



Department: Mechanical engineering

Order N°: 004/ 2020

Defense authorization N° 093/2020

## DOCTORAL THESIS

3rd Cycle Doctoral (D-LMD)

Presented by

**Youcef RAACH**

With a view to obtaining the doctoral diploma in 3rd Cycle Doctoral (D-LMD)

Branch: Mechanical Engineering

Specialty: Mechanics and Energetics-Materials-

### Topic

**Modeling of a structure (concrete / steel / concrete): Influence of concrete age  
on the behavior of ultrasonic waves at interfaces**

Supported on 04 /04 / 2020, before the jury composed of:

Last and first name	Grade	Institution of affiliation	Designation
Mr Ahmed Lamine BOUKHALKHAL	MCA	University of Djelfa	President
Mr Yazid DEROUICHE	Professor	University of Djelfa	Supervisor
Mr Farid MESSELM	Professor	University of Djelfa	Co-Supervisor
Mr Mohamed KHARROUBI	Professor	University of Djelfa	Examiner
Mr Elhadj RAOUACHE	MCA	University of Bordj Bou Arreridj	Examiner
Mr Razik BENDERRADJI	MCA	University of M'sila	Examiner

**Djelfa University, FST - 2021**



Département : Génie mécanique

N° d'Ordre : 004 / 2021

Autorisation de Soutenance N° 093/2021

## THESE DE DOCTORAT

Doctorat 3<sup>ème</sup> Cycle (D-LMD)

Présentée par

**Youcef RAACH**

En vue de l'obtention du diplôme de Docteur en 3<sup>ème</sup> Cycle D-LMD

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Mécanique et Energétique

### Thème

**Modélisation d'une structure(béton/acier/béton) : Influence de l'âge du béton  
sur le comportement des ondes ultrasonores aux interfaces**

Soutenue publiquement, le 04 / 04 /2021, devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement de rattachement	Désignation
Mr Ahmed Lamine BOUKHALKHAL	MCA	Université de Djelfa	Président
Mr Yazid DEROUICHE	Professeur	Université de Djelfa	Directeur de thèse
Mr Farid MESSELM	Professeur	Université de Djelfa	Co Directeur de thèse
Mr Mohamed KHARROUBI	Professeur	Université de Djelfa	Examineur
Mr Elhadj RAOUACHE	MCA	Université de Bordj Bou Arreridj	Examineur
Mr Razik BENDERRADJI	MCA	Université de M'sila	Examineur

**Université de Djelfa, FST, 2021**

## Introduction générale

Le développement technologique moderne nécessite l'utilisation des matériaux bien spécifiques possédant des propriétés mécaniques fiables assurant le bon fonctionnement des structures. Les matériaux en sandwich composent l'un des matériaux composites les plus répandus dans l'industrie surtout dans l'aéronautique [1-4], la construction (bâtiments, ouvrages d'art...) [5-7] et les réacteurs nucléaires [8-9]. Le problème c'est d'avoir une structure performante qui s'adapte au différents milieux dont l'association des matériaux de différente nature ne provoque aucun mauvais fonctionnement pour des raisons d'incompatibilité ou mal adhérence.

Plusieurs études dans plusieurs domaines ont été réalisés (thermique, phonique rayonnement..) afin de bien analyser le comportement de ces matériaux [10-13]. Ces études ont permis d'extraire les différentes caractéristiques de couches constitutifs des structures multicouches. La structure complexe et spécifique des matériaux en sandwich nécessite un bon contrôle caractérisant les différents paramètres acoustiques. Parmi les moyens les privilégiés permettant la modélisation des structures en sandwich c'est le contrôle non destructif (CND) pour des raisons de sa capacité à caractériser les matériaux et exploiter son fond sans aucun changement physique. La méthode suivie pour extraire les paramètres acoustiques c'est celle de mesure de vitesses des ultrasons ou on mesure la vitesse de passage de l'onde ultrasonore à travers l'échantillon.



L'objectif principal du travail actuel est de modéliser le comportement acoustique des structures en sandwich (béton/acier/béton) en interprétant l'effet de l'âge de béton sur l'évolution des ondes transmises et transversales aux interfaces.

Le travail actuel est une combinaison d'un travail expérimental qui contient la formulation des échantillons de différents types de bétons (béton de sable, béton ordinaire et le béton à haute performance), ainsi que la mesure de vitesse des ultrasons passant par ces derniers, à l'autre côté, un travail de programmation a été réalisé consiste à injecter les valeurs obtenues expérimentalement dans un code de calcul résolu par le programme Matlab (version 2016). La résolution du système analytique a permis d'obtenir les courbes d'évolution des coefficients d'ondes : (TT : coefficient de transmission transversale, TL : coefficient de transmission longitudinale, RT : coefficient de réflexion transversale, RL : coefficient de réflexion longitudinale).

La structure de présent manuscrit se compose des chapitres suivants :

Le premier chapitre intitulé « l'état de l'art » est un rappel bibliographique qui s'intéresse au contrôle non destructif (définition ; historique ; mode opératoire...) ainsi que les types des matériaux composites ; leur composition leurs avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre intitulé « Formulation mathématique et modélisation numérique » est une analyse sur les ondes élastiques et leurs propriétés ainsi que les notions de base de la mécanique de milieux continu nécessaire pour la construction du modèle mathématique.



Le troisième chapitre appelé « Matériel et techniques expérimentales » est consacré à traiter les différents matériaux nécessaires à la formulation des échantillons ainsi que les techniques expérimentales utilisées pour l'extraction des différents paramètres essentielles pour la modélisation.

Le quatrième chapitre nommé « Résultats et discussion » est le résultat de résolution de système obtenu analytiquement afin de suivre et interpréter les résultats de l'évolution des coefficients de transmission et de réflexion en fonction d'âge.

A la fin, une conclusion générale sera établie et suivie par des perspectives et recommandations pour les prochaines études.

## **I-1 Introduction :**

Ce chapitre est un rappel bibliographique sur les différents techniques du contrôle non destructif ainsi que les matériaux composites.

## **I-2 Contrôle non destructif CND :**

Dans l'inspection et le contrôle du béton, l'utilisation du contrôle non destructif (CND) est relativement nouveau [14-15]. Le lent développement de ces tests pour le béton est dû au fait que, contrairement à l'acier, le béton est un matériau composite non homogène et la plupart d'eux sont produits en des usines prêtes à l'emploi et livrées sur le chantier. Les installations en place de béton est par sa nature et ses méthodes de formulation, très variable et ne se prête pas aussi facilement que l'acier aux essais par les méthodes CND traditionnelles produits.

En plus de ce qui précède, des progrès considérables ont été réalisés dans le développement de méthodes CND pour tester le béton au cours des dernières années. Un nombre considérable de ces méthodes ont été normalisées par la Société Américaine pour les Essais et les Matériaux (ASTM), l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) et le British Standards Institute (BSI).

Les contrôles non destructifs peuvent être subdivisés en deux types principaux. Le premier type comprend ceux identifiés comme des tests de vitesse de son et de pouls[16], qui impliquent la détermination de la fréquence de résonance et la mesure de la vitesse d'une impulsion de compression traversant le béton. Sont également inclus dans cette catégorie les essais d'ondes de contraintes pour la localisation des défauts ou les discontinuités qui peuvent être présentes ou la mesure de l'épaisseur du béton. Le deuxième type comprend les tests qui sont utilisés pour estimer la force et comprennent la dureté de la surface, la pénétration, l'arrachement, la rupture, la maturité, l'arrachage et les méthodes combinées. Certaines de ces méthodes ne sont pas vraiment non destructifs car ils causent des dommages superficiels qui sont généralement insignifiante.

## **I-2-1 Historique :**

La méthode de la vitesse de pulsation ultrasonique a été utilisée avec succès pour évaluer la qualité du béton depuis les années 1930. Cette méthode peut être utilisée pour détecter les fissures internes et autres défauts comme les changements dans le béton tels que la détérioration due à un environnement chimique agressif et au gel et la décongélation. En utilisant la méthode de la vitesse de propagation, il est également possible d'estimer la résistance du béton, tester des échantillons et du béton en place. La méthode de la vitesse d'impulsion est une méthode véritablement non destructive, car la technique utilise des ondes mécaniques ce qui n'entraîne aucun dommage pour l'élément en béton testé. Une éprouvette peut être testée à nouveau et au même endroit, ce qui est utile pour suivre les changements structurels internes sur une longue période.

Les chercheurs du secteur du béton sont intéressés à la détermination des propriétés du béton par des méthodes non destructives pendant des décennies. De nombreuses méthodes d'essai ont été proposées pour l'inspection des éprouvettes de laboratoire à partir des années 1930. Hornibrook et Obert ont été les premiers à mener des recherches approfondies utilisant des techniques de vibration telles que la méthode de la fréquence de résonance. [17-19]

La Seconde Guerre mondiale a accéléré la recherche sur les essais non destructifs utilisant la propagation des ondes de pression. Le développement de la méthode de la vitesse de propagation a commencé au Canada et en Angleterre à peu près à la même époque. Au Canada, Leslie et Cheesman a mis au point un instrument appelé soniscope [20] ; Pendant son séjour en Angleterre, Jones mis au point un instrument appelé "testeur ultrasonique". [21-26]

En principe, le soniscope et le testeur ultrasonique étaient assez similaires, avec seulement quelques différences mineures dans les détails. Depuis les années 1960, les méthodes de mesure de la vitesse d'impulsion ont quitté les laboratoires pour s'installer sur



les chantiers de construction. Malhotra a dressé une liste exhaustive des articles publiés sur ce sujet. [27]

## II-1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la formulation des équations nécessaires pour la construction d'un modèle mathématique décrivant le phénomène de propagation des ondes à travers la structure étudiée.

## II-2 Théorie d'élasticité

On appelle propriétés mécaniques les propriétés des matériaux solides déterminant leurs facilités ou leurs difficultés de modifier leur corps sous l'action d'une force extérieure et de résister à la rupture. La déformation d'un solide est le résultat de sa modification sous cette force externe, qui engendre une nouvelle disposition des atomes qui forment ce corps, c'est à dire une déformation des distances entre les atomes. On a deux types de déformation :

- **Déformation élastique** : une déformation est dite élastique, si cette dernière disparaît lorsqu'on arrête l'action de la force extérieure, le corps revient à sa forme originale.
- **Déformation plastique** : une déformation est dite plastique si le matériau solide se conserve une fois que la force extérieure est levée.

Tous les corps solides peuvent subir des déformations élastiques ou plastiques suivant le module de la force externe, si cette force appliquée au solide est relativement faible alors la déformation est dite élastique, [54].

## II-3 Déformation élastique

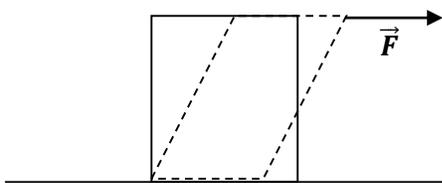
Lorsque on applique une déformation de point vue microscopique, la distance entre les atomes change, ceci va entraîner une modification de la forme ou du volume corps ou bien les deux en même temps. Alors la modification des distances et le changement de la disposition des atomes va se traduire par la force élastique dirigée d'une manière à pouvoir rétablir la forme et volume initial du corps, cette force s'oppose à la force extérieure

appliquée. Si le corps sous l'action de la force externe n'acquies pas d'accélération, alors les forces élastiques vont s'équilibrer avec la force extérieure. Le rapport entre la grandeur de la déformation et les forces qu'elle entraîne est régi par la loi de *Hooke* (force proportionnelle à la déformation). Si on prend de ce corps une surface quelconque, la déformation définie par le rapport de la force s'exerçant sur cette surface à l'aire de cette même surface, ce rapport est appelé contrainte et elle se mesure en unité analogue à une pression :

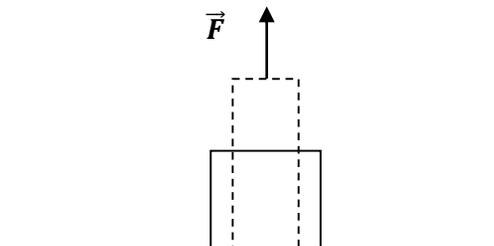
$$\sigma = \frac{F}{S} = \textit{pression} \quad \text{(II.1)}$$

Les déformations subissent par le solide sous l'action de charge (force externe) vont se réduire à deux formes fondamentales, l'une perpendiculaire à la surface et l'autre parallèle à cette même surface. [55]

- Déformation parallèle à la surface : celle-ci va entraîner un changement de la forme du corps sans faire changer son volume (cisaillement), voir la figure II.1.
- Déformation perpendiculaire à la surface : cette déformation va entraîner une variation du volume (allongement, extension, compression), voir la figure II.2.



**Figure II.1 :** Déformation parallèle à la surface

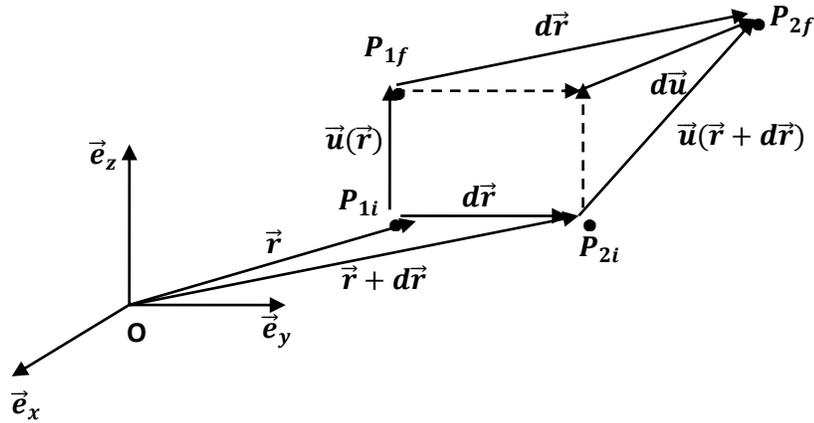


**Figure II.2:** Déformation perpendiculaire à la surface

#### II-4 Tenseur de déformation

Soit un corps solide homogène isotrope, pour étudier la déformation élastique du matériau on choisit deux points appartenant à ce dernier  $(p_1, p_2)$ . Initialement ces deux points se trouvent dans la position spatiale  $(p_{1i}, p_{2i})$  dans le repère  $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ . Après la

déformation du matériau, les deux points se déplacent en une autre position spatiale  $(p_{1f}, p_{2f})$ , voir la figure II.3.



**Figure II.3** : Passage du déplacement au déformation

Pour simplifier l'écriture des formules et les calculs, on a choisi d'utiliser la notation d'Einstein (ex :  $\vec{r} = \sum_1^3 x_i \vec{e}_i$  en notation d'Einstein  $\vec{r} = x_i \vec{e}_i$  ). On note  $\vec{u} = \vec{u}(\vec{r})$  le champ de déplacement.

$$d\vec{r}' = d\vec{r} + d\vec{u} \quad \Rightarrow \quad dx'_i = dx_i + du_i \quad (\text{II.1})$$

$$du_i = \frac{\partial u_i}{\partial x_k} dx_k \quad (\text{II.2})$$

$$d\vec{r}'^2 - d\vec{r}^2 = \left[ \frac{\partial u_l}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right] dx_k dx_l \quad (\text{II.3})$$

Le terme entre les deux crochets dans l'équation II.3 est le tenseur de déformation :

$$S_{kl} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right\} \quad [56] \quad (\text{II.4})$$

Dans le cas des petites déformations le terme, nous avons :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_l} \ll \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \quad \text{et} \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_l} \ll \frac{\partial u_k}{\partial x_i}$$

Donc le tenseur de déformation s'écrit :

$$S_{kl} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial u_l}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right\}, \quad S_{kl} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Ce tenseur a les propriétés suivantes :

- La symétrie ( $S_{kl} = S_{lk}$ ).
- Les éléments diagonaux  $S_{11}, S_{22}, S_{33}$  représentent une déformation par dilatation ou par compression. La variation du volume est calculée par :

$$\frac{dV' - dV}{dV} = S_{kk} = S_{11} + S_{22} + S_{33} \quad (\text{II.6})$$

- Les éléments non diagonaux  $S_{kl} (k \neq l)$  représentent une déformation par cisaillement.

## II-5 Tenseur des contraintes

Généralement dans un corps qui n'est pas déformable, la configuration des atomes correspond à un état d'équilibre thermodynamique. Pour un corps déformable sous l'effet des forces extérieures va réagir en installant de nouvelles forces qui vont essayer de ramener l'état initial, donc on a  $-\vec{F}_{ext} = \text{contraintes internes}$

Soit un volume  $V$  d'un corps solide, la résultante qui agit sur ce volume  $\int F dV$  est calculée par :

$$\int F dV = \sum_{ij} \int_V \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} dV = \sum_{ij} \int_S T_{ij} df_j \quad (\text{II.7})$$

Avec :

- $F$  : force agissante par unité de volume ;

- $T_{ij}$  : tenseur des contraintes (force par unité de surface) ;
- $df_j$  : composante d'un certain vecteur  $df$  représentant l'élément de surface où on applique la contrainte et ce vecteur est dirigé suivant la normale qui sort de la surface.

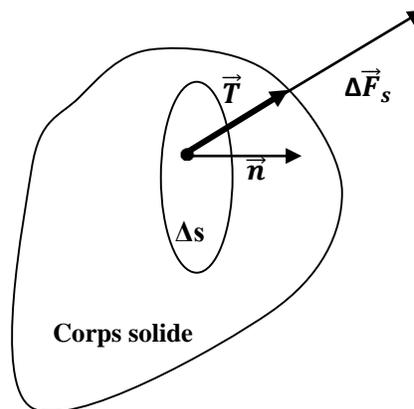
$T_{ij}$  : représente la composante de la contrainte suivant un axe  $x_i$  qui s'exerce sur surface perpendiculaire à l'axe  $x_j$ .

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

On distingue deux forces principales agissant sur un solide, [57] :

- Force de volume : appelée densité volumique de force  $\vec{f} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{F}_V}{\Delta V}$  ( $N / m^3$ ).
- Forces surfaciques : tension mécanique qui est une force par unité de surface

$$\vec{T} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{F}_s}{\Delta S} \text{ (N/m}^2\text{)}, \text{ voir la figure II.4.}$$



**Figure II.4** : Force surfacique (Tension mécanique)

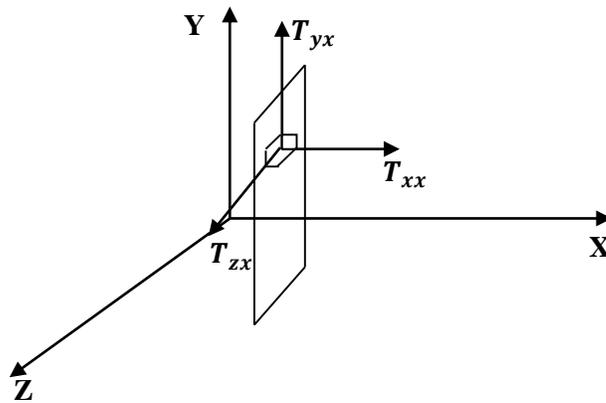
$$\vec{T} = T_x \vec{e}_x + T_y \vec{e}_y + T_z \vec{e}_z = T_i \vec{e}_i \quad (\text{II.9})$$

avec :

$$\begin{cases} T_x = T_{xx}n_x + T_{xy}n_y + T_{xz}n_z \\ T_y = T_{yx}n_x + T_{yy}n_y + T_{yz}n_z \\ T_z = T_{zx}n_x + T_{zy}n_y + T_{zz}n_z \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Le tenseur  $T_{ij}$  c'est le tenseur des contraintes, il est d'ordre 2, symétrique, voir la figure II.5 .La tension appliquée sur une surface est donnée par :  $T_i = T_{ij}n_j \quad i,j=1,2,3$ .

$$\begin{cases} T_x = T_{xx}n_x = T_{xx} \\ T_y = T_{yx}n_x = T_{yx} \\ T_z = T_{zx}n_x = T_{zx} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$



**Figure II.5 :** Représentation des contraintes pour une direction  $\vec{n} = [1,0,0]$

Le signe des composantes du tenseur nous donne des informations sur la nature de la déformation [58] :

- $T_{ii} > 0$ , on a une contrainte de tension ;
- $T_{ii} < 0$ , on a une contrainte de compression ;
- $T_{ij} \neq 0 (i \neq j)$ , on a une contrainte de tangentielle.

### III-1 Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre tous les matériaux contribuant à la réalisation des échantillons, les techniques de mesure de différents paramètres ainsi que les résultats obtenus expérimentalement.

### III-2 Matériel

Il est important de noter que le béton étudié est composé de ciment, de sable, de gravier, d'eau et d'adjuvant dans certains cas. Trois types de bétons ont été réalisés : le béton de sable (BS), le béton ordinaire (BO) et le béton à haute performance (BHP). Pour le béton de sable (BS), il s'agit d'un simple béton composé d'eau, de ciment et de sable au contraire au béton ordinaire (BO) qui nécessite l'ajout du gravier. Concernant le béton à hautes performances (BHP) qui est le béton le plus complexe et le plus hétérogène (par rapport aux deux types de béton précédents) en ajoutant l'adjuvant pour le formuler. Les tableaux III.1, III.2 et III.3 résument les proportions utilisées [63], [64].

**Tableau III.1 :** Composition du béton sable.

	Sable	Ciment	Eau
Densité(kg/m <sup>3</sup> )	2453	3120	1000
Quantité (kg)	18,06	5,695	3,417



**Tableau III.2 :** Composition du béton ordinaire.

	Sable	Ciment	Eau	Gravier(3/8)	Gravier(8/15)
Densité(kg/m <sup>3</sup> )	2453	3120	1000	//	//
Quantité (kg)	10,298	6,48	2,933	4,664	14,099

**Tableau III.3 :** Composition du béton à haute performance.

	Sable	Ciment	Eau	Gravier(3/8)	Gravier(8/15)	Adjuvant
Densité(kg/m <sup>3</sup> )	2453	3120	1000	//	//	//
Quantité (kg)	11,189	7,83	2,166	4,252	12,757	0,261

La description du matériau utilisé lors de la formulation est présentée comme suit :

### III-2-1 Ciment:

Le ciment utilisé est le ciment blanc CPJ de la société LAFARGE. [63]

### III-2-2 Le sable:

Le sable utilisé dans cette étude est extrait de la zone (OUED M'ZI) de la région de LAGHOUAT en Algérie, voir la figure III.1



**Figure III.1 :** Le sable local

### III-2-3 Gravier :

Le gravier utilisé est un gravier calcaires concassés provenant de la région de LAGHOUAT-Algérie. Alors que le gravier utilisé est composé de deux types, un gravier de type 3/8 (diamètre du granule compris entre 3mm et 8mm) et un gravier de type 8/15 où les diamètres sont compris entre 8mm et 15mm, voir la figure III.2.



**Figure III.2 :** Gravier de la région local

### **III-2-4 Eau:**

L'eau utilisée pour le mélange est l'eau du robinet considérée comme potable.

### **III-2-5 Adjuvant :**

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant à haute teneur en eau (MEDAFLOW 30) commercialisé par la société algérienne GRANITEX.

### **IV-2-2 Interface béton / acier :**

Dans cette partie, l'objectif est de suivre l'évolution des coefficients de transmission longitudinale et transversale (TL, TT) et des coefficients de réflexion longitudinale et transversale (RL, RT). Il convient de mentionner que les mesures obtenues sont prises pour différents âges de béton.

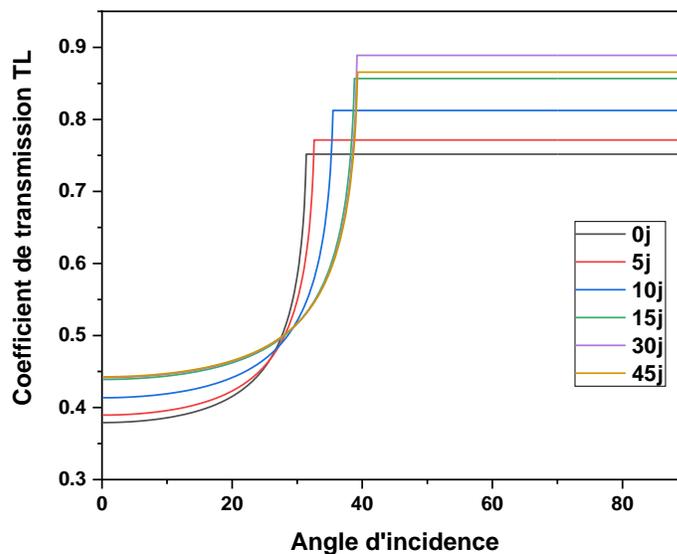
L'objectif du calcul des coefficients (TL TT RL RT) est de pouvoir spécifier la quantité de son transmise longitudinalement et transversalement (TL TT) et la quantité de son réfléchi longitudinalement et transversalement (RL RT) sachant que la somme des deux coefficients ne doit pas être supérieure à un (1).

#### **➤ Variation du coefficient TL:**

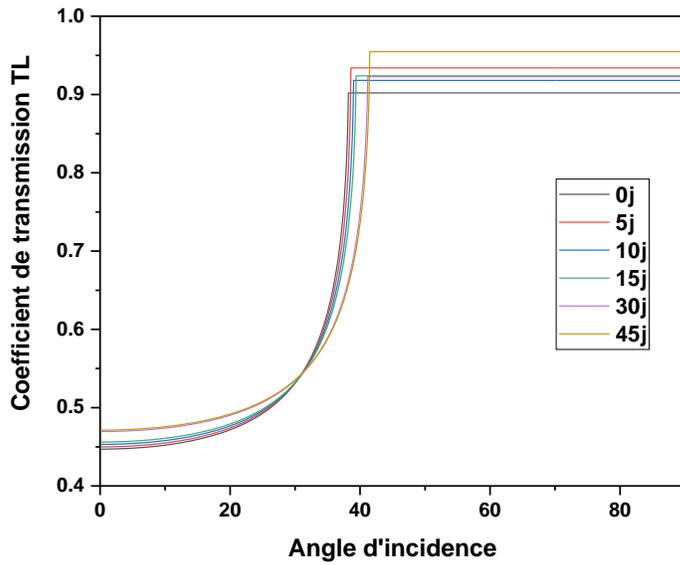
La figure IV.9 montre l'évolution du coefficient de transmission longitudinale TL en fonction de l'angle d'incidence pour différents âges de béton. Tout d'abord, la courbe est divisée en trois parties : la première partie varie de  $0^\circ$  à  $35^\circ$  ou la pente est relativement

faible (pour tous les âges). Alors que dans la deuxième partie (30° à 40°), le gradient est très important jusqu'à l'angle critique qui est d'environ 40° où l'on détecte la stabilité du coefficient TL pour différents âges. Il est à noter que l'avancement de l'âge provoque une augmentation remarquable surtout dans le cas du béton de sable BS Figure IV.10 en raison de son homogénéité contrairement au cas du béton à haute performance BO et du béton ordinaire BHP présentés dans les figures IV.10 et IV.11.

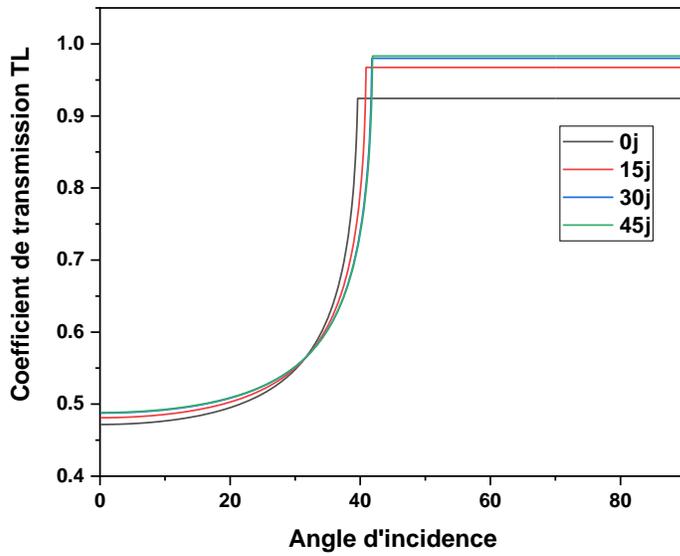
L'évolution du coefficient de transmission longitudinale TL change le comportement dès qu'un angle critique est atteint à proximité de 28°, cet angle prend une valeur plus élevée dans le cas du béton ordinaire BO et du béton à hautes performances BHP, ce qui confirme l'impact de la structure interne sur l'onde transmise. La structure interne influe sur la vitesse de propagation des ondes car les composants du béton (ciment, sable, eau...) travaillent toujours jusqu'à la maturation atteinte après 28 jours. La vitesse de maturation a un gradient impuissant dans la première moitié, c'est-à-dire les quatorze premiers jours. Le changement de type de béton n'a pas d'effet remarquable sur l'angle de stabilité.



**Figure IV.9 :** Variation du coefficient TL en fonction d'âge (l'interface BS/Acier)



**Figure IV.10 :** Variation du coefficient TL en fonction d'âge (l'interface BO/Acier)

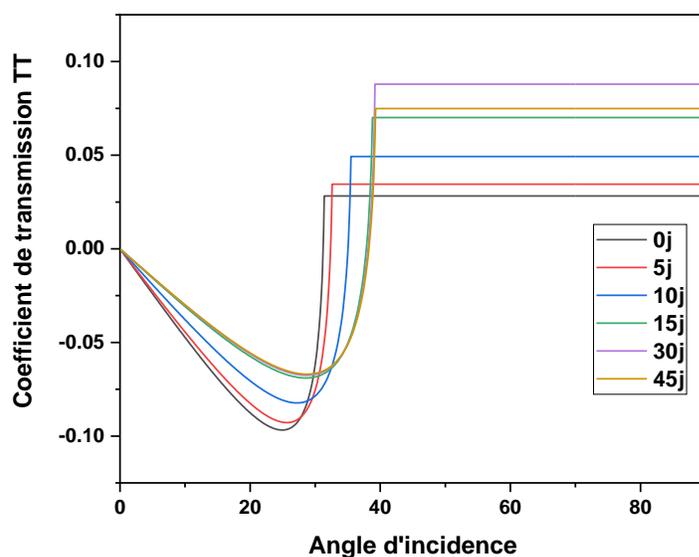


**Figure IV.11 :** Variation du coefficient TL en fonction d'âge (l'interface BHP/Acier)

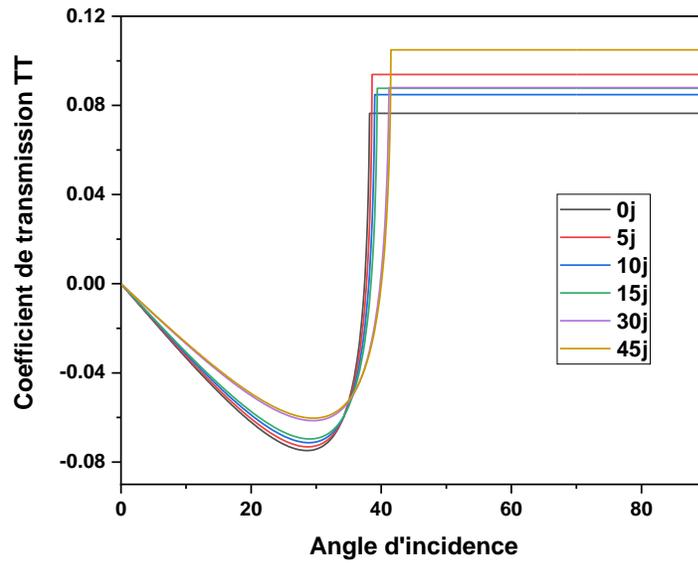
### ➤ Variation du coefficient TT:

L'évolution du coefficient de transmission transversale est indiquée dans la figure IV.12. En général, TT présente trois tendances : la première est la diminution du coefficient TT suivie d'une forte progression et enfin la stabilité à un certain angle. Dans ce cas, l'effet de l'âge concret est plus remarquable pour le béton de sable BS du quinzième jour en le comparant avec le BO et le BHP présentés dans les figures IV.13 et IV.14. Pour le cas de 00 jours, la courbe atteint un minimum à l'angle  $25^\circ$  et son maximum prend la valeur de 0,01 pour un angle proche de  $30^\circ$ .

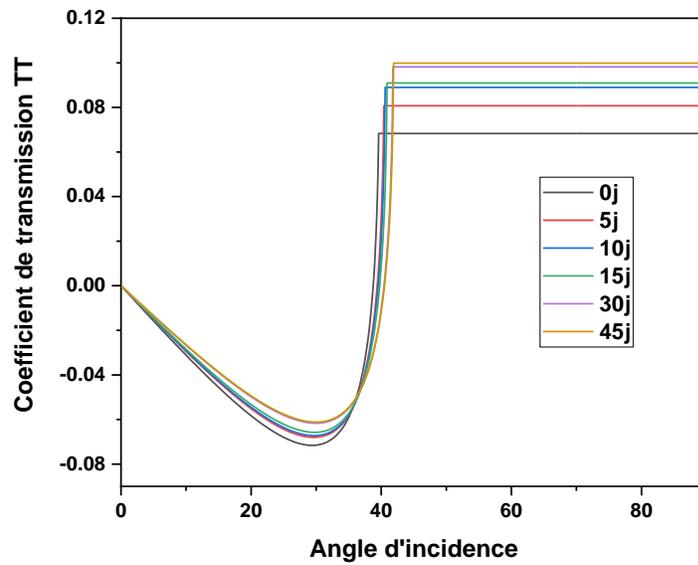
En revanche, pour les intervalles restants (15, 30 et 45 jours), le minimum est obtenu pour un angle proche de  $30^\circ$  et atteint son maximum à l'angle de  $40^\circ$ , en prenant une valeur de 0,01. Comme dans le cas précédent du coefficient de transmission transversale ; il existe un angle spécial de près de  $30^\circ$ , cet angle est influencé par l'état interne du béton ou il augmente jusqu'à atteindre une valeur proche de  $36^\circ$ .



**Figure IV.12 :** Variation du coefficient TT en fonction d'âge (l'interface BS/Acier)



**Figure IV.13 :** Variation du coefficient TT en fonction d'âge (l'interface BO/Acier)

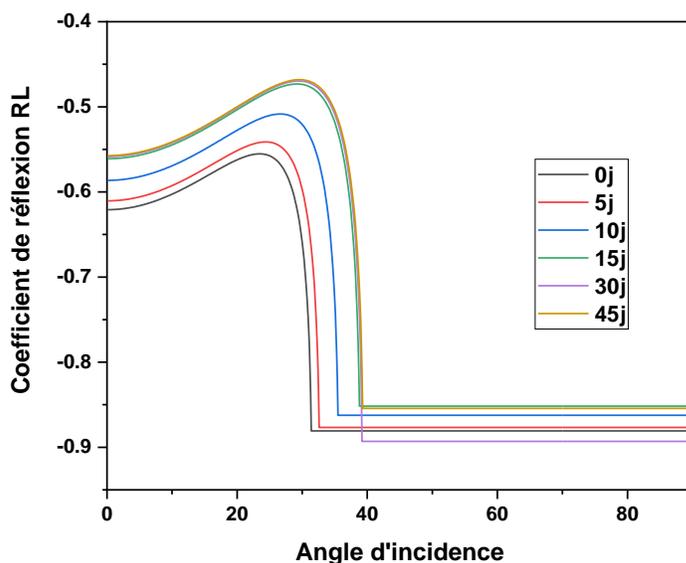


**Figure IV.14 :** Variation du coefficient TT en fonction d'âge (l'interface BHP/Acier)

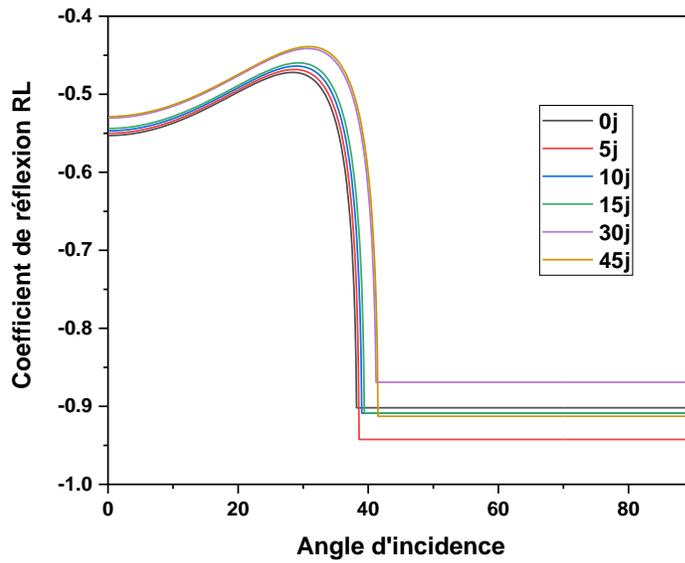
### ➤ Variation du coefficient RL:

La courbe de la figure IV.15 qui montre l'évolution du coefficient de réflexion longitudinale en fonction de l'angle d'incidence pour différents âges. Pour le cas de BS représente un rythme croissant ayant un maximum proche des 25° puis on constate une forte régression jusqu'aux 40°, et enfin la stabilité est obtenue pour un angle proche des 40°. La note qu'il faut mentionner est que l'impact de l'âge est plus considérable à partir des 30 jours. Par rapport au cas du BO et du BHP présenté dans les figures IV.16 et IV.17, l'âge a un effet moins fort que le cas du BS.

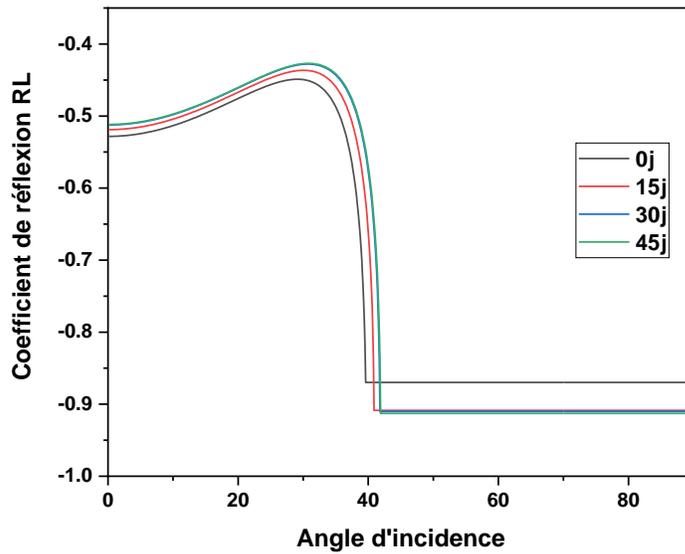
L'effet de l'avancement de l'âge pour l'intervalle 0 à 15 jours est plus remarquable dans le cas du béton de sable, ce qui explique la relation de la structure interne avec l'évolution des paramètres acoustiques.



**Figure IV.15 :** Variation du coefficient RL en fonction d'âge (l'interface BS/Acier)



**Figure IV.16 :** Variation du coefficient RL en fonction d'âge (l'interface BO/Acier)

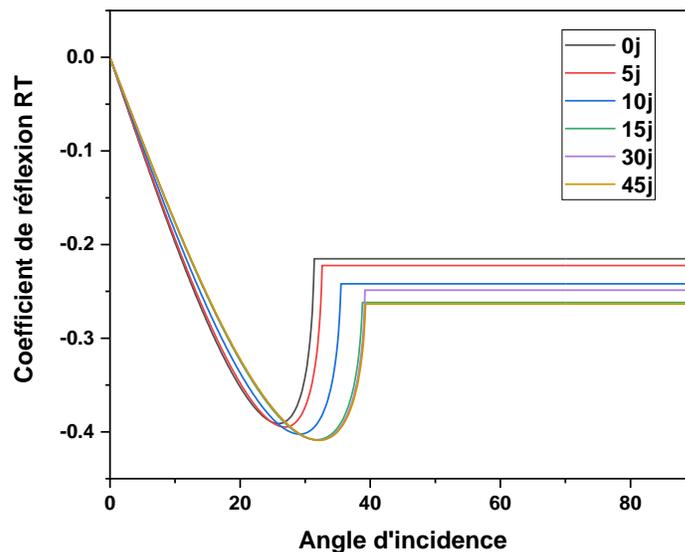


**Figure IV.17 :** Variation du coefficient RL en fonction d'âge (l'interface BHP/Acier)

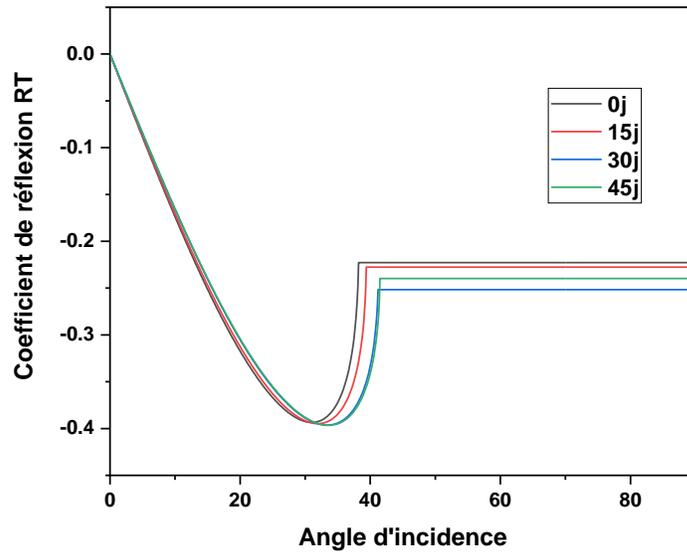
➤ **Variation du coefficient RT:**

Les résultats obtenus pour l'évolution du coefficient de réflexion transversale sont présentés dans les figures IV.18, IV.19 et IV.20 pour les cas de BS, BO et BHP respectivement. Il convient de noter que le coefficient RT part de zéro à une valeur proche de -0,4 pour des angles compris entre 0° et 25°, où il augmente jusqu'à 40° ou devient stable. Les résultats de la simulation sont similaires pour les trois interfaces d'étude avec un effet relativement important pour le cas du béton de sable.

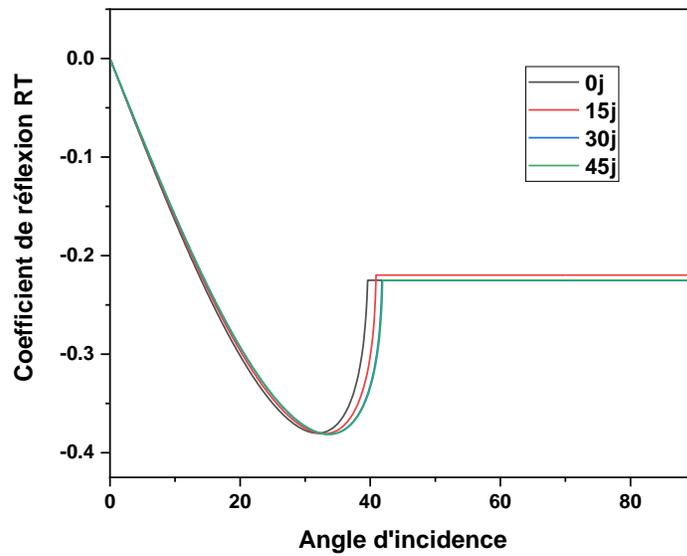
Dans ce cas, il est clair que le changement d'interface a entraîné l'augmentation de l'angle critique de 28° à 36°.



**Figure IV.18 :** Variation du coefficient RT en fonction d'âge (l'interface BS/Acier)



**Figure IV.19 :** Variation du coefficient RT en fonction d'âge (l'interface BO/Acier)



**Figure IV.20 :** Variation du coefficient RT en fonction d'âge (l'interface BHP/Acier)

## Conclusion générale

L'effet de l'âge du béton sur le comportement des ondes ultrasonores aux interfaces a été étudié expérimentalement. Une étude de simulation nous a permis de révéler l'impact de l'âge du béton sur la propagation des ondes ultrasonores à travers les interfaces.

La méthode de contrôle non destructif nous a permis de caractériser une structure multicouche composée de (béton/acier/béton).

La variation des interfaces en changeant le type de béton nous a permis de découvrir l'effet de la structure interne sur le comportement des ondes ultrasonores ou nous avons constaté qu'elle a un effet considérable sur l'évolution des coefficients de réflexion et de transmission.

L'homogénéité du béton influence le passage de l'onde, ce qui influe directement sur les paramètres acoustiques.

L'avancement de l'âge du béton provoque l'augmentation de certains coefficients et la diminution d'autres pour différentes interfaces.

Les coefficients de réflexion et de transmission changent leur comportement à l'approche du 30ème jour, ce qui donne la possibilité d'une relation avec la maturation du béton qui atteint son état final après le 28ème jour.

Un autre paramètre influe également l'évolution des ondes ultrasonores. C'est l'orientation de l'angle d'incidence où l'on constate que l'existence des angles critiques perturbe totalement le comportement des coefficients de réflexion et de transmission.



A toute interface, les ondes réfléchies et transmises sont obtenues en écrivant les conditions limites et en utilisant des théories de continuité des déplacements et des contraintes.

L'orientation de l'angle d'incidence est un paramètre très important ou l'on note que dans certains intervalles d'angles, certaines ondes se dissocient.

### **Perspectives :**

Comme perspective, on peut pour les prochaines études mettre en considération la nature discontinue de l'interface ou elle doit être modélisée pour passer à un état plus réelle.

La considération de béton comme un matériau hétérogène et mettre en évidence sa structure interne réelle va donner une modélisation plus réelle au comportement des ondes ultrasonores.

## Références

- [1] Tareen, N., Kim, J., Kim, W. K., & Park, S. (2019). Comparative Analysis and Strength Estimation of Fresh Concrete Based on Ultrasonic Wave Propagation and Maturity Using Smart Temperature and PZT Sensors. *Micromachines*, 10(9), 559. <https://doi.org/10.3390/mi10090559>
- [2] Voigt, T., Sun, Z., & Shah, S. P. (2006). Comparison of ultrasonic wave reflection method and maturity method in evaluating early-age compressive strength of mortar. *Cement and Concrete Composites*, 28(4), 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.003>
- [3] Benaïcha, M., Jalbaud, O., Hafidi Alaoui, A., & Burtschell, Y. (2015). Correlation between the mechanical behavior and the ultrasonic velocity of fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 702–709. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.047>
- [4] Chung, H. W. (1978). Effects of embedded steel bars upon ultrasonic testing of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 30(102), 19–25. <https://doi.org/10.1680/mac.1978.30.102.19>
- [5] Feng, H., & Yi, W. (2017). Propagation characteristics of acoustic emission wave in reinforced concrete. *Results in Physics*, 7, 3815–3819. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.09.060>
- [6] Yu, T., Chaix, J.-F., Audibert, L., Komatitsch, D., Garnier, V., & Hénault, J.-M. (2019). Simulations of ultrasonic wave propagation in concrete based on a two-dimensional numerical model validated analytically and experimentally. *Ultrasonics*, 92, 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.07.018>
- [7] T. -T. Wu, T. -F. Lin. (1998). The Stress Effect on the Ultrasonic Velocity Variations of Concrete under Repeated Loading. *ACI Materials Journal*, 95(5). <https://doi.org/10.14359/394>

- 
- [8] S. F. Selleck, E. N. L., M. L. Peterson, S. P. Shah, & J. D. Achenbach. (1998). Ultrasonic Investigation of Concrete with Distributed Damage. *ACI Materials Journal*, 95(1). <https://doi.org/10.14359/349>
- [9] Komloš, K., Popovics, S., Nürnbergerová, T., Babál, B., & Popovics, J. S. (1996). Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards. *Cement and Concrete Composites*, 18(5), 357–364. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(96\)00026-1](https://doi.org/10.1016/0958-9465(96)00026-1)
- [10] Graveen, C., Weiss, J., Jan, O. L. E. K., & Nantung, T. (2003). Implications of maturity and ultrasonic wave speed measurements in QC/QA for concrete. In *Brittle Matrix Composites 7* (pp. 379-388). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857093103.379>
- [11] Gimet, N., Fargeot, D., Gaillard, J. M., Smith, A., Gault, C., & Bonnet, J. P. (1999). Ultrasonic assessment of Portland cement at the early stages of hydration. *Journal of materials science letters*, 18(16), 1335-1337. <https://doi.org/10.1023/A:1006630215606>
- [12] Sun, H., & Zhu, J. (2020). Nondestructive evaluation of steel-concrete composite structure using high-frequency ultrasonic guided wave. *Ultrasonics*, 103, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106096>
- [13] Trtnik, G., & Gams, M. (2014). Recent advances of ultrasonic testing of cement based materials at early ages. *Ultrasonics*, 54(1), 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.07.010>
- [14] Pelletier, J. L., J.-C. Caron, Bocquet, M., & Le Tohic, Y. (1979). La pratique du contrôle industriel par ultra-sons.
- [15] Malhotra, V. M. (Ed.). (2004). *Handbook on nondestructive testing of concrete* (2. ed). CRC Press.

- 
- [16] Davis, A. G., Ansari, F., Gaynor, R. D., Lozen, K. M., Rowe, T. J., Caratin, H., ... & Sansalone, M. J. (1998). Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures. American Concrete Institute, ACI, 228.
- [17] Hornibrook, F. B. (1939). Application of sonic method to freezing and thawing studies of concrete. *ASTM Bull*, 101(5).
- [18] Powers, T. C. (1938). Measuring Young's modulus of elasticity by means of sonic vibrations. In *Proceedings* (Vol. 38, No. Part II, p. 460). American Society for Testing and Materials..
- [19] Obert, L. (1939). Sonic method of determining the modulus of elasticity of building materials under pressure. In *Proc. ASTM* (Vol. 39, p. 987).
- [20] Cheesman, W. J., & Arndt, W. J. (1950). Dynamic testing of concrete with the soniscope apparatus. In *Highway Research Board Proceedings* (Vol. 29).
- [21] Jones, R. (1949). The non-destructive testing of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 1(2), 67-78. <https://doi.org/10.1680/mac.1949.1.2.67>
- [22] M. F. Kaplan. (1958). Compressive Strength and Ultrasonic Pulse Velocity Relationships for Concrete in Columns. *ACI Journal Proceedings*, 54(2). <https://doi.org/10.14359/11462>
- [23] Kaplan, M. F. (1959). The effects of age and water/cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 11(32), 85-92. <https://doi.org/10.1680/mac.1959.11.32.85>
- [24] David A. Anderson and Roger K. Seals. (1981). Pulse Velocity as a Predictor of 28- and 90-Day Strength. *ACI Journal Proceedings*, 78(2). <https://doi.org/10.14359/6929>

- 
- [25] H. W. Chung & K. S. Law. (1983). Diagnosing in Situ Concrete by ultrasonic Pulse Technique. *Concrete International*, 5(10).
- [26] Keating, J., Hannant, D. J., & Hibbert, A. P. (1989). Correlation between cube strength, ultrasonic pulse velocity and volume change for oil well cement slurries. *Cement and Concrete Research*, 19(5), 715-726. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(89\)90042-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(89)90042-2)
- [27] Malhotra, V. M. (1976). Testing hardened concrete: nondestructive methods.
- [28] Concrete, A. C. 228-N. T. of. (2003). In-place methods to estimate concrete strength.
- [29] Bullock, R. E., & Whitehurst, E. A. (1959). Effect of certain variables on pulse velocities through concrete. *Highway Research Board Bulletin*, (206).
- [30] C597-02, A. (2002). Standard test method for pulse velocity through concrete. *Annual Book of American Society of Testing and Materials*, 04-02.
- [31] Ndt, R. R. (1972). Testing of concrete by the ultrasonic pulse method. *Mater. Struct*, 12.
- [32] Popovics, S., & Popovics, J. S. (1991). Effect of stresses on the ultrasonic pulse velocity in concrete. *Materials and Structures*, 24(1), 15-23. <https://doi.org/10.1007/BF02472676>
- [33] T. -T. Wu & T. -F. Lin. (1998). The Stress Effect on the Ultrasonic Velocity Variations of Concrete under Repeated Loading. *ACI Materials Journal*, 95(5). <https://doi.org/10.14359/394>
- [34] Chung, H. W. (1978). Effects of embedded steel bars upon ultrasonic testing of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 30(102), 19-25. <https://doi.org/10.1680/mac.1978.30.102.19>

- 
- [35] Jones, R., & Façaoaru, I. (1969). Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method. *Matériaux et constructions*, 2(4), 275-284. <https://doi.org/10.1007/BF02475162>
- [36] Der Winden, V., & Brant, A. W. (1977). Ultrasonic testing for fresh mixes. *Concrete*, 11(12).
- [37] Andrea B. (1998). On the Ultrasonic Pulse Propagation into Fire Damaged Concrete. *ACI Structural Journal*, 95(3). <https://doi.org/10.14359/544>
- [38] Neville, A. M. (1963). A study of deterioration of structural concrete made with high-alumina cement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 25(3), 287-324. <https://doi.org/10.1680/iicep.1963.10591>
- [39] Bungey, J. H. (1991). Ultrasonic testing to identify alkali-silica reaction in concrete. *British Journal Of Non-Destructive Testing*, 33(5), 227-231.
- [40] Popovics, J. S., & Subramaniam, K. V. L. (2015). Review of Ultrasonic Wave Reflection Applied to Early-Age Concrete and Cementitious Materials. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 34(1), 267. <https://doi.org/10.1007/s10921-014-0267-3>
- [41] L. I. Knab, G. V. B., & J. R. Clifton. (1983). Laboratory Evaluation of Ultrasonics for Crack Detection in Concrete. *ACI Journal Proceedings*, 80(1). <https://doi.org/10.14359/10458>
- [42] Breuning, S. M., & Bone, A. J. (1954). Soniscope applied to maintenance of concrete structures. In *Highway Research Board Proceedings (Vol. 33)*.
- [43] Gay D,(1997). *Matériaux composites*, edition Hermès.
- [44] Whitehurst, E. A. (1951, January). Use of the soniscope for measuring setting time of concrete. In *proceedings-american society for testing and materials (vol. 51, pp. 1166-1183)*.

- 
- [45] Jones, R. (1952). A method of studying the formation of cracks in a material subjected to stress. *British Journal of Applied Physics*, 3(7), 229. <https://doi:10.1088/0508-3443/3/7/306>
- [46] Jones, R. (1953). Testing of concrete by ultrasonic-pulse technique. In *Highway Research Board Proceedings* (Vol. 32).
- [47] Jamal Rhazi, Y. K., Gerard Ballivy, & Michel Rivest. (1997). Application of Acoustical Imaging to the Evaluation of Concrete in Operating Structures. *ACI Symposium Publication*, 168. <https://doi.org/10.14359/5941>
- [48] J.H. Bungey. (1984). The Influence of Reinforcement on Ultrasonic Pulse Velocity Testing. *ACI Symposium Publication*, 82. <https://doi.org/10.14359/6557>
- [49] Qixian, L., & Bungey, J. H. (1996). Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete. *Construction and building materials*, 10(4), 237-242. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(96\)00003-7](https://doi.org/10.1016/0950-0618(96)00003-7)
- [50] Komlos, K., Popovics, S., Nürnbergerová, T., Babal, B., & Popovics, J. S. (1996). Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards. *Cement and Concrete Composites*, 18(5), 357-364. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(96\)00026-1](https://doi.org/10.1016/0958-9465(96)00026-1)
- [51] R.N. Swamy & A.H. Al-Hamed. (1984). The Use of Pulse Velocity Measurements to Estimate Strength of Air-Dried Cubes and Hence In Situ Strength of Concrete. *ACI Symposium Publication*, 82. <https://doi.org/10.14359/6558>
- [52] M.P. Rebic. (1984). The Distribution of Critical and Rupture Loads and Determination of the Factor of Crackability. *ACI Symposium Publication*, 82. <https://doi.org/10.14359/6582>

- 
- [53] Kennett, B. L. N. (1984). Guided wave propagation in laterally varying media—I. Theoretical development. *Geophysical Journal International*, 79(1), 235–255. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1984.tb02853.x>
- [54] Dieulesaint, E., & Royer, D.(1974). *Ondes élastiques dans les solides*, Masson et Cie., Paris  
1. Elastic waves in solids.
- [55] John C, Lord C & Cranfield T.F. (1999). *Strength of Materials and Structures*. Ed Arnold-London
- [56] Jean C.C. (2007). *Mécanique du solide et des matériaux*. Ed ESPCI
- [57] Landau.L & E. Lifchitz. (1990). *Théorie de l'élasticité*. Ed MIR.
- [58] Denis D. (1995). *Elasticité linéaire*. Ed Cépaduès.
- [59] Hearn E.J. (1997). *Mechanics of materials*. Ed Butterworth-Heinemann
- [60] Saeid H. (2018). *Design optimisation and validation of phononic crystal plates for manipulation of elastodynamic guided waves*. Springer International Publishing
- [61] Truesdell C. (1984). *Mechanics of solids*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH
- [62] Robert G. (1983). *Elastic wave propagation in transversely isotropic media*. Springer Netherlands.
- [63] Dreux, G., & Festa, J. (1995). *Nouveau guide du béton et de ses constituants*.
- [64] Sablocrete. (1994). *Bétons de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation [Sand concrete, characteristics and use practices]*. Ed Dunod
- [65] Bathias, C., & Wolff, C. (2013). *Matériaux composites*. Dunod.



[66] Weiss, J., & Bord, C. (1983). Les matériaux composites. T. 1. Structure, constituants, fabrication t. 2. Calculs, essais et contrôles, conception. Usine nouvelle.

[67] Berthelot, J. M. (1999). Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures. &, 245, 172.