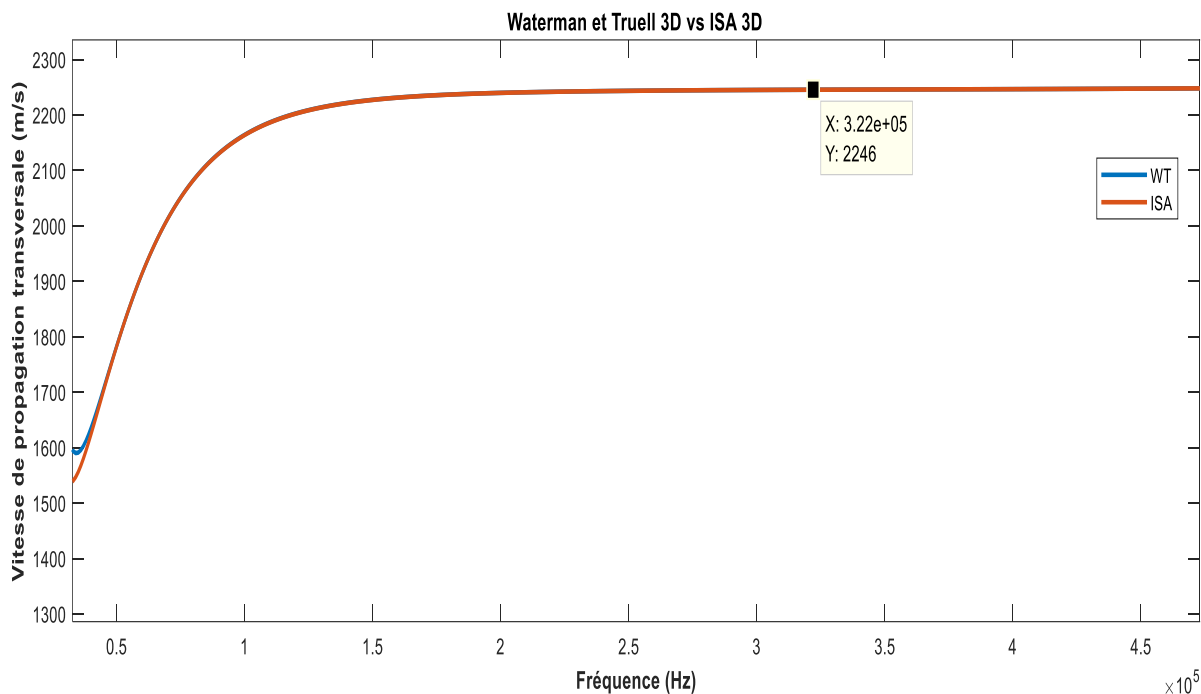


Fig.3.11. Evolution de la vitesse de l'onde transversale en fonction de la fréquence selon les modèles de WT et ISA.

Nous pouvons faire les mêmes remarques que pour les ondes longitudinales sauf que la vitesse de l'onde transversale est autour de 2246 m/s selon les deux modèles. La figure 3.12 montre que la limite entre le domaine des basses fréquences ($k.a \ll 1$) et le domaine des hautes fréquences ($k.a \gg 1$) se situe à $f = 210$ kHz pour l'onde longitudinale et à $f = 118$ kHz pour l'onde transversale.

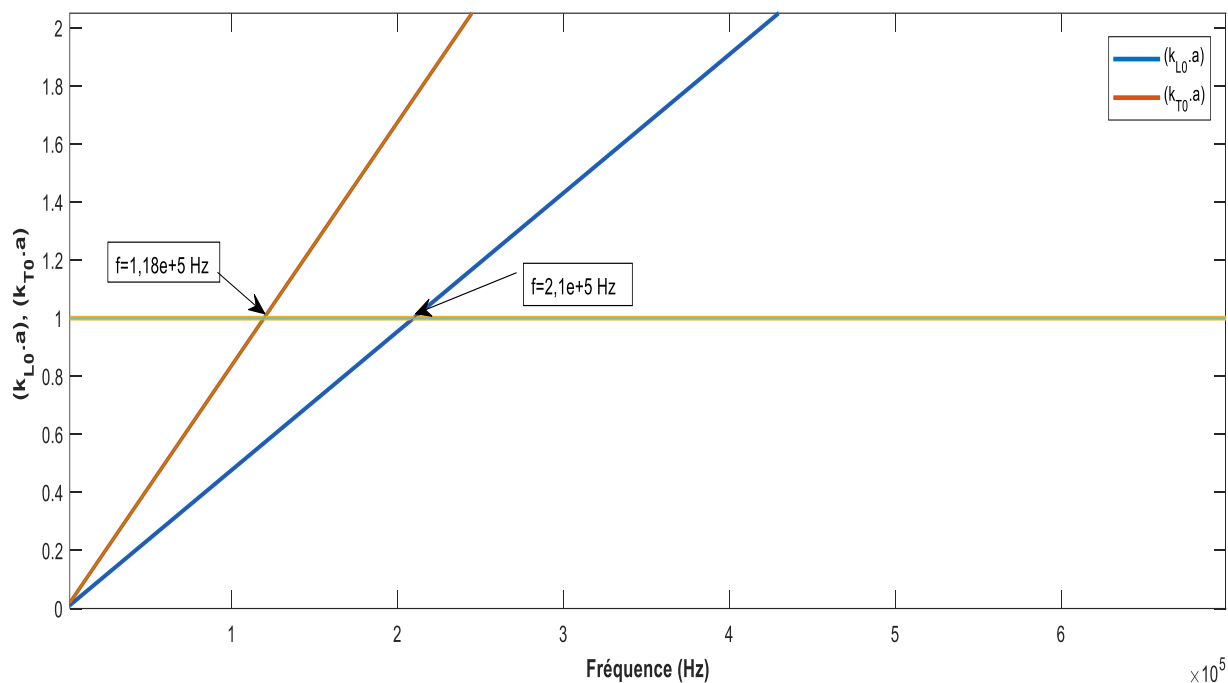


Fig.3.12. Evolution du facteur $k.a$ en fonction de la fréquence pour les ondes longitudinale et transversale ($a=3$ mm).

La combinaison des deux vitesses précédentes longitudinale et transversale par la relation de Viktorov (2.2), nous permet de tracer la variation de la vitesse de Rayleigh selon les deux modèles précédents WT et ISA.

La figure 3.13 représente la variation de la vitesse de phase de Rayleigh pour le mortier et les diffuseurs en gravier de mêmes caractéristiques et dans les mêmes conditions ($d=3$ mm, $\tau=1\%$). La vitesse de Rayleigh est autour de 2075 m/s. Nous pouvons faire les mêmes constatations à savoir que les deux modèles présentent un léger écart uniquement dans la gamme des basses fréquences. L'explication est la même que celle donnée pour les ondes de volume longitudinale et transversale, donc nous pouvons déduire que la rétrodiffusion prise en compte par le modèle de WT n'a un effet que dans la gamme de très faible fréquence pour cette taille de diffuseur ($k.a \ll 1$).

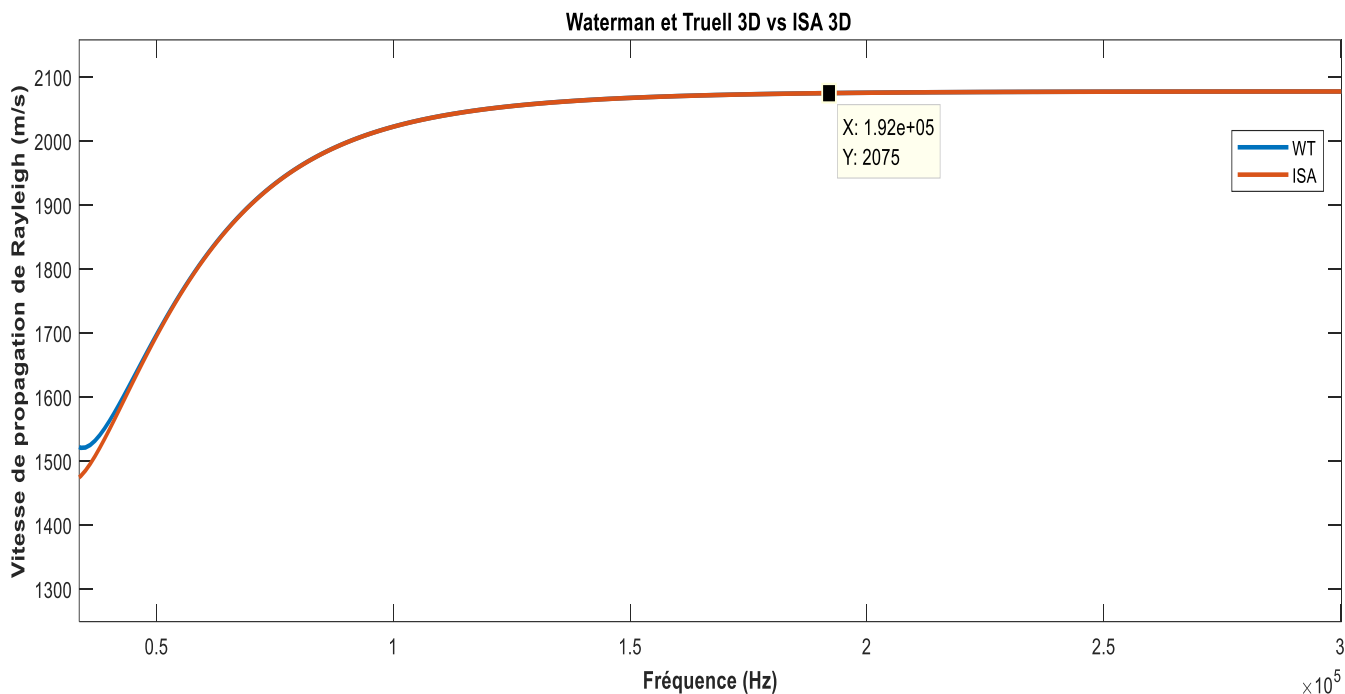


Fig.3.13. Evolution de la vitesse de l'onde de Rayleigh en fonction de la fréquence selon les modèles de WT et ISA.

Notons que, dans cette simulation, nous avons toujours respecté la condition de validité du modèle WT, à savoir $\frac{n\sigma_d}{k_0} \ll 1$ (Fig. 3.14) et que le modèle ISA est valable pour les faibles concentrations de diffuseurs ($< 10\%$).

La figure 3.14 représente la variation du critère de validité du modèle de Waterman-Truell en fonction de la fréquence.

Nous observons que dans les conditions de l'étude choisie, pour la dimension des diffuseurs et leur concentration, la condition de validité du modèle de WT est valable particulièrement dans la gamme des hautes fréquences, c-à-d. à partir de $f = 200$ kHz.

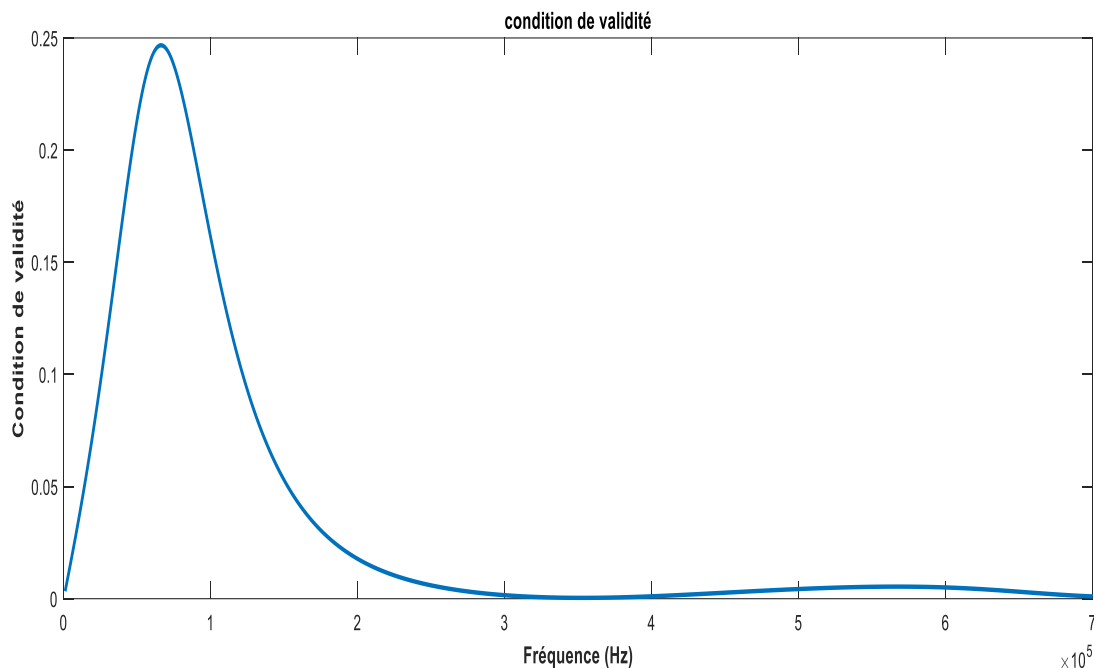


Fig.3.14. Evolution de la condition de validité du modèle WT en fonction de la fréquence.

3.4.1 Effet de la concentration volumique des diffuseurs sur la propagation des ondes de Rayleigh dans le béton

La figure 3.15 représente la variation de la vitesse de Rayleigh en fonction de la fréquence, selon le modèle WT, dans du béton constitué de mortier avec des inclusions de gravier de dimension $d = 3\text{mm}$, pour trois fractions volumiques $\tau = 1\%$, 3% et 5% .

Nous observons que la vitesse de l'onde de Rayleigh augmente en fonction de la fréquence pour les trois concentrations et devient constante autour de 2081 m/s à partir de la fréquence $f = 100\text{ kHz}$ qui correspond à la gamme des hautes fréquences. L'effet de la fraction volumique est remarquable dans la gamme des basses fréquences. Dans cette gamme de fréquences, lorsque la concentration volumique des diffuseurs augmente la vitesse de l'onde de Rayleigh diminue.

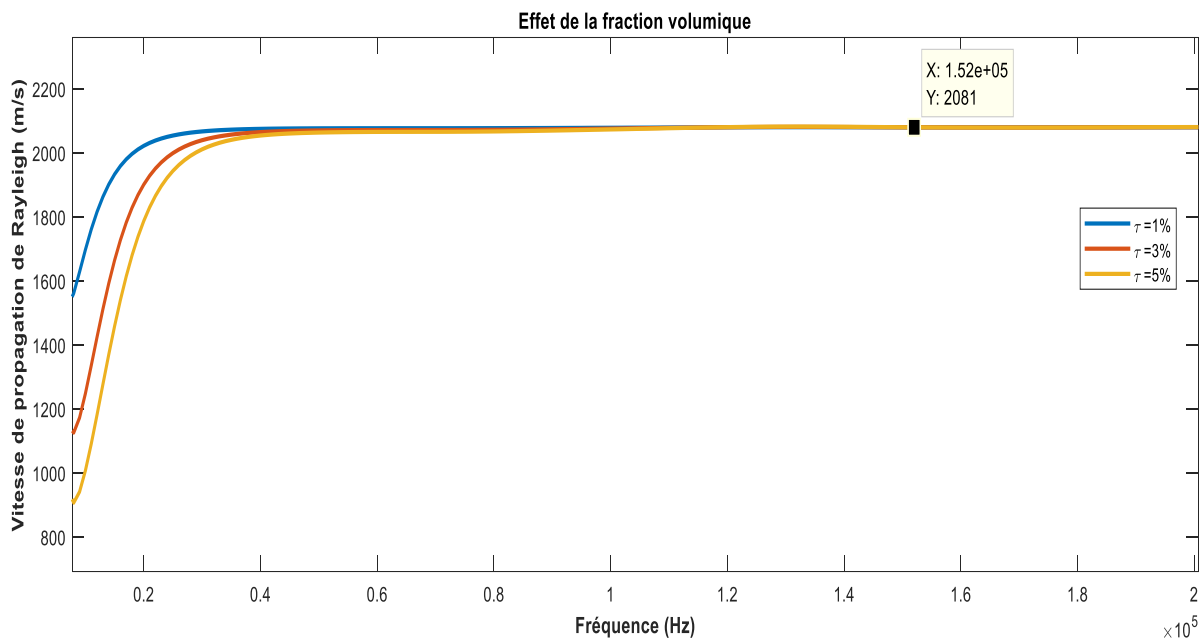


Fig.3.15. Evolution de la vitesse de Rayleigh en fonction de la fréquence dans le modèle de WT pour différentes fraction volumique $\tau = 1\%$, 3% et 5% .

La figure 3.16 représente la variation du critère de validité du modèle de Waterman-Truell en fonction de la fréquence pour les trois fractions volumiques précédentes.

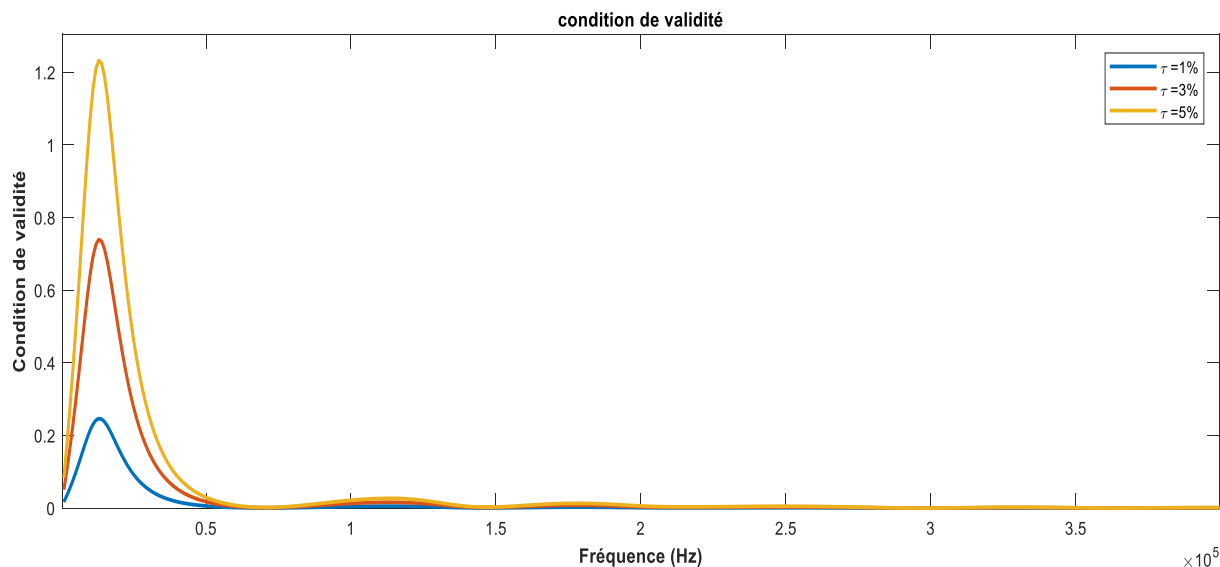


Fig.3.16. Evolution de la condition de validité du modèle WT en fonction de la fréquence pour différentes fraction volumique $\tau = 1\%$, 3% et 5% .

Nous constatons que le pic correspondant à la condition pour les fractions volumiques 5% et 3% sont importants dans la gamme des basses fréquences. L'amplitude du pic devient faible devant 1 pour la concentration 1%. On peut dire que ces deux concentrations précédentes ne permettent pas de vérifier la validité de la condition dans cette gamme de fréquence. Par contre, nous observons que cette condition est vérifiée pour les trois concentrations dans la gamme des hautes fréquences. En conclusion, le modèle de Waterman-Truell est d'autant plus valable qu'il est appliqué dans la gamme des hautes fréquences et pour des faibles concentrations des inclusions (milieu dilué).

Pour la détermination de la masse volumique du milieu effectif ρ_{eff} , nous avons :

$$\rho_{eff} = \rho_1 \tau + \rho_0 (1 - \tau)$$

ρ_0 représente la masse volumique de la matrice « mortier ».

ρ_1 représente la masse volumique des diffuseurs « gravier ».

Pour une fraction volumique $\tau = 1\%$, nous obtenons la masse volumique effective $\rho_{eff} = 2056 \text{ kg/m}^3$.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé l'étude de la propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu homogène isotrope élastique et viscoélastique. Nous avons déterminé ses propriétés telles que la vitesse de propagation de groupe et le coefficient d'atténuation à partir des ondes ultrasonores de volume longitudinales et transversales avec la simulation des déplacements longitudinal et transversal des ondes de Rayleigh pour différents cas de distance de propagation et de profondeur de pénétration. Pour la propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu hétérogène, nous avons étudié les propriétés du milieu effectif et les différents modèles d'homogénéisation avec une application du deux modèles d'homogénéisation Waterman-Truell et le modèle ISA dans la propagation des ondes de Rayleigh dans une matrice élastique avec des obstacles sphériques, identiques et élastiques. Cette forme géométrique est relativement éloignée des granulats réels. Cependant, cette modélisation, appuyée par la simulation numérique, nous a permis de prédire les propriétés effectives du milieu hétérogène. La simulation numérique nous a permis également d'apprécier la différence des deux modèles selon la gamme de fréquence et sa limite de validité.

Chapitre 4 :

**Etude expérimentale de la
propagation des ondes de
Rayleigh dans le béton**

Introduction

Ce chapitre présente l'étude expérimentale de la propagation des ondes ultrasonores de Rayleigh sur des éprouvettes de béton de différents rapports eau-ciment E/C au cours de l'âge de maturation. Nous allons présenter les échantillons élaborés et le protocole expérimental de caractérisation de ces échantillons par l'évaluation non destructive avec les ondes ultrasonores de surface, dans la gamme des hautes fréquences, qui permettent de caractériser le béton d'enrobage. L'évaluation non destructive nous permet de déterminer les paramètres acoustiques tels que la vitesse de propagation de groupe et le coefficient d'atténuation. L'essai destructif nous permet de déterminer les propriétés mécaniques par la mesure de la résistance à la compression. Enfin, nous cherchons une corrélation entre les deux méthodes destructive et non destructive.

4.1 Elaboration des échantillons en béton

Notre étude est faite sur douze éprouvettes parallélépipédiques en béton à différents âges de maturation, de dimensions (10cm × 10 cm × 40cm), de même composition mais avec trois différents rapports eau/ciment. Trois éprouvettes sont destinées à l'étude ultrasonore et neuf autres pour le contrôle destructif. Les rapports eau/ ciment (E/C) étudiés sont 0,4 ; 0,55 et 0,7.

Les éprouvettes ont été réalisées avec des matériaux locaux selon la méthode de Dreux- Gorisse [Dre1998], [Tey2022]. La figure 4.1 représente la courbe granulométrique des granulats.

A partir de la courbe granulométrique ci-dessous, nous avons pu déterminer les quantités massiques des granulats dans la gâchée dans 1m³ de volume. Pour 1m³ de mélange de béton, nous avons utilisé les quantités de sable de carrière, de gravier d'origine granitique et de ciment Portland (CEMI 42,5) indiquées dans le tableau 4.1. Dans cette composition, la quantité d'eau dépend du rapport E/C visé.

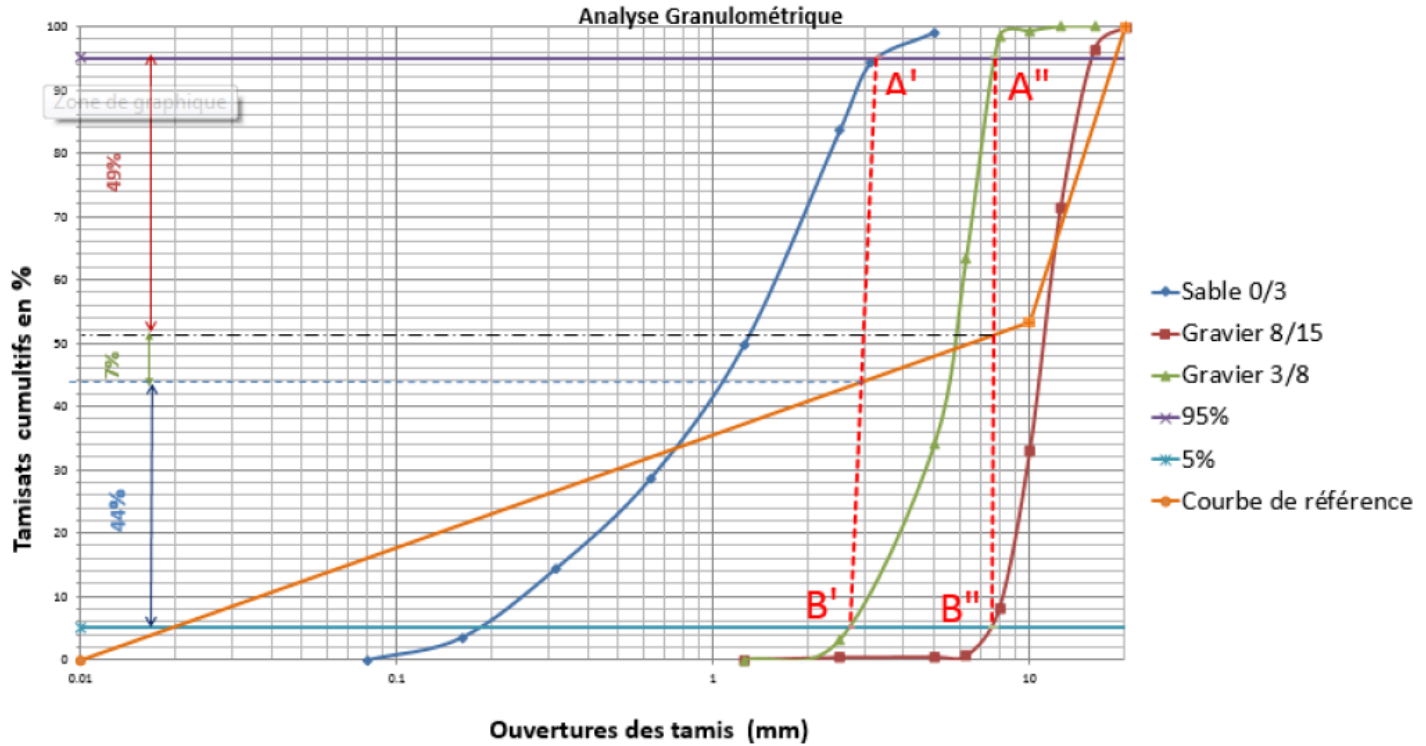


Fig.4.1. Courbe granulométrique des granulats dans le béton élaboré avec la méthode de Dreux-Gorisse.

La méthode d'élaboration des éprouvettes est détaillée dans l'annexe B.

Sable (0/3) (kg)	Gravier (3/8) (kg)	Gravier (8/15) (kg)	Ciment(kg)
809	131	918	390

Tab.4.1. Constituants des échantillons.

4.2 Dispositif expérimental

Pour caractériser les éprouvettes de béton, les ondes de Rayleigh sont générées et les signaux sont visualisés avec le dispositif de la figure 4.2. Une paire de transducteurs ultrasonores d'onde de compression, plans, rectangulaires (Olympus Panametrics-NDT-V413) de fréquence nominale, $f=500$ kHz, montés sur des sabots à angle variables en téflon [Aiss2022], est utilisée. Les ondes de compression sont générées dans le sabot avec un générateur d'impulsion de grande amplitude et de courte durée (Olympus, 5072PR). Les ondes de Rayleigh qui se propagent à la surface du matériau sont reçues par un montage (sabot / transducteur) identique à celui utilisé en émission.

La mesure est donc effectuée en mode transmission. Un oscilloscope numérique permet de numériser et de visualiser les signaux (GW INSTEK, GDS-1102). Les signaux acquis sont alors transférés à l'ordinateur pour un traitement ultérieur.

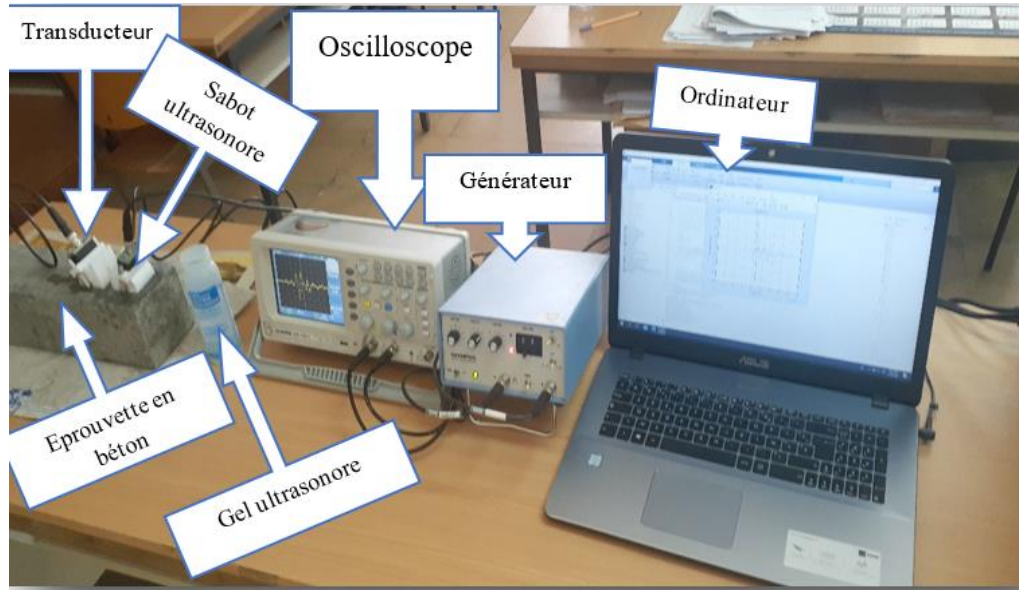


Fig.4.2. Photographie du dispositif expérimental.

Pour la génération des ondes à la surface des éprouvettes du béton, on ajuste l'angle d'inclinaison de l'émetteur et du récepteur de façon à vérifier la condition de Snell- Descartes. L'émetteur est maintenu fixe et le récepteur est déplacé en ligne droite suivant la longueur de l'éprouvette à des distances séparant les sabots qui varient de 20 mm à 200 mm par pas de 2 cm. Chaque mesure est répétée 5 fois, ce qui permet d'obtenir une valeur moyenne et un écart-type des valeurs obtenues qui sont dues à la répétabilité, à partir des quelles une incertitude élargie avec un niveau de confiance de 95 % peut être estimée. Les signaux sont échantillonnés à 4000 points et moyennés sur 256 acquisitions afin de réduire le niveau du bruit (Fig.4.3).

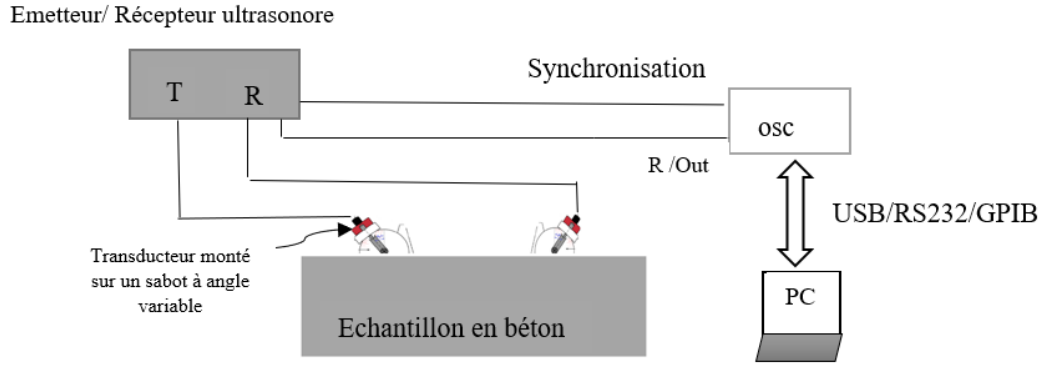


Fig.4.3. Schéma synoptique représentant le principe de la chaîne de mesure ultrasonore par ondes de Rayleigh.

4.3 Principe de mesure

Les signaux obtenus sont traités sous le logiciel MATLAB, par une méthode différentielle qui permet de déterminer la vitesse de phase et le coefficient d'atténuation en appliquant une méthode de spectroscopie large bande [Pet 2003].

Si l'on suppose qu'une onde ultrasonore plane se propage le long d'une distance parcourue x , la pression acoustique s'écrit comme :

$$p(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(x, f) e^{-\alpha(f)x} e^{2\pi f \left(t - \frac{x}{c_\varphi(f)} \right)} df; \quad (4.1)$$

ou $\alpha(f)$ est le coefficient d'atténuation de l'onde, $c_\varphi(f)$ sa vitesse de phase, $P(x, f)$ la transformée de Fourier de la pression acoustique $p(x, t)$, et f la fréquence.

Si on prend le signal acoustique à deux positions différentes de la distance parcourue par l'onde, x_1 et x_2 , la vitesse de phase et le coefficient d'atténuation peuvent être calculés comme suit :

$$c_\varphi(f) = \frac{2\pi f(x_2 - x_1)}{\Delta\varphi} \quad (4.2)$$

$$\alpha(f) = \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \left(\frac{P(x_1, f)}{P(x_2, f)} \right) \quad (4.3)$$

où $\Delta\varphi = \arg\left(\frac{P(x_1, f)}{P(x_2, f)}\right)$ est la différence de la phase absolue en (rad).

Le deuxième écho est translaté de Δt soit :

$$q(x_2, t) = p(x_2, t + \Delta t) \quad (4.4)$$

et $Q(x_2, f)$ sa transformée de Fourier, donc :

$$Q(x_2, f) = P(x_2, f)e^{2i\pi f\Delta t} \quad (4.5)$$

En remplaçant l'équation (4.5) dans l'équation (4.2), la vitesse de phase aura de la forme suivante :

$$c_\varphi(f) = \frac{2\pi f \Delta x}{\Delta\varphi - 2\pi f \Delta t} \quad (4.6)$$

La vitesse de propagation ultrasonore de groupe est obtenue en mode transmission par la relation :

$$C_0 = \frac{x_2 - x_1}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t}; \quad (4.7)$$

où Δt est la variation des temps de vol correspondant au parcours des deux distances x_1 et x_2 .

Pour différentes distances de propagation à la surface des éprouvettes du béton, et si x est la distance séparant les deux sabots, et la vitesse de propagation ultrasonore est donnée par la pente de la droite $x = f(\Delta t)$.

Le coefficient d'atténuation moyen est déterminé de la décroissance d'amplitude maximale du signal temporel avec la distance de propagation. Dans le domaine fréquentiel et d'après l'équation (4.2), et si $A(f, x)$ est l'amplitude de la transformée de Fourier du signal temporel à une fréquence donnée, le coefficient d'atténuation devient :

$$\alpha(f) = \frac{20}{x_x - x_0} \text{Ln} \left[\frac{A_0(f)}{A_x(f)} \right] \text{ (en Nep/m)} \quad (4.8)$$

ou bien

$$\alpha(f) = \frac{20}{x_x - x_0} \log_{10} \left[\frac{A_0(f)}{A_x(f)} \right] \text{ (en dB/m)} \quad (4.9)$$

où $A_0(f)$ est l'amplitude du signal initial à la distance x_0 et $A_x(f)$ son amplitude à la distance x_x .

Le coefficient d'atténuation moyen est donné par la pente de la droite $20 \cdot \log_{10} \left(\frac{A_0}{A_x} \right) = f(\Delta x)$ en (dB/m).

4.4 Caractérisation du matériau constituant le sabot

Avant de caractériser les éprouvettes en béton, une autre étude de caractérisation avec les ondes de compression est faite (Fig.4.4) sur deux échantillons en téflon de forme disque carrée d'épaisseurs ($e_1 = 16.29$ mm et $e_2 = 10.51$ mm). Ces épaisseurs sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse de résolution 0,01 mm. Ceci permet de déterminer les propriétés ultrasonores telles que la vitesse de propagation longitudinale et le coefficient d'atténuation de ce matériau qui est utilisé dans la fabrication de nos sabots ultrasonores.

Les ondes de compression sont générées par l'intermédiaire d'un transducteur à onde longitudinale, circulaire (Olympus Panametrics-NDT-V301) de fréquence nominale $f = 500$ kHz en mode écho.

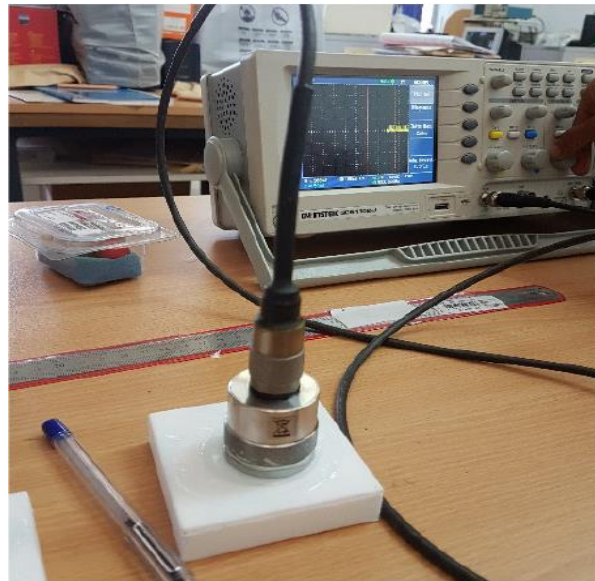


Fig.4.4. Photographie du dispositif expérimental de caractérisation du téflon.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 4.2 :

Echantillon	Epaisseur (mm)	Coefficient d'atténuation (dB/m)	Vitesse de groupe (m/s)
1	$16,29 \pm 0,05$	326	1264 ± 27
2	$10,51 \pm 0,05$		

Tab.4.2. Coefficient d'atténuation et la vitesse de groupe des ultrasons dans le téflon.

Nous remarquons que l'atténuation de ces échantillons est très importante et que la vitesse de propagation de groupe estimée est proche à celle citée dans la littérature [Piw2004].

4.5 Résultats et discussion

La figure 4.5 représente les signaux temporels reçus de l'onde de Rayleigh pour deux positions successives entre l'émetteur et le récepteur a) $d = 40$ mm et b) $d = 60$ mm.

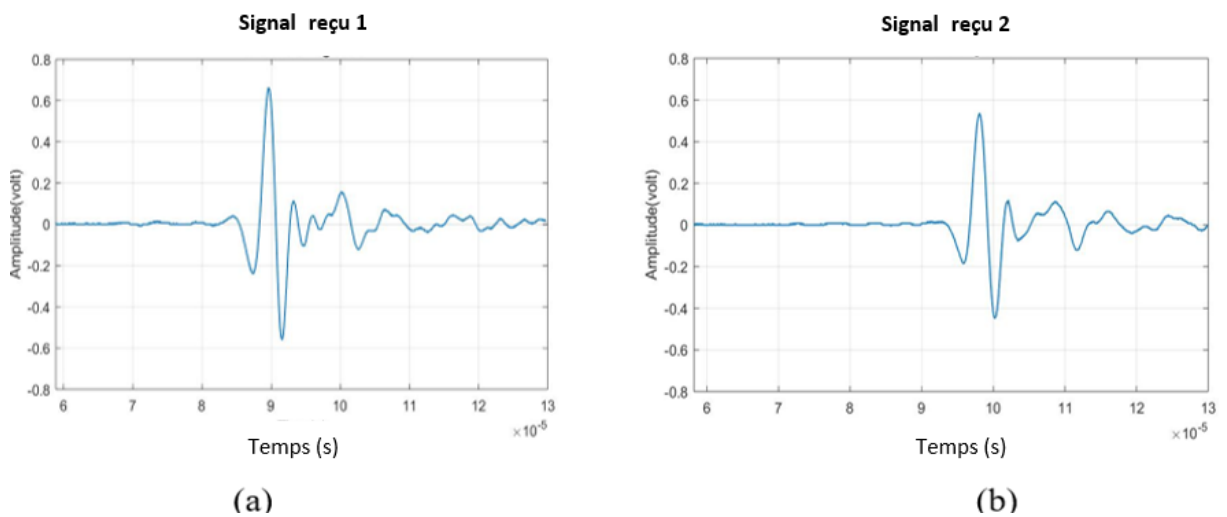


Fig.4.5. Signaux temporels reçus de l'onde de Rayleigh pour deux positions successives entre l'émetteur et le récepteur a) $d = 40$ mm et b) $d = 60$ mm pour $E/C=0,55$ et $f=500$ kHz au 7^{ème} jour de maturation.

Nous observons que l'amplitude du signal temporel diminue lorsqu'on passe d'une position à l'autre. Il en est de même pour les deux spectres d'amplitude des signaux reçus (Fig.4.6). On remarque sur les spectres d'amplitude un shift de la fréquence de résonance vers les basses fréquences. Le phénomène d'atténuation joue le rôle d'un filtre basse pass.

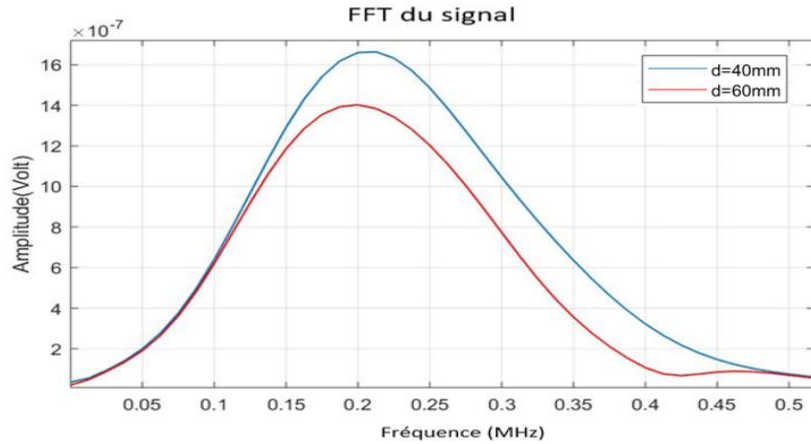


Fig.4.6. Spectres des signaux a) et b) de la figure 4.5 (bleu et rouge, respectivement).

La figure 4.7 représente le coefficient d'atténuation d'une éprouvette de béton de rapport $E/C=0,55$ au 7^{ème} jour de maturation.

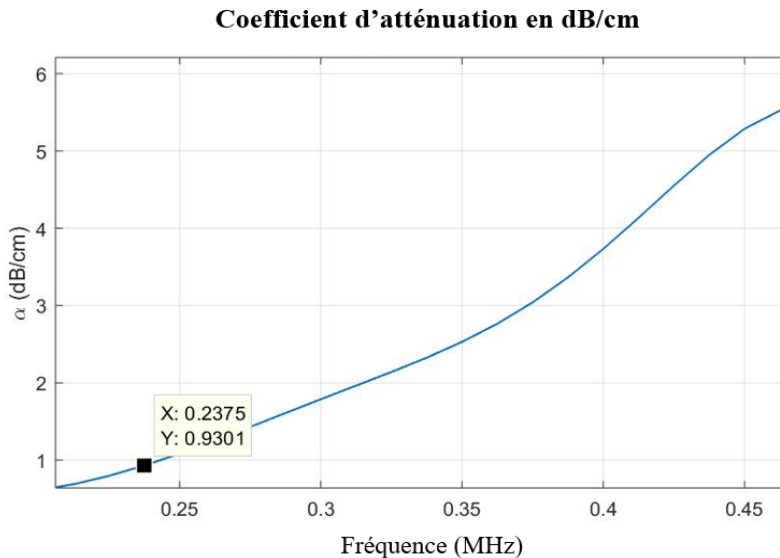


Fig.4.7. Courbe représentant l'évolution de coefficient d'atténuation en fonction de la fréquence pour le rapport $E/C=0,55$ au 7^{ème} jour de maturation.

De plus, on remarque que le coefficient d'atténuation augmente en fonction de la fréquence. Cette augmentation est quasi-linéaire entre 0 et 375 kHz. A la fréquence correspondant au maximum d'amplitude, soit $f=237$ kHz, ce coefficient est égal à 93 dB/m.

La figure 4.8 représente la variation, en échelle logarithmique, du rapport de l'amplitude du signal temporel en fonction de la distance de propagation pour le rapport $E/C=0,55$.

La régression linéaire fournit la meilleure adéquation aux données expérimentales. En effet, elle corrige les fluctuations de l'erreur expérimentale.

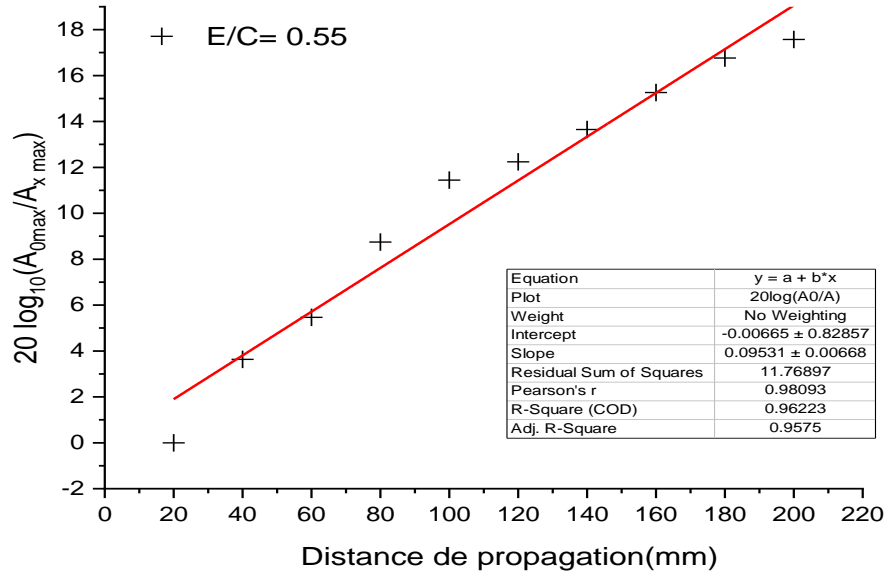


Fig.4.8. Courbe représentant la variation du rapport de l'amplitude du signal temporel en fonction de la distance de propagation pour le rapport $E/C=0,55$.

4.5.1 Effet du rapport Eau-Ciment E/C

4.5.1.a Paramètres acoustiques

La figure 4.9 représente la variation de temps de vol TOF moyen pour les trois rapports E/C en fonction de la distance de propagation de l'onde de Rayleigh au 7^{ème} jour de maturation.

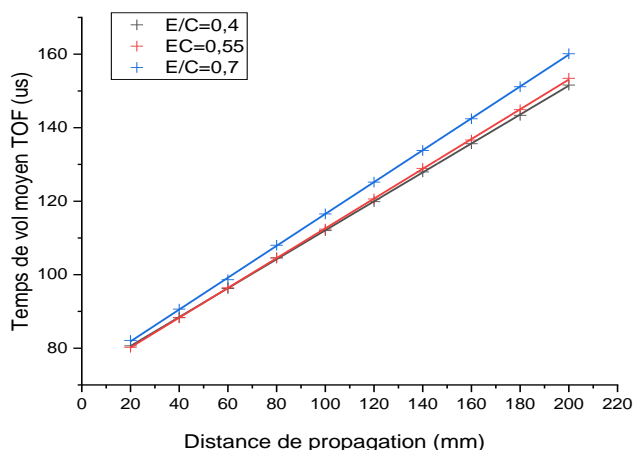


Fig.4.9. Courbes représentant la variation du temps de vol moyen en fonction de la distance de propagation pour les trois rapports E/C au 7^{ème} jour de maturation.

Le coefficient d'atténuation pour les deux autres échantillons avec différent rapport E/C est déterminé de la même manière décrite ci-dessus. Les résultats de la vitesse de propagation de groupe et le coefficient d'atténuation pour les trois rapports E/C sont donnés dans le tableau 4.3.

Remarquons que lorsque le rapport eau/ciment augmente, la vitesse de propagation des ultrasons diminue. Cette diminution est due à l'augmentation de la porosité du béton [Laf2006, Rid2021], qui est due à la plus grande quantité d'eau dans le composite.

Rapport Eau/ciment (E/C)	0,4	0,55	0,7
Vitesse de groupe (m/s)	2541±14	2469±14	2306±16
Coefficient d'atténuation (dB/m)	99 (à $f=0,225\text{MHz}$)	93 (à $f=0,238\text{MHz}$)	84 (à $f=0,213\text{MHz}$)
Coefficient d'atténuation moyen (dB/m)	114	95	112

Tab.4.3. Paramètres de l'onde de Rayleigh ultrasonore se propageant dans les éprouvettes de béton pour les trois rapports E/C au 7^{ème} jour de maturation.

On peut noter que la fréquence à laquelle se situe le maximum de l'amplitude du spectre n'est pas la même pour les trois rapports E/C. Il y a une fluctuation de l'amplitude du spectre entre les trois rapports. De plus, il y a une fluctuation dans la variation du coefficient d'atténuation moyen pour les trois rapports E/C. On peut donc dire que ce coefficient, contrairement à la vitesse de propagation, n'est pas très fiable pour distinguer les compositions des échantillons.

4.5.1.b Résistance à la compression

Pour confirmer la tendance des résultats trouvés pour la variation de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores pour les trois rapports étudiés, nous mesurons la résistance à la compression pour les trois rapports obtenus au 7^{ème} jour de la maturation des éprouvettes de béton. Pour cela, une machine d'essai de compression (Controls, Pilot Pro) est utilisée (Fig.4.10). L'essai d'écrasement est effectué sur trois échantillons cubiques de dimensions (10 cm x 10 cm x 10 cm) pour chaque rapport E/C et provenant de la même éprouvette. La résistance à la compression est donnée par la formule $R = \frac{N_{max}}{A}$, où R est donné en MPa, la charge maximale, N_{max} , en Newton (N) et A la surface de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée en m². Il convient de noter que pour cet essai, les mesures effectuées sur les trois échantillons cubiques fournissent une valeur moyenne de la résistance à la compression et un écart type dû à la répétabilité, à partir desquels une incertitude élargie avec un niveau de confiance de 95 % peut être estimée.



Fig.4.10. Machine de presse pour l'essai de compression.

Le tableau 4.4 représente la résistance à la compression pour les trois rapports obtenus au 7^{ème} jour de maturation pour les trois éprouvettes de béton.

Tab.4.4. Variation de la résistance à la compression pour les trois rapport E/C au 7^{ème} jour de maturation.

Rapport eau/ciment (E/C)	0,4	0,55	0,7
Résistance à la compression (MPa)	39,9 ± 4,5	32,2±4,5	20,2±4,5

Nous observons une variation significative de la résistance à la compression entre les trois rapports. Cette résistance diminue avec l'augmentation du rapport eau-ciment E/C. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation de la porosité [Laf2006], qui est due à l'augmentation de la quantité d'eau dans le matériau élaboré. Ce résultat est cohérent avec celui trouvé par l'étude ultrasonique.

4.5.1.c Corrélation entre les mesures ultrasonores et les mesures mécaniques

La figure 4.11 représente la corrélation entre la vitesse de propagation de groupe des ondes de Rayleigh et la résistance à la compression pour les trois rapport eau- ciment étudiés au 7^{ème} jour de maturation.

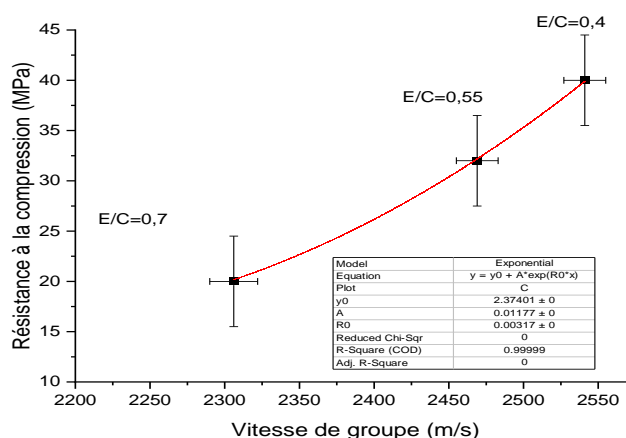


Fig.4.11. Courbe représentant la corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse de groupe des ondes de Rayleigh pour les trois rapports 0,4, 0,55 et 0,7 au 7^{ème} jour de maturation.

On constate que cette courbe est régie par la formule d'ajustement indiquée. Cette formule décrit avec une grande précision ($r^2 \approx 1$), dans l'intervalle considéré, la dépendance entre les deux paramètres pour les trois rapports. Cette courbe de corrélation suggère que la résistance de l'échantillon peut être déduite de la mesure de la vitesse de propagation des ultrasons dans le matériau.

4.6 Effet de l'âge de maturation

Dans cette section, nous étudions la propagation des ondes ultrasonores de surface dans les échantillons précédents du 3^{ème} au 28^{ème} jour de maturation.

4.6.1 Mesure de la vitesse de groupe

La figure 4.12 représente la variation de la vitesse de groupe des ondes de Rayleigh pour les trois rapports eau-ciment 0,4, 0,55 et 0,7 en fonction de l'âge de maturation (du 3^{ème} jusqu'au 28^{ème} jour).

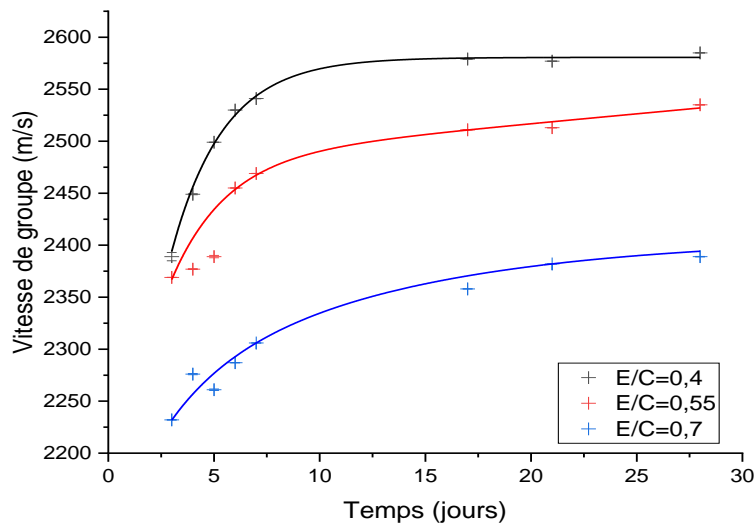


Fig.4.12. Courbes représentant l'évolution de la vitesse de groupe des ondes ultrasonores dans les éprouvettes de béton en fonction de l'âge de maturation pour les trois rapports eau-ciment pour $f = 500$ kHz.

Cette vitesse augmente du 3^{ème} au 28^{ème} jour pour tous les rapports eau-ciment. Cette augmentation s'explique par différents phénomènes physico-chimiques complexes qui se produisent dans le matériau. Parmi ces phénomènes, on peut citer la réaction d'hydratation entre l'eau et les différents composants du béton. Les composants tels que le silicate de calcium hydraté, la portlandite, les aluminates hydratés et le monosulfoaluminate sont responsables de la réduction de la porosité du matériau et donc de l'augmentation de sa compacité en fonction du temps pendant la cinétique de la réaction d'hydratation [Loch1976]. Ces derniers phénomènes conduisent à une augmentation de la vitesse de propagation des ultrasons.

Par ailleurs, il convient de noter que lorsque le rapport eau/ciment augmente, la vitesse de propagation des ultrasons diminue. Cette diminution est due à l'augmentation de la porosité du béton [Rid2021].

La régression des données expérimentales montre que l'évolution de la vitesse des ondes ultrasonores de surface dans les échantillons de béton en fonction de l'âge de maturation suit, pour les trois rapports E/C, une loi exponentielle de type :

$$V = V_0 + A_1 (1 - e^{-t/\tau_1}) + A_2 (1 - e^{-t/\tau_2}) \quad (4.10)$$

Les constantes d'ajustement pour les trois rapports sont indiquées dans le tableau 4.5. Le coefficient de détermination, ($r^2 \approx 1$), indique un bon accord entre les données expérimentales et la loi d'ajustement. Les différentes constantes d'ajustement sont donc influencées par la composition de chaque échantillon.

Tab.4.5. Constantes d'ajustement de la loi donnant la vitesse de propagation en fonction de l'âge de maturation pour les trois rapports E/C (Fig.4.12).

E/C \ Constantes de fit	0,4	0,55	0,7
V_0 [m/s]	1953	2102	2101
A_1 [m/s]	990	377	134
A_2 [m/s]	-	-	173
τ_1 [jour]	2,47	-	2.71
τ_2 [jour]	2,47	2,12	11,05
r^2	0,9911	0,9892	0,9968

4.6.2 Calcul du coefficient d'atténuation

La figure 4.13 représente la variation des valeurs du coefficient d'atténuation des échantillons de béton étudiés en fonction de l'âge de maturation pour chaque rapports 0,4, 0,55 et 0,7.

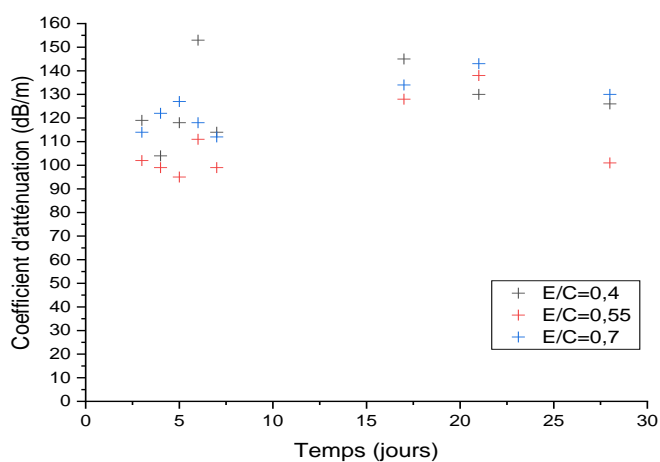


Fig.4.13. Représentation du coefficient d'atténuation des ondes de surface ultrasonores dans les éprouvettes de béton en fonction de l'âge de maturation pour les trois rapports eau-ciment.

On peut remarquer qu'il y a des fluctuations dans les valeurs du coefficient d'atténuation des ondes de Rayleigh au cours de l'âge de maturation pour les trois échantillons. Toutefois, les valeurs du coefficient d'atténuation restent faibles par rapport à celles des ondes ultrasonores longitudinales [Sli2021]. Ceci peut être justifié en tenant compte de la propriété bien connue des ondes de Rayleigh, qui se propagent à proximité de la surface du matériau.

En général, les essais ultrasonores sur le béton sont effectués à l'aide d'ondes de volume à basse fréquence (environ 54 kHz). Cela permet d'éviter les effets d'atténuation qui sont plus importants à des fréquences plus élevées. Les études ultrasoniques du béton à ces fréquences élevées sont plutôt rares. Dans la gamme de fréquences utilisée, la profondeur de pénétration de ces ondes est égale à $\lambda_R \approx 4,5$ mm à partir de la surface du matériau. En outre, il est également connu que l'amplitude des ondes de Rayleigh diminue proportionnellement à la racine carrée de la distance de propagation, tandis que celle des ondes longitudinales diminue proportionnellement à cette distance [Bir1995]. Par conséquent, il n'y a pas de dissipation significative de l'énergie de ces ondes par rapport aux ondes longitudinales [Sli2021]. En outre, la mesure de ce coefficient dépend fortement de la manipulation du transducteur par l'opérateur. Dans ces conditions, ce coefficient ne peut pas être utilisé pour caractériser les compositions de béton.

Il convient de noter que le travail dans cette gamme de fréquences présente l'avantage d'utiliser des transducteurs et des sabots de petite taille par rapport à ceux qui seraient utilisés à basse fréquence. Cette situation est tout à fait appropriée non seulement en laboratoire mais aussi sur un chantier de construction.

En ce qui concerne les paramètres d'interférence causés par les caractéristiques des transducteurs appliqués, on peut affirmer que la diffraction du faisceau acoustique, et donc l'atténuation due à ce phénomène, sont moins importantes à des fréquences plus élevées.

4.6.3 Mesure de la résistance à la compression

La figure 4.14 montre l'évolution de la résistance à la compression des éprouvettes de béton pour les trois rapports précédents aux 3^{ème}, 7^{ème} et 28^{ème} jours de maturation.

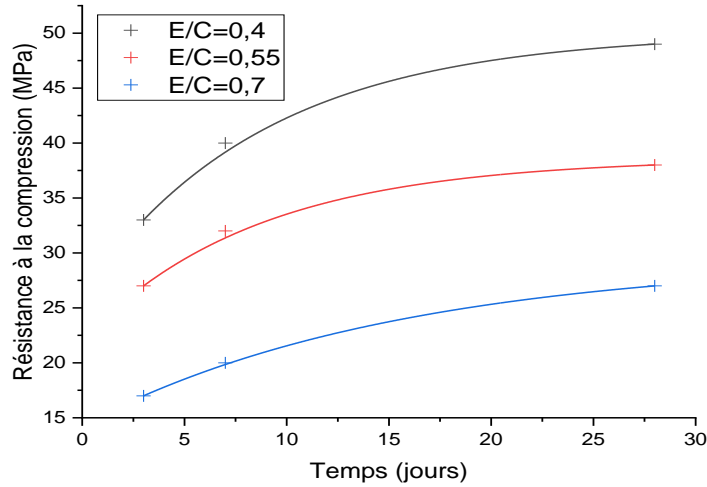


Fig.4.14. Evolution de la résistance à la compression des échantillons de béton pour les trois rapports eau-ciment aux 3^{ème}, 7^{ème} et 28^{ème} jours de maturation.

La résistance à la compression augmente avec l'âge de maturation du béton. Ceci est dû à une augmentation de la compacité et donc de la rigidité du matériau. La courbe d'évolution peut être décrite par la même équation que celle utilisée pour la vitesse de groupe.

On peut également noter que lorsque le rapport eau/ciment augmente, la résistance à la compression diminue. Cette diminution peut être expliquée par une augmentation de la porosité du matériau qui est due à une augmentation de la quantité d'eau dans le matériau [Laf2006].

L'évolution de la résistance à la compression au cours de l'âge de maturation, pour les trois rapports E/C, suit l'équation (4.11). Elle peut être écrite comme suit :

$$R = R_0 + A_1 (1 - e^{-t/\tau_1}) + A_2 (1 - e^{-t/\tau_2}) \quad (4.11)$$

Cette équation est similaire à celle trouvée pour l'évolution de la vitesse de propagation du groupe. Dans ce cas, les constantes dépendent également du rapport E/C. Le tableau 4.6 présente les constantes d'ajustement pour les trois rapports E/C.

Tab.4.6. Constantes d'ajustement de la loi donnant la variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge de maturation pour les trois rapports E/C (Fig.4.14).

E/C Constants de fit	0,4	0,55	0,7
R_0 [MPa]	26,16	22,07	14,32
A_1 [MPa]	11,93	8,27	7,57
A_2 [MPa]	11,93	8,27	7,57
τ_1 [jour]	8,88	8,47	15,41
τ_2 [jour]	8,88	8,47	15,41
r^2	0,9947	0,9934	0,9996

L'ajustement choisi montre une forte concordance avec les données expérimentales, comme l'indique le coefficient de détermination ($r^2 \approx 1$).

4.6.3 Corrélation entre les paramètres acoustiques et mécaniques

A partir de l'étude de l'évolution du paramètre acoustique qu'est la vitesse de groupe (Fig.4.12) et du paramètre mécanique qu'est la résistance à la compression (Fig.4.14), une courbe de corrélation entre ces deux paramètres pour les trois rapports E/C précédents au cours de l'âge de maturation a été établie. Cette courbe est illustrée à la figure 4.15.

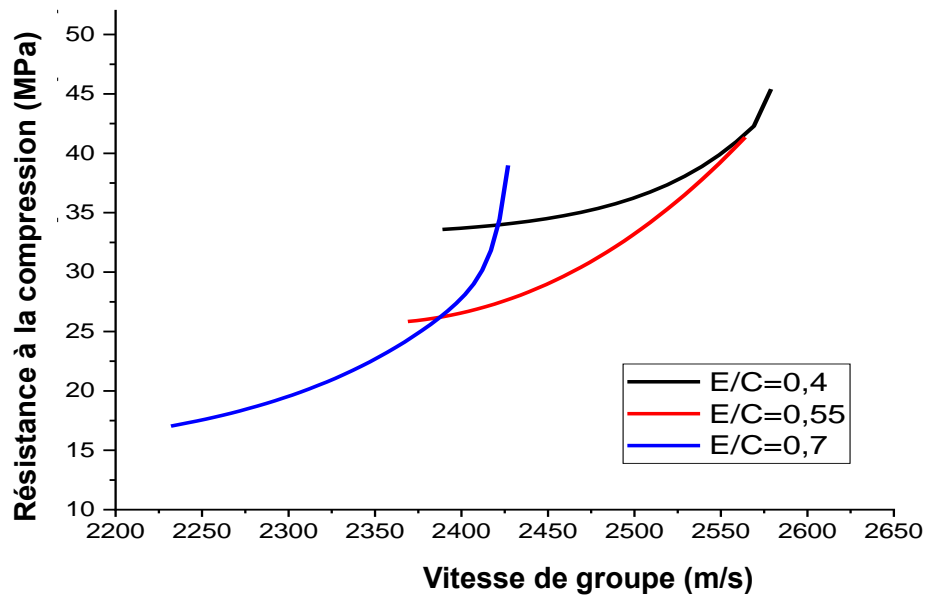
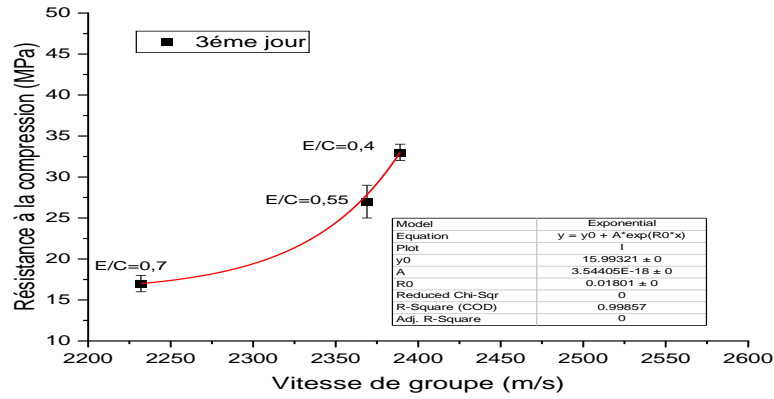


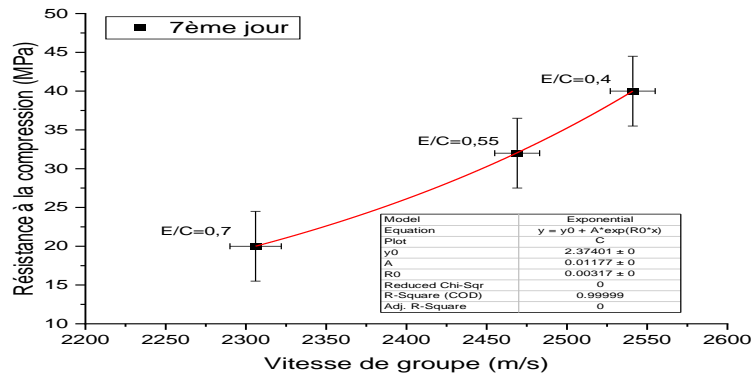
Fig.4.15. Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse de groupe des échantillons de béton durant la maturation pour les trois rapports E/C. (a) E/C=0,4, (b) E/C=0,55, (c) E/C=0,7.

D'après les courbes des figures 4.12 et 4.14, on peut remarquer que la vitesse de groupe de propagation pour les trois échantillons et la résistance à la compression correspondante ont la même forme. La figure 4.15 montre que lorsque la vitesse de groupe augmente, la résistance à la compression augmente et vice-versa. Plus le rapport E/C est élevé, plus ces deux paramètres sont faibles. Ainsi, d'après ces courbes, la résistance à la compression de l'éprouvette de béton peut être déduite de la valeur de la vitesse de groupe ultrasonore dans celle-ci, à condition que le rapport eau/ciment soit connu *a priori*. Si ce rapport n'est pas connu, une courbe de corrélation entre la vitesse de groupe et la résistance à la compression peut être établie pour un même jour de maturation comme le montre la figure 4.16 pour les 3^{ème}, 7^{ème} et 28^{ème} jour de maturation.

a)



b)



c)

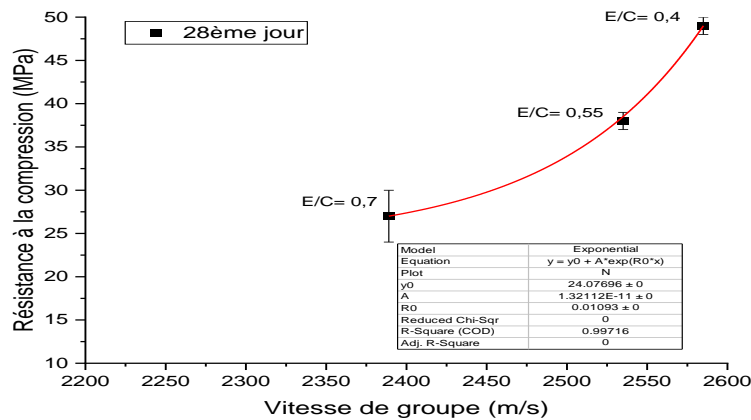


Fig.4.16. Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse de groupe du béton des éprouvettes quel que soit le rapport eau/ciment, aux différents jours de maturation :

(a) 3^{ème} jour (b) 7^{ème} jour (c) 28^{ème} jour.

Ainsi, d'après ces courbes, la résistance à la compression de l'échantillon de béton peut être déduite de la valeur de la vitesse de groupe ultrasonore dans celui-ci, fournissant ainsi une certaine connaissance *a priori* du béton. Ceci peut être montré pour différents rapports eau/ciment quel que soit l'âge de maturation (Fig.4.15) ou pour différents âges de maturation quel que soit le rapport eau/ciment (Fig.4.16).

On s'attendait à créer des caractéristiques d'un abaque général avec la possibilité de les utiliser sur des structures en béton réelles. Cependant, cette étude a montré qu'une courbe de corrélation générale n'est pas possible. Au lieu de cela, différentes courbes de calibrage pourraient être établies en fonction des différentes situations.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet du paramètre du rapport eau/ciment sur la vitesse de propagation des ondes de surface. Les résultats obtenus ont servi de base à l'évaluation non destructive du béton d'enrobage. En outre, l'évolution de ce paramètre acoustique au cours de l'âge de maturation du béton a été étudiée.

L'évaluation non destructive par la mesure des paramètres acoustiques, à savoir la vitesse de propagation de l'onde de surface, a montré qu'en faisant varier le rapport eau/ciment, qui influe sur la porosité du béton, une corrélation entre la diminution de la vitesse de groupe et celle de la résistance mécanique a pu être trouvée.

L'étude a également montré que le coefficient d'atténuation des ondes de surface n'était pas assez fiable, en raison des variations de ce rapport pour le béton ainsi que des difficultés de manipulation des opérateurs.

Les résultats obtenus pour la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh ont été confirmés par l'essai de compression destructive. Cette étude a montré l'efficacité de l'évaluation non destructive par ultrasons de surface pour obtenir des informations sur les propriétés mécaniques du béton lorsque la structure n'est pas accessible que de la surface, à condition de disposer de certaines connaissances *a priori* sur le matériau, telles que le rapport eau/ciment ou l'âge de maturation.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Le travail effectué dans le cadre de cette thèse a pour objectif l'évaluation non destructive du béton par les ondes ultrasonores de surface. Cette étude a montré l'efficacité de cette méthode dans la détermination des propriétés mécaniques de ce matériau composite et poreux qui a un grand intérêt dans le domaine du génie civil.

Dans le domaine du génie civil, les ingénieurs utilisent un contrôle destructif d'écrasement afin de déterminer les propriétés mécaniques de ce matériau. Le contrôle non destructif par ultrasons a l'avantage de caractériser les structures en béton sans dégradation et sans prélèvement.

Dans le premier chapitre de ce travail nous avons présenté le béton avec ses méthodes d'élaboration et les avantages de ce matériau dans le domaine du génie civil.

Dans le second chapitre nous avons étudié la propagation des ondes ultrasonores de surface (de Rayleigh) dans un milieu isotrope, homogène, élastique ou viscoélastique afin de déduire les propriétés de ce type d'ondes particulièrement celles se propageant dans le béton. Nous avons réalisé un sabot ultrasonore à angle variable en téflon afin de générer et recevoir les ondes de Rayleigh dans le béton.

Un troisième chapitre a présenté une étude analytique de la propagation des ondes de Rayleigh dans un milieu isotrope, homogène, élastique ou viscoélastique ainsi que de la propagation dans le béton. Une modélisation analytique a été faite. Cette modélisation nous a permis de décrire la propagation des ondes de surface dans un matériau hétérogène tel que le béton. Nous avons terminé ce chapitre par une simulation numérique de la propagation des ondes de Rayleigh dans le béton par l'utilisation de deux modèles analytiques ; Watterman & Truell et le modèle ISA.

L'étude expérimentale qui a suivi a permis de décrire la propagation des ondes de surface dans des éprouvettes de béton de différents rapports eau/ciment dans la gamme des hautes fréquences au cours de son âge de maturation. Des essais d'écrasement ont été réalisés. Cette étude nous a permis de déterminer les paramètres acoustiques tels que la vitesse de propagation et le coefficient d'atténuation des ondes de Rayleigh ainsi que les paramètres mécaniques tels que la résistance à la compression. Une corrélation entre les deux paramètres acoustique (la vitesse) et mécanique (la résistance) a été faite à différents âges de maturation et pour différents rapports eau-ciment. Cette corrélation nous a permis de remonter aux paramètres mécaniques par la connaissance des

propriétés acoustiques du matériau. Elle affirme l'aptitude de la méthode ultrasonore dans le domaine du CND pour caractériser des structures en béton. En revanche, les méthodes ultrasonores présentent aussi des inconvénients comme :

- La nécessité de coupler le transducteur à la structure à contrôler.
- La grande sensibilité à la forte hétérogénéité du matériau, comme le cas du béton, et aux conditions de mesure (température, taux d'humidité).
- L'influence des défauts sur la direction du faisceau ultrasonore.

Il existe des techniques permettant de s'affranchir de certaines de ces difficultés, par exemple les transducteurs de couplant à air.

En perspective, nous prévoyons de faire des mesures ultrasonores à l'aide d'un interféromètre laser afin de faire des mesures ponctuelles dans le matériau.

Nous prévoyons également l'investigation du béton endommagé lors de l'existence des défauts surfaciques comme les fissurations débouchant à la surface du béton ou pour différents rapports eau-ciment.

Une autre étude sera faite dans la gamme des basses fréquences afin d'aller plus loin en profondeur de la surface. Cette mesure nous permettra d'évaluer les défauts profonds de la structure.

L'utilisation des ondes ultrasonores de surface par différentes méthodes de génération et de détection en différents gammes de fréquence reste une technique très utile, performante et adaptée au contrôle des structures dans le domaine du CND, particulièrement le domaine de génie civil, comme une méthode de prédiction des risques et donc une meilleure gestion des investissements.

**Références
bibliographiques**

Références bibliographiques

[Aiss2024] R. Aissani, A. Dellagi, B. Taibi, T. Boutkedjirt, K. Abdelli, Experimental Study of concrete by using ultrasonic surface waves at hundreds of kilohertz frequency range, Russian Journal of nondestructive testing, 60, 389-402, (2024).

[Aiss2022] R. Aissani, T. Boutkedjirt et K. Abdelli (USTHB), Sabot à angle variable pour le contrôle non destructif du béton par ondes ultrasonores de surface, Brevet d'invention, N° 12925, INAPI, (2022).

[Anh2016] Q. Anh VU, Evaluation du béton d'enrobage par acoustique non linéaire et ondes de surface, Thèse de Doctorat, Université de Aix-Marseille, (2016).

[BA2016] A. Sidiki BA, Étude de la transmission acoustique de métaplaques localement résonantes, Thèse de Doctorat, École doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur, (2016).

[Ben2018] S. Benyamina, S. Kamali, Bernard, S. Kenai, B. Menadi, Study of the resistance, porosity, and migration of chloride ions of BAP based crushing sand, MATEC Web of Conferences, 149, 01093, (2018).

[Beny2023] K.A. Benyahia, S. Kenai, M. Ghrici, Z.M. Sbarati et S.M. Elachachi, Analysis of the accuracy of in-situ concrete characteristic compressive strength in real structures using destructive and non-destructive testing methods, Construction and Building Materials, 366. 130161, (2023).

[Bir1995] S.V. Biryukov, Y.V. Gulyaev, V.V. Krylov et V.P. Plessky, Surface Acoustic Waves in Inhomogeneous Media, Springer-Verlag Berlin Heidelberg Germany (1995).

[Blou2019] E. Blouin-Dallaire, Les méthodes de cure et leurs impacts sur le retrait et la fissuration du béton projeté, Mémoire de Maîtrise, Université de Laval, (2019).

[Bou2006] S. Bouhadja, Etude des vitesses des ondes de surface et de l'atténuation du mode de Rayleigh via un capteur fonctionnant en champ noir, Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, (2006).

[Chaix2011] J.F. Chaix, C. AckBaraly, V. Garnier et J. Salin. Etude de la propagation des ondes de volume et de surface dans du béton, Les journées COFREND Dunkerque, France, 24-27 Mai 2011.

[Chaix2012] J. Chaix, M. Rossat, V. Garnier, and G. Corneloup, An experimental evaluation of two effective medium theories for ultrasonic wave propagation in concrete, Acoustical Society of America, 131. 4481– 4490(2012).

[Chaix2017] J.F. Chaix, S. Rakotonarivo, M. Ramaniraka et V. Garnier, Caractérisation ultrasonore multi-éléments de bétons par analyse de la diffusion de l'énergie. Journées Cofrend, Strasbourg, (2017).

[Chek2008] M. Chekroun, Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, (2008).

[Chek2009] M. Chekroun, L. Le Mararrec, O. Abraham, O. Durand, et G. Villain, Analysis of coherent surface wave dispersion and attenuation for non-destructive testing of concrete, Ultrasonics, 49.743-75,1, (2009).

[Debou2012] J. Deboucq, Caractérisation ultrasonore de structure à couche et à gradient de contrainte par ondes de surface haute fréquence générées par capteur MEMS de type IDT-SAW, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, (2012).

[Dieu1996] E. Dieulesaint, D. Royer, Elastic waves in solids: Free propagation and guided, Paris: Ed. Masson, (1996).

[Din2023] W. Ding, Y. Cheng, L. Yufu, et L. Liangie, An ultrasonic approach for characterising subsurface fractures in concrete, Nondestructive Testing and Evaluation,1-13, (2023).

[Dre1998] G. Dreux, J. Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants. Eyrolles, Paris, France, (1998).

[EN2021] EN 12504-4: 2021: Testing concrete in structures - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity.

[Fik1964] J.G. Fikioris, P.C. Waterman, Multiple scattering of waves - II. Whole corrections in the scalar case, Journal of Mathematical Physical, 5,1413-1420, (1964).

[Fnine2006] A. Fnine, Auscultation de la peau du béton par ondes ultrasonores haute fréquence, Thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, (2006).

[Fol1945] L. Foldy, The multiple scattering of waves, *Physical Review*, 67, 107-119, (1945).

[Ghol2016] S. Gholizad, A review of non-destructive testing methods of composite materials, *Procedia Structural Integrity*, 1. 50-57, (2016).

[Goue2006] M. Goueygou, B. Piwakowski, A. Fnine, F. Buyle-Bodine, P. Safinowski, A. Kosecki, Contrôle Non Destructive des Structures en Béton par Ondes de Surface Ultrasonores, Congrès Français d'Acoustique, Janvier 2006.

[Hai2021] Y. Haifan, L. Linjun, et Q. Pizhong, Localization and size quantification of surface crack of concrete based on Rayleigh wave attenuation model, *Construction and Building Materials*, 280.122437, (2021).

[Ham2014] F. Hamdi, Etude des Propriétés Mécaniques et de L'atténuation des Ondes de Surface dans le Si Poreux en Utilisant un Capteur à Lentilles Annulaires, Thèse de Doctorat, Université de Constantine 1, (2014).

[Har2024] J. Harshit, P. VH, Simulation and experimental of ultrasonic wave propagation and flaw characterization for underwater concrete structures, *Nondestructive Testing and evaluation*, 39. 1581-1598, (2024).

[Hass2001] M. Hassaim, J. Ghazi, G. Ballivy, et K. Khayat, Evaluation de l'état du béton par la technique d'analyse spectrale des ondes de Rayleigh, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28. 1018- 1028, Décembre (2001).

[Hurle2015] S. Hurlebaus, Determination of Longitudinal Stress in Rails, Final report for safety idea project 15, T. Transportation, I. College Station, Texas (2015).

[Jac2010] B. Jacquot, Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie, Cours, Société Francophone de Biomateriaux Dentaires, Université Médicale Virtuelle Francophone, (2009-2010).

[Kan2021] S. Kang, S. Ham et K.J. Kim, An analytical, numerical, and experimental study of Rayleigh wave scattering for internal vertical crack evaluation, *Construction and Building Materials*, 306. 124838 (2021).

[Laf2006] Z. Lafhaj, M. Goueygou, A. Djerbi, M. Kaczmarek, Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/ cement ratio and water content. *Cement and Concrete Research*, 36. 625-633, (2006).

[Lag2007] J. Lagarde, Utilisation des ondes de surface pour l'inspection des parois de galeries, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, (2007).

[Lau2001] O. Laurence, La fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton : apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation, Thèse de Doctorat, Université de Laval, (2001).

[Loch1976] F. W. Locher, W. Richartz et S. Sprung, Setting of ciment, Part I: Reaction and development of structure, *cement-Kalk-Gyps*, 29. 435-442, (1976).

[Mam2005] V. Mamou, Caractérisation Ultrasonore d'échantillons hétérogènes multiples diffuseurs, Thèse de Doctorat, Université de Paris 7, (2005).

[Mich 2012] J. Michel, G. Pitone, Dilatation et contraintes thermique dans les solides : Application au bilames présentation d'une expérience, *Enseignement expérimental, Union des professeurs de physique et de chimie*, 106. 77-92, Janvier (2012).

[Mus2005] M. Zdiri, M. Ben Ouezdou, J. Neji et M. El ouni, formulation et simulation des bétons compactes au rouleau : application aux matériaux de gisements locaux, *Colloque CMEDIMAT, Tunisie* (2005).

[Ospt2021] N. Ospitia, et al., Sensor size effect on Rayleigh wave velocity on cementitious surfaces, *Sensors*, 21. 6483, (2021).

[Othm2013] M. Othmani marabout, Propagation des ondes ultra-sonore dans les milieux solides hétérogènes -Application au cas du béton-, Thèse de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, (2013).

[Ourak1986] M. Ourak, J. M. Rouvaen, B. Nongaillard, G. Waxin et E. Bridoux, Production d'ondes acoustiques de surface focalisées et utilisation en contrôle non destructif, *Revue Phys. Appl*, 21. 417-424, (1986).

[Palerm2018] C. Palerm, C. Du Burck, Génération de l'onde de Scholte par conversion de l'onde de surface, Master pour l'ingénieur, Université de Sorbonne, (2018).

[Pet 2003] F. Peters, L. Petit, A broad band spectroscopy method for ultrasound wave velocity and attenuation measurement in dispersive media. *Ultrasonics*, 41. 357-363 (2003).

[Piwak 2004] A. Piwakowski, A. Fnine, M. Goueygou, F. Buyle-Bodin, Generation of Rayleigh waves into mortar and concrete samples, *Ultrasonics*, 42. 395-402, (2004).

[Quiv2010] A. Quiviger, J. Zardan, J. Chaix, C. Payan, V. Garnier, J. Moysan, et J. Salin, Caractérisation Ultrasonore de Fissures dans les Bétons Méthodes Linéaires et Non Linéaires, 10^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Lyon, 12-16 Avril (2010).

[Quiv2011] A. Quiviger, C. Payan, J. Moysan, J. Salin, Caractérisation d'une fissure débouchant dans un béton par méthodes ultrasonores, Cofrend 2011, Dunkerque, France, 24-27 May (2011).

[Quiv2012] A. Quiviger, Ultrasons diffus pour la caractérisation d'une fissure dans le béton : Approche linéaire et non linéaire, Thèse de Doctorat, Université Aix Marseille, (2012).

[Raa2020] Y. Raach, Y. Derouiche, et F. Messelmi, Influence of concrete age on the behavior of ultrasonic waves in interfaces (concrete—steel—concrete), *J. Mech. Eng. Sci*, 234. 4239–4257 (2020).

[Rev2009] N. Reviron, Etude du fluage des bétons en traction. Application aux enceintes de confinement des centrales nucléaires à eau sous pression, Thèse de Doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, (2009).

[Rid2021] E. Ridengaoqier, H. Shigemitsu, P. Phommahaxay, et K. Satoshi, Experimental study on the porosity evaluation of pervious concrete by using ultrasonic wave testing on surfaces, *Construction and Building Materials*, 300.2-11, (2018).

[Ross2007] M. Rossat, G. Corneloup, V. Garnier, J. F. Chaix, Amélioration de la modélisation de la propagation des ondes ultrasonores dans les milieux diphasiques, 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 Aout (2007).

[Sait2016] S. Sait, Etude théorique et simulation de la propagation des ondes guidées de Lamb de Rayleigh et de Love. Application à la mesure d'épaisseur à la gravimétrie et la mesure de la viscosité, Thèse de Doctorat, USTHB, (2016).

[Sfafi2002] H. Sfafi, Application de la méthode MASW pour la détection de zones de faiblesse sous les chaussées, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke (Québec), (2002).

[Sli2021] H. Slimani, N. Cheniti, K. Abdelli, et T. Boutkedjirt, Characterization of Concrete by using Bulk Longitudinal Ultrasonic Waves at Low Frequencies - Correlation with Compressive Strength Testing, Defect and Diffusion Forum, 406. 430-440, (2021).

[Stev2011] H. Steven Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, R. Douglas Hooton, J. Richard McGrath, Dosage et contrôle des mélanges de béton: manuel d'applications, méthodes et matériaux, Ed 8, Association canadienne du ciment Portland, (2011).

[Son2022] H. Song, S. B. Feldman, J.S. Popovics, In situ detection and characterization of alkali-silica reaction damage in concrete using contactless ultrasonic wave filed imaging, Cement and concrete composites, 133. 104661, (2022).

[Tan 2014] N. Tan Nguyen, Evaluation non destructive des structures en béton armé : étude de la variabilité spatiale et de la combinaison des techniques, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, (2014).

[Tey2022] M. Tayebi, Etude des types de fissurations dans les constructions en climat aride, cas d'étude : Adrar, Thèse de Doctorat, Université Ahmed Draia-Adrar, (2022).

[Tou2010] A. Toukal, Influence des taux de chargement sur la caractérisation non destructive du béton par ultrasons, Mémoire de Magister, Université M'hamed Bougara de Boumèdes, (2010).

[Vik1967] A.I. Viktorov, Rayleigh and Lambs waves, Physical Theory and Application, New York: Plenum, (1967).

[Wat1961] P.C. Waterman, R. Truell, Multiple scattering of waves, *Journal of Mathematical Physics*, 2, 512-537, (1961).

[Weil2010] F. Weil, L'utilisation des ondes de surface pour la caractérisation non intrusive des structures en béton, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, (2010).

[Yu2018] T. Yu, Modélisation de la propagation des ondes ultrasonores dans le béton pour l'amélioration du diagnostic des structures de génie civil, Thèse de Doctorat, Université de Aix-Marseille (2018).

[Yu.T2018] T.Yu, J-F. Chaix, L. Audibert, D. Komatitsch, V. Garnier, et J-M. Hénault, Simulations of ultrasonic wave propagation in concrete based on a two-dimensional numerical model validated analytically and experimentally, *Ultrasonics*, 92. 21–34, (2018).

Annexes

Annexe A : Simulation de la propagation des ondes longitudinale et transversale

Le champ de déplacement particulaire total s'écrit :

$$u(r, \theta, \varphi) = u_L(r, \theta, \varphi) + u_T(r, \theta, \varphi) \quad (\text{A1})$$

où u_L et u_T représentent les déplacements longitudinal et transversal.

1. Onde incidente longitudinale

Nous considérons une onde plane homogène longitudinale se propageant selon la direction e_x et caractérisée par son nombre d'onde k_0^L .

La décomposition en séries d'harmoniques sphériques du potentiel de l'onde longitudinale incidente [BA2016] donne :

$$\phi_{inc}(x, y, z) = e^{ik_0^L x} \quad (\text{A2})$$

Avec les coordonnées sphériques, nous obtenons :

$$\phi_{inc}(r, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} i^n (2n+1) j_n(k_0^L r) P_n(\cos \theta) \quad (\text{A3})$$

où

$$P_n(\cos \theta) = P_n^0(\cos \theta) \text{ et } P_n^1(\cos \theta) = -\frac{\partial P_n(\cos \theta)}{\partial \theta} \quad (\text{A4})$$

P_n représente le polynôme de Legendre.

Les expressions des champs de potentiel des ondes incidentes et diffusées dans la matrice (ϕ_0, ψ_0, χ_0) et ceux des ondes générées dans les inclusions (ϕ_1, ψ_1, χ_1) sont définies comme suit [BA2016]:

$$\begin{pmatrix} \phi_0 = \phi_{inc} + \phi^{diff} \\ \psi_0 \\ \chi_0 \\ \phi_1 \\ \psi_1 \\ \chi_1 \end{pmatrix} = \sum_{n=0}^{\infty} i^n (2n+1) \begin{pmatrix} (j_n(k_0^L r) + T_n^{LL} h_n^{(1)}(k_0^L r)) P_n(\cos \theta) \\ T_n^{TL} h_n^{(1)}(k_0^L r) P_n^1(\cos \theta) \\ 0 \\ C_n^{LL} j_n(k_1^L r) P_n(\cos \theta) \\ D_n^{TL} j_n(k_1^L r) P_n^1(\cos \theta) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A5})$$

Les coefficients $(T_n^{LL}, T_n^{TL}, C_n^{LL}, D_n^{TL})$ désignent les amplitudes modales décrivant respectivement l'onde L diffusée dans la matrice, l'onde T diffusée dans la matrice, l'onde L générée dans l'inclusion et l'onde T générée dans l'inclusion.

$$r = a \text{ et } 0 \leq \theta \leq \pi.$$

Pour des modes $n > 0$, le système matriciel déduit des quatre conditions de continuité du champ de déplacement et du vecteur contrainte devient [BA2016]:

$$\begin{pmatrix} P_{11}(a)P_{12}(a)P_{13}(a)P_{14}(a) \\ P_{21}(a)P_{22}(a)P_{23}(a)P_{24}(a) \\ P_{31}(a)P_{32}(a)P_{33}(a)P_{34}(a) \\ P_{41}(a)P_{42}(a)P_{43}(a)P_{44}(a) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_n^{LL} \\ T_n^{TL} \\ C_n^{LL} \\ D_n^{TL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1(a) \\ S_2(a) \\ S_3(a) \\ S_4(a) \end{pmatrix} \quad (\text{A6})$$

Les coefficients P_{ij} et S_i respectivement de la matrice P et du vecteur S sont donnés dans [BA2016] avec $(i, j = 1, 2, 3, 4)$. Les expressions des amplitudes modales sont extraites de l'équation (A6) à l'aide de la méthode de Cramer [BA2016].

Après la détermination les coefficients $(T_n^{LL}, T_n^{TL}, C_n^{LL}, D_n^{TL})$, nous déduisons la fonction de diffusion de l'onde incidente longitudinale sous la forme :

$$f_{LL}(\theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1)P_n(\cos\theta)}{ik_0^L} T_n^{LL} \quad (\text{A7})$$

La fonction de diffusion vers l'avant et de rétrodiffusion correspond aux deux angles particuliers $\theta = 0$ et $\theta = \pi$ respectivement. L'équation (A7) s'écrit :

$$f_{LL}(0) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1)}{ik_0^L} T_n^{LL} \quad (\text{A8})$$

et

$$f_{LL}(\pi) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1)(-1)^n}{ik_0^L} T_n^{LL} \quad (\text{A9})$$

Nous intégrons ces deux formules dans l'expression du nombre d'onde effectif k_{eff} dans la modélisation de la propagation des ondes dans un milieu hétérogènes.

2. Onde incidente transversale

Nous considérons dans cette section une onde plane homogène transversale se propageant selon la direction e_x et caractérisée par son nombre d'onde k_0^T .

La décomposition en séries d'harmoniques sphériques du potentiel des deux ondes incidentes transversales (ψ_{inc}, χ_{inc}) respectivement verticale horizontale nous donne [BA2016]:

$$\psi_{inc}(r, \theta, \varphi) = - \sum_{n=0}^{\infty} i^n \frac{(2n+1)}{n(n+1)} j_n(k_0^T r) P_n^1(\cos\theta) \cos\varphi \quad (\text{A10})$$

et :

$$\chi_{inc}(r, \theta, \varphi) = - \sum_{n=0}^{\infty} i^n \frac{(2n+1)i}{n(n+1)k_0^T} j_n(k_0^T r) P_n^1(\cos\theta) \sin\varphi \quad (\text{A11})$$

Les expressions des champs de potentiel des ondes incidentes et diffusées dans la matrice (ψ_0, χ_0, ϕ_0) et ceux des ondes générées dans les inclusions (ψ_1, χ_1, ϕ_1) sont définies comme suit [BA2016]:

$$\begin{pmatrix} \psi_0 = \psi_{inc} + \psi^{diff} \\ \chi_0 = \chi_{inc} + \chi^{diff} \\ \phi_0 \\ \phi_1 \\ \psi_1 \\ \chi_1 \end{pmatrix} = - \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \begin{pmatrix} (j_n(k_0^T r) + T_n^{TT} h_n^{(1)}(k_0^T r)) \cos\varphi \\ \frac{i}{k_0^T} ((j_n(k_0^T r) + t_n^{TT} h_n^{(1)}(k_0^T r)) \sin\varphi) \\ T_n^{LT} h_n^{(1)}(k_0^L r) \cos\varphi \\ C_n^{LT} j_n(k_1^L r) \cos\varphi \\ D_n^{TT} j_n(k_1^T r) \cos\varphi \\ d_n^{TT} \frac{i}{k_1^T} j_n(k_1^T r) \sin\varphi \end{pmatrix} P_n^1(\cos\theta) \quad (\text{A12})$$

Nous déterminons les amplitudes modales de l'équation (A12) $(T_n^{TT}, T_n^{LT}, C_n^{LT}, D_n^{TT}, t_n^{TT}, d_n^{TT})$. Elles sont déduites des conditions de continuités à l'interface entre la matrice et l'inclusions $(r = a, 0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \varphi \leq 2\pi)$ [BA2016].

Le système matriciel déduit des six conditions de continuité du champ de déplacement et du vecteur contrainte se découple en deux sous-systèmes, l'un correspondant aux mouvements dans le plan (système matricielle 2x2) et l'autre aux mouvements hors plan (système matricielle 2x2) :

$$\begin{pmatrix} P_{11}(a)P_{12}(a)P_{13}(a)P_{14}(a) \\ P_{21}(a)P_{22}(a)P_{23}(a)P_{24}(a) \\ P_{31}(a)P_{32}(a)P_{33}(a)P_{34}(a) \\ P_{41}(a)P_{42}(a)P_{43}(a)P_{44}(a) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_n^{LT} \\ T_n^{TT} \\ C_n^{LT} \\ D_n^{TT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1(a) \\ S_2(a) \\ S_3(a) \\ S_4(a) \end{pmatrix} \quad (\text{A13})$$

et

$$\begin{pmatrix} X_{11}(a)X_{12}(a) \\ X_{21}(a)X_{22}(a) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_n^{TT} \\ d_n^{TT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1(a) \\ v_2(a) \end{pmatrix} \quad (\text{A14})$$

Les coefficients P_{ij} , X_{kl} , S_i et v_k respectivement des matrices P et X et des vecteur S et v (avec $i, j = 1, 2, 3, 4$ et $k, l = 1, 2$) sont présentés dans [BA2016]. Les amplitudes modales sont déterminées alors de l'équation (A13) et (A14) à l'aide de la méthode de Cramer.

Nous nous intéressons à l'expressions particulière de la fonction de diffusion $f_{TT}(\theta, \varphi)$ de l'onde incidente transversale nous obtenons [BA2016] :

$$f_{TT\theta}(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \left(T_n^{TT} \frac{\partial P_n^1(\cos \theta)}{\partial \theta} + t_n^{TT} \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} \right) \cos \varphi \quad (\text{A15})$$

et :

$$f_{TT\varphi}(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \left(T_n^{TT} \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta} + t_n^{TT} \frac{\partial P_n^1(\cos \theta)}{\partial \theta} \right) \sin \varphi \quad (\text{A16})$$

Sachant que la fonction de diffusion totale s'écrit :

$$f_{TT}(\theta, \varphi) = \sqrt{f_{TT\theta}^2(\theta, \varphi) + f_{TT\varphi}^2(\theta, \varphi)}, \quad (\text{A17})$$

Les fonctions de diffusion vers l'avant et rétrodiffusé correspondent respectivement aux angles particuliers $\theta = 0$ et $\theta = \pi$ et s'écrivent :

$$f_{TT}(\theta = 0) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{2ik_0^T} (T_n^{TT} + t_n^{TT}) \quad (\text{A18})$$

et

$$f_{TT}(\theta = \pi) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{2ik_0^T} (T_n^{TT} t_n^{TT}) \quad (\text{A19})$$

Comme nous l'avons fait pour les ondes longitudinales, nous intégrons ces deux formules dans l'expression du nombre d'onde effectif k_{eff} dans la modélisation de la propagation des ondes dans un milieu hétérogène.

Annexe B: Elaboration des éprouvettes de béton

Les éprouvettes de béton ont été réalisées au niveau du laboratoire Bâti dans l'environnement de la Faculté de Génie Civile de l'USTHB.

Avant l'élaboration des échantillons, nous avons fait une analyse granulométrique des constituants du béton par tamisage selon la norme NF EN 206+A2/CN.

Nous avons pris 2kg de sable de carrière 0/3 et 4kg pour chaque type de gravier d'origine granitique 3/8 et 8/15.

Les ouvertures des tamis utilisés pour le sable sont : 0,08 ; 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 et 5mm.

Les ouvertures des tamis utilisés pour les graviers sont : 1,25 ; 2,5 ; 3,15 ; 5 ; 10 et 16mm.

Le ciment utilisé est le ciment Portland (CEMI 42.5) et l'eau de robinet.



Fig.B.1. Série des tamis utilisés pour le tamisage du gravier.

Le module de finesse du sable utilisé est $M_f = 3,2$.

Suivant la méthode de la formulation de Dreux-Gorisse, nous avons tracé la courbe granulométrique (Fig 3.1) et déterminé les quantités massiques des constituants utilisés pour faire la gâchée avec une quantité supplémentaire de l'ordre de 20% pour le malaxage, telle que la dimension du gros granulat est $D_{max}=16mm$.

Le tableau suivant (B1) représente les quantités utilisées pour élaborer quatre éprouvettes de béton de dimension $(10 \times 10 \times 40) \text{ cm}^3$.

Tableau B1: Quantités de différents composants pour la fabrication des éprouvettes de béton.

Rapport (E/C)	Sable 0/3 (kg)	Gravier 3/8 (kg)	Gravier 8/15 (kg)	Eau (kg)	Ciment (kg)
0,4	15,54	2,52	17,63	3,00	7,49
0,55	15,54	2,52	17,63	4,12	7,49
0,7	15,54	2,52	17,63	5,24	7,49



Fig.B.2. Constituants du béton après pesée pour le rapport E/C=0,4.

Après le malaxage de la gâchée, nous avons rempli les moules huilés par deux couches de béton. Chaque couche est mise en vibration à l'aide d'une table vibrante ou avec une aiguillée vibrante selon la quantité d'eau utilisée afin d'homogénéiser le mélange.



Fig.B.3. Moules remplis du béton pour la gâchée de rapport $E/C=0,4$.

Après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulées et pesées puis elles ont été immergées dans une cuve d'eau à la température ($T=20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$). Pour garder une teneur en eau près de 100%, nous les sortons de la cuve lors de la maturation que pour effectuer les mesures ultrasonores pour une durée maximale de 5 heures à l'air libre [Chek2008].

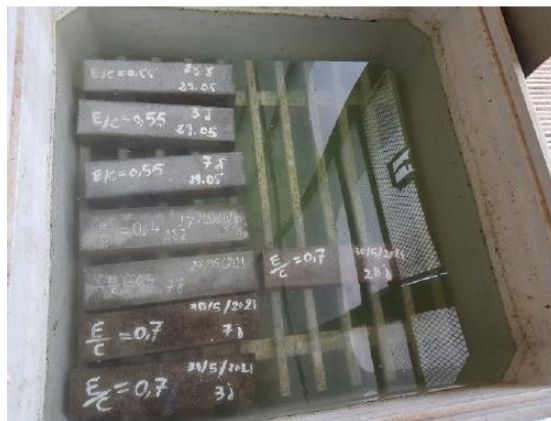


Fig.B.4. Immersion des éprouvettes dans une cuve d'eau.