

Université 20 Août 1955-Skikda

Faculté de Technologie

Département : Génie Civil

Ref :D012121032D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم : الهندسة المدنية

المرجع : D012121032D

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de  
**Doctorat en sciences**

**En Génie Civil**

**Option : Matériaux**

**Les incertitudes des essais non destructifs des structures en  
béton (essais ultrasoniques et sclérométriques)**

Présentée par : **FRIHI Nacera Née KHALDI**

Soutenue publiquement le : 25 Février 2021

**Devant le jury composé de :**

Pr. HEBHOUB Houria	(Présidente)	Université 20 Aout 1955	Skikda
Pr. BELACHIA Mouloud	(Rapporteur)	Université 8 mai 1945	Guelma
Pr. BENOUIS Abdelhalim	(Co-rapporteur)	Université 8 mai 1945	Guelma
Pr. MERZOUD Mouloud	(Examineur)	Université Badji Mokhtar	Annaba
Dr. BENSEBTI Salaheddine	(Examineur)	Université Constantine 1	Constantine
Dr. KHERRAF Leila	(Examinatrice)	Université 20 Aout 1955	Skikda

# Remerciements

Avant tout, je remercie « Dieu » le tout puissant.

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont participé au bon déroulement de mon travail, et qui m'ont permis de réaliser cette thèse.

Je témoigne donc toute ma reconnaissance :

- À Mes deux directeurs de thèse : le professeur **BELACHIA Mouloud** et le professeur **BENOUIS Abdelhalim** qui ont consacré leur précieux temps pour m'aider à réaliser ce modeste travail et qui se sont toujours rendus disponibles pour me renseigner et ont contribué à l'avancement du travail.

- À Messieurs le directeur et l'ex-directeur du Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique de l'université 8 mai 1945 Guelma les professeurs **NOUAOURIA Mohamed Salah** et **GUENFOUD Mohamed** qui m'ont accueilli au sein du laboratoire.

- Aux membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce travail, qu'ils trouvent ici ma sincère et profonde gratitude. A M<sup>me</sup> la présidente du Jury : le professeur **HEBHOUB Houria** qui m'a honoré et a accepté de présider mon jury de thèse.

Je remercie également le professeur **MERZOUZ Mouloud**, le docteur **BENSEBTI Salaheddine** et le docteur **KHERRAF Leila** qui ont accepté la lourde tâche d'expertiser mon travail, je vous exprime toute ma gratitude et vous me faites un grand honneur en acceptant de juger mon travail

- Je remercie également le docteur **BOUTELDJA Fathe**, maître de conférences au sein de l'université 8 Mai 1945 qui n'a pas hésité à m'aider dans la réalisation des essais.

- Je remercie aussi le professeur **ROUIAGUIA Ammar** de l'université 8 Mai 1945 qui m'a aidé à la rédaction de mes articles.

- Un grand merci à **M. SAIDIA Mahmoud**, qui m'a aidé lui aussi à la traduction d'articles.

## *D*édicace

Je dédie ce modeste travail :

- À mon père, ma source de tendresse et mon premier exemple dans la vie.

- À la deuxième source de tendresse ma mère.

- À mon mari **Salim**.

- À mes quatre filles : **Aya, Nada, Yasmine et Menna**.

- À mes frères, mes sœurs, mes beaux frères et mes belles sœurs.

- À ma défunte belle mère ; paix à son âme.

- À tonton Moustafa.

- À toute ma famille.

- À mes amies : **Meriem, Nedjla, Saida, Assia, Chiraz, Ghania, Sonia et Fatima**, pour leur soutien et aide surtout pendant les moments difficiles ainsi qu'à tous mes collègues de travail à l'université de Guelma.

- À tous ceux qui ont participé à ma formation.

**N**ACERA

## **Résumé**

L'évaluation par des méthodes non destructives des propriétés du béton dans des structures existantes est basée sur des relations empiriques entre les propriétés et les paramètres non destructifs. Les méthodes d'essais les plus généralement utilisées sont les essais ultrasoniques et les essais sclérométriques (marteau de Schmidt).

Ces deux méthodes non destructives ont été utilisées dans notre étude pour évaluer les propriétés de deux aspects différents des bétons et mortiers.

La vitesse ultrasonique et le rebond du scléromètre ont été utilisés pour estimer la résistance du béton à travers des corrélations aux essais destructifs. L'autre aspect de l'étude est l'estimation de la force d'adhérence du mortier à son support. Aussi dans ce cas des corrélations ont été avancées entre la seule vitesse ultrasonique des ondes de surface et la force d'arrachement déterminée destructivement.

La discussion des incertitudes de ces relations a été réalisée à travers la variation des paramètres influençant les propriétés mesurées (composition et forme des éprouvettes de béton et nature et épaisseur du mortier, fréquences et espacement des transducteurs)

***MOTS-CLÉS:*** Béton, mortier, résistance, adhérence, vitesse ultrasonique, rebond, incertitudes.

## **Abstract**

The evaluation of concrete properties by non-destructive methods in existing structures is based on empirical relations between their properties and non-destructive parameters. The most commonly used testing methods are ultrasonic testing and sclerometric testing (Schmidt hammer).

These two non-destructive methods were used in our study to evaluate the properties of two different aspects of concrete and mortars.

Ultrasonic speed and hammer rebound were used to estimate concrete strength through destructive test correlations. The second aspect of this study is the estimation of adhesion force of the mortar to its support. Also in this case, correlations have been put forward between the only ultrasonic speed of the surface waves and the pulling force determined destructively.

The discussion of the uncertainties of these correlation was carried out through the variation of the parameters influencing the measured properties (composition, shape of the concrete specimens, nature, thickness of the mortar, frequencies and spacing of the transducers)

**KEY-WORDS:** *Concrete, mortar, strength, adhesion, ultrasonic velocity, rebound, uncertainties.*

## ملخص

يعتمد التقييم غير المدمر لخصائص الخرسانة في الهياكل القائمة على العلاقات التجريبية بين الخصائص والمعايير غير المدمرة. إن طرق الاختبار الأكثر شيوعاً هي الاختبار بالموجات فوق الصوتية والاختبار المتصلب (مطرقة شميدت )

تم استخدام هاتين الطريقتين غير المدمرتين في دراستنا لتقييم خصائص جانبيين مختلفين من الخرسانة والملاط.

تم استخدام سرعة الموجات فوق الصوتية وارتداد المطرقة، لتقدير قوة الخرسانة من خلال علاقات الاختبار المدمرة. الجانب الآخر من الدراسة هو تقدير قوة التصاق الملاط مع دعامة. في هذه الحالة أيضاً ، تم طرح الارتباطات بين سرعة الموجات فوق الصوتية الوحيدة للموجات السطحية وقوة الانسحاب المحددة بشكل مدمر

تمت مناقشة أوجه عدم اليقين في هذه العلاقات من خلال اختلاف المعلمات التي تؤثر على الخصائص المقاسة (تكوين وشكل العينات الخرسانية ، طبيعة وسمك الهاون ، الترددات والتباعد بين المحولات)

**الكلمات الرئيسية:** الخرسانة ، الملاط ، القوة ، الالتصاق ، السرعة فوق الصوتية ، الارتداد،  
الارتباب

# *Sommaire*

# *SOMMAIRE*

i

## **Introduction générale**

### **Chapitre I : Etude bibliographique**

1.1	Introduction	1
1.2	Notions générales sur les bétons et les mortiers	1
	I.2.1 Béton	1
	I.2.1.1 Résistance	1
	I.2.1.2 Rapport E/C	2
	I.2.1.3 Dosage en ciment	2
	I.2.1.4 Dosage des granulats	2
	I.2.1.5 Dosage de l'eau et plasticité	3
	I.2.1.6 Porosité	3
	I.2.2. Le mortier	4
	I.2.2.1. Les composants du mortier	4
	I.2.2.2. Le dosage du mortier	4
	I.2.2.3. Les types de mortiers	4
	I.2.2.3.1. Les mortiers de ciment	5
	I.2.2.3.2. Les mortiers de chaux	5
	I.2.2.3.3. Les mortiers bâtards	5
	I.2.2.3.4. Mortiers de chantier	5
	I.2.2.3.4.1. Mortier colle	5
	I.2.2.3.4.2. Les mortiers fabriqués sur chantier	6
	I.2.2.3.4.3. Les mortiers industriels secs pré-mélangés	6
	I.2.2.3.4.4. Les mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi	6
I.3	L'adhérence des mortiers	7
	I.3.1 Introduction	7
	I.3.2 Notion d'adhérence	7
	I.3.3 Le support	7
	I.3.3.1 Les type de supports	7
	I.3.3.1.1 Support en brique	7
	I.3.3.1.2 Support en parpaing	8
	I.3.3.1.3 Support en béton	8
	I.3.3.2 La préparation du support	9

I.3.3.3	Création du Lien entre mortier et support	9
I.3.3.4	Impact de la rugosité du support	10
I.3.3.5	Développement des propriétés mécaniques	10
I.4	Notions d'excitation et de propagation des sons et des ultrasons	10
I.4.1	Son	10
I.4.1.1	Vitesse du son	11
I.4.1.2	Réfraction, réflexion et interférence	12
I.4.2	Ultrasons	12
I.4.2.1	Production et détection	12
I.4.2.2	Applications	13
I.4.3	Utilisation des ultra-sons	13
I.4.3.1	Mesure des constantes élasto-dynamiques	14
I.4.3.2	Détermination de la résistance du béton	16
I.5	La dureté et les essais sclérométriques du béton	18
I.5.1	Mesure de la dureté par rebondissement	18
I.6	Conclusion	20

## **Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales**

II.1	Introduction	22
II.2	Caractéristiques des matériaux utilisés	22
II.2.1	Matériaux utilisés	22
II.2.1.1	Caractéristiques physiques des graviers	22
II.2.1.2	Caractéristiques mécaniques des graviers	23
II.2.1.3	Les caractéristiques chimiques des graviers	24
II.2.1.4	Caractéristiques du sable	24
II.2.1.5	Caractéristiques physiques du ciment	24
II. 2.1.6	Eau de gâchage	25
II. 2.1.7	Caractéristiques des matériaux utilisés pour l'adhérence des mortiers	25
II.2.1.7.1.	Mortier industriel (prêt à l'emploi)	25
II.2.1.7.2.	Mortier préparé	26

II.3	Compositions et corps d'épreuve	27
II. 3.1.	Résistance des bétons	27
II.3.1.1	Compositions des bétons	27
II. 3.2.	Adhérence des mortiers	28
II.3.2.1.	Supports	28
a)	Parpaing	28
b)	Poutrelle en béton	28
II.3.2.2.	Revêtement des supports	29
II. 3.2.3.	La résine époxyde	30
II.4	Méthodologie des essais	31
II.4.1	Auscultation dynamique par les ultrasons	31
II.4.1.1.	Positionnement des transducteurs et temps de parcours	32
II.4.1.2	Auscultation ultrasonique pour la résistance des bétons	34
II.4.1.3	Auscultation ultrasonique pour l'adhérence des mortiers	35
II.4.2	Méthode sclérométrique (Résistance en compression)	36
II.4.2.1.	Utilisation du scléromètre	37
II.4.3	Méthode destructive par écrasement (Résistance en compression)	37
II.4.4	Méthode destructive par arrachement (adhérence des mortiers)	38
II.5	Conclusion	40

## **Chapitre III : Estimation de la résistance des bétons par les essais ultrasoniques et sclérométriques**

III.1	Introduction	42
III.2	Evolution des vitesses des ondes ultrasoniques	42
III .2.1	Effet du type de béton	42
III.2.2	Effet de l'âge des bétons	46
III.2.3	Effet du type des transducteurs (fréquences et diamètres)	48
III.2.4	Effet de la distance du parcours des ondes ultrasoniques	50
III.3	Evolution de la résistance sclérométriques	53
III.3.1	Effet du type de béton	53
III.3.2	Effet de l'âge des bétons	54
III.3. 3	Effet du type de l'éprouvette	55
III.4	Evolution des résistances par écrasement	57
III.4.1	Effet du type de béton	57

III.4.2	Effet de l'âge des bétons	58
III.4.3	Effet du type de l'éprouvette	59
III.5	Corrélations entre les vitesses ultrasoniques et les résistances	61
III.5.1	Effet du type de l'éprouvette (parcours de l'onde)	61
III.5.2	Effet du type de transducteurs et de la composition des bétons	65
III.5.3	Conclusion	69
III.6	Corrélations entre les résistances sclérométriques et par écrasement	70
III.7	Conclusion	71

## **Chapitre IV : Estimation de l'adhérence des mortiers par la vitesse ultrasonique**

IV.1	Introduction	72
IV.2	Désignation des mortiers et supports	73
IV.3	Evolution des vitesses ultrasoniques	73
IV.4	Evolution de l'adhérence	77
IV.5	Corrélation entre les vitesses ultrasoniques et les forces d'adhérence	80
IV.6	Conclusion	84

### **Conclusion générale** 85

### **Références bibliographiques** 87

# *Liste des figures*

## **LISTE DES FIGURES**

<b>Figure I.1</b>	Fixation du carrelage par le mortier colle	6
<b>Figure I.2</b>	Support en brique	8
<b>Figure I.3</b>	Support en parpaing	8
<b>Figure I.4</b>	Support en béton	9
<b>Figure I.5</b>	Evaluation non destructive par ultrasons	14
<b>Figure I.6</b>	Principe du scléromètre	19
<b>Figure I.7</b>	Scléromètres analogique (a) et digital (b)	19
<b>Figure II.1</b>	Photo du mortier prêt à l'emploi	26
<b>Figure II.2</b>	Eprouvettes en béton de différentes formes	27
<b>Figure II.3</b>	Le parpaing utilisé	28
<b>Figure II.4</b>	Les poutrelles en béton.	28
<b>Figure II.5</b>	Photos des supports revêtus par une couche de mortier de ciment	29
<b>Figure II.6</b>	Photos des supports revêtus par une couche de mortier prêt à l'emploi	29
<b>Figure II.7</b>	Photo de la résine époxyde	30
<b>Figure II.8</b>	Appareillage ultrasonique	31
<b>Figure II.9</b>	Types de propagation d'ondes	32
<b>Figure II.10</b>	Vitesse de propagation déterminée en transmission indirecte ou de surface.	33
<b>Figure II.11</b>	Les différents transducteurs	34
<b>Figure II.12</b>	Essais ultrasoniques sur éprouvettes prismatiques	35
<b>Figure II.13</b>	Photo des essais ultrasoniques sur le revêtement par le mortier de ciment	35
<b>Figure II.14</b>	Photos des essais ultrasoniques sur revêtement par le mortier prêt à l'emploi	36
<b>Figure II.15</b>	Appareillage sclérométrique	36
<b>Figure II.16</b>	Utilisation du scléromètre	37
<b>Figure II.17</b>	La presse de compression	38
<b>Figure II.18</b>	Photo du dynamomètre de traction	39
<b>Figure II.19</b>	Photo de l'essai d'arrachement	39
<b>Figure II.20</b>	Photos des ruptures lors des essais destructifs (arrachement) sur le mortier de ciment	40
<b>Figure II.21</b>	Photos des ruptures lors des essais destructifs (arrachement) sur le mortier prêt à l'emploi	40
<b>Figure III.1</b>	Evolution des vitesses ultrasoniques de différents bétons - transducteurs A -	44
<b>Figure III.2</b>	Evolution des vitesses ultrasoniques de différents bétons - transducteurs B	44

<b>Figure III.3</b>	Evolution des vitesses ultrasoniques de différents bétons - transducteurs C	45
<b>Figure III.4</b>	Evolution des vitesses ultrasoniques de différents bétons - transducteurs B'	45
<b>Figure III.5</b>	Evolution des vitesses ultrasoniques de différents bétons –Parcours 2.5 cm	47
<b>Figure III.6</b>	Evolution des vitesses ultrasoniques de différents bétons –Parcours 7 cm	47
<b>Figure III.7</b>	Evolution des vitesses ultrasoniques de différents bétons –Parcours 16 cm	48
<b>Figure III.8</b>	Effet du type des transducteurs sur l'évolution des vitesses ultrasoniques – béton B1 -	49
<b>Figure III.9</b>	Effet du type des transducteurs sur l'évolution des vitesses ultrasoniques – béton B2 -	50
<b>Figure III.10</b>	Effet du parcours des ondes sur l'évolution des vitesses ultrasoniques – béton B1 -	52
<b>Figure III.11</b>	Effet du parcours des ondes sur l'évolution des vitesses ultrasoniques – béton B2 -	52
<b>Figure III.12</b>	Evolution des résistances sclérométriques des différentes éprouvettes des bétons	54
<b>Figure III.13</b>	Effet de l'âge des éprouvettes sur l'évolution des résistances sclérométriques des différents bétons	55
<b>Figure III.14</b>	Effet du type d'éprouvette sur l'évolution des résistances sclérométriques - béton –B1-	56
<b>Figure III.15</b>	Effet du type d'éprouvette sur l'évolution des résistances sclérométriques - béton –B2-	56
<b>Figure III.16</b>	Evolution des résistances par écrasement des différentes éprouvettes des bétons.	58
<b>Figure III.17</b>	Effet de l'âge des éprouvettes sur l'évolution des résistances par écrasement des différents bétons	59
<b>Figure III.18</b>	Effet du type d'éprouvette sur l'évolution des résistances par écrasement - béton –B1-	59
<b>Figure III.19</b>	Effet du type d'éprouvette sur l'évolution des résistances par écrasement -béton – B2-	60
<b>Figure III.20</b>	Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - Parcours D1- Transducteurs A, B, C et B'	62
<b>Figure III.21</b>	Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des	62

	différents bétons - Parcours D1- Transducteurs A, B, et C	
<b>Figure III.22</b>	Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - Parcours D2- Transducteurs A, B, C et B'	63
<b>Figure III.23</b>	Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - Parcours D2- Transducteurs A, B et C	63
<b>Figure III.24</b>	Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - Parcours D3- Transducteurs A, B et C et B'	64
<b>Figure III.25</b>	Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - Parcours D3- Transducteurs A, B et C	64
<b>Figure III.26(a)</b>	Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - Transducteurs A –	66
<b>Figure III.26(b)</b>	Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression pour chaque béton (Transducteurs « A », Parcours 2 et 3)	66
<b>Figure III.27(a)</b>	Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - Transducteurs B –	67
<b>Figure III.27(b)</b>	Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression pour chaque béton (Transducteurs « B », Parcours 2 et 3)	67
<b>Figure III.28(a)</b>	Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - Transducteurs C –	68
<b>Figure III.28(b)</b>	Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression pour chaque béton (Transducteurs « C », Parcours 2 et 3)	68
<b>Figure III.29(a)</b>	Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents béton - Transducteurs B' –	69
<b>Figure III.29(b)</b>	Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression pour chaque béton (Transducteurs « B' », Parcours 2 et 3)	69
<b>Figure III.30</b>	Corrélations entre les résistances à la compression par scléromètre et par écrasement (éprouvettes type 1, 2 et 3)	70
<b>Figure III.31</b>	Corrélations entre les résistances à la compression par scléromètre et par écrasement (éprouvettes type 2 et 3)	71
<b>Figure IV.1</b>	Essais ultrasoniques du mortier prêt à l'emploi sur support en béton	75
<b>Figure IV.2</b>	Effet de l'épaisseur sur les vitesses moyennes des différents mortiers	76
<b>Figure IV.3</b>	Essais d'arrachement du mortier industriel sur support en béton	77

<b>Figure IV.4</b>	Effet de l'épaisseur sur les forces d'arrachement moyennes des différents mortiers	79
<b>Figure IV.5</b>	Relations entre les vitesses ultrasoniques et les forces d'arrachement (support en béton)	81
<b>Figure IV.6</b>	Relations entre les vitesses ultrasoniques et les forces d'arrachement (support en parpaing)	81
<b>Figure IV.7</b>	Relations entre les vitesses ultrasoniques et les forces d'arrachement (mortier industriel)	82
<b>Figure IV.8</b>	Corrélations entre les vitesses et les forces d'arrachement (support en béton)	83
<b>Figure IV.9</b>	Corrélations entre les vitesses et les forces d'arrachement (support en parpaing)	83

# *Liste des Tableaux*

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau I.1</b>	Dosages des mortiers selon l'utilisation	4
<b>Tableau I.2</b>	Valeurs des constantes élasto-dynamiques de quelques matériaux usuels	16
<b>Tableau II.1</b>	Caractéristiques physiques des graviers	22
<b>Tableau II.2</b>	Caractéristiques mécaniques des graviers	23
<b>Tableau II.3</b>	Compositions chimiques des graviers	24
<b>Tableau II.4</b>	Caractéristiques du sable	24
<b>Tableau II.5</b>	Caractéristiques physiques du ciment	24
<b>Tableau II.6</b>	Composition des bétons	27
<b>Tableau II.7</b>	propriétés mécaniques de la résine	30
<b>Tableau II.8</b>	Les différents types de transducteurs	34
<b>Tableau III.1</b>	Vitesses ultrasoniques des différents bétons	43
<b>Tableau III.2</b>	Résistances sclérométriques des différents bétons	53
<b>Tableau III.3</b>	Résistances à la compression par écrasement des différents bétons	57
<b>Tableau IV.1</b>	Vitesses ultrasoniques des mortiers sur différents supports	74
<b>Tableau IV.2</b>	Forces d'arrachement des mortiers sur différents supports	78

# NOTATIONS

$f_{cj}$	[MPa]	Résistance en compression à j jours
$f_{c28}$	[MPa]	Résistance en compression à 28 jours
$E_s$	[MPa]	Module élastique statique
$E_d$	[MPa]	Module élastique dynamique
$G_d$	[MPa]	Module d'élasticité transversale dynamique
$V_T$	[m/s]	Vitesse de propagation des ondes transversales
$V_L$	[m/s]	Vitesse de propagation des ondes longitudinales
$V$	[m/s]	Vitesse de propagation
$\gamma$	[Kg/m <sup>3</sup> ]	Masse volumique
$\lambda$	[Hz]	Fréquence des ultrasons
$L$	[ mm ]	Longueur de parcours
$T$	[ $\mu$ s ]	Temps de propagation
$R$	[MPa]	Résistance du béton
$C$	[% ]	Compacité
$v_{pu}$	[ m/s ]	Vitesse de propagation ultrasonique
$E/C$	[ - ]	Rapport Eau/Ciment
$S/S+G$	[ - ]	Rapport Sable/Granulats
$\mu_d$	[ - ]	Coefficient de Poisson dynamique
$\mu_s$	[ - ]	Coefficient de Poisson statique
$E.S.V$	[ - ]	Equivalent de sable visuel
$E.S.P$	[ - ]	Equivalent de sable Piston
$M_f$	[ - ]	Module de finesse
$L_A$	[ - ]	Coefficient de Los Angeles
$MD$	[ - ]	Coefficient de Micro Deval

# *Introduction générale*

## Introduction générale

Le béton est aujourd'hui le matériau le plus largement utilisé depuis plus d'un siècle, aussi bien dans le génie civil que dans le bâtiment, plus que tous les autres matériaux réunis. A la fois robuste et universel; il est au début d'une profonde mutation : l'ampleur et l'étendue de ses performances mécaniques et physiques augmentent sans cesse.

Cependant le béton peut se dégrader sous l'influence de causes liées à sa qualité ou à des sollicitations d'exploitation ou d'environnement [Hannachi , 2015].

Donc d'une manière générale les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, notamment lors de la confection du béton et lors de sa mise en œuvre.

En effet, des désordres liés à l'homogénéité surviennent lors de la phase confection, il est constaté que pour cette tâche, d'une part, le personnel affecté est non qualifié, et d'autre part, les soins adéquats ne sont pas apportés aux choix judicieux des matériaux de base constituants le béton.

Aussi lors de la mise en œuvre, plusieurs paramètres liés à la qualité sont également concernés en raison du non respect des règles élémentaires de mise en œuvre.

Compte tenu de ce qui a été précité, très souvent, des doutes sont émis sur la qualité des bétons mis en œuvre. Ces doutes mèneront généralement vers un contrôle sur les ouvrages réalisés.

Traditionnellement ; la méthode normalisée utilisée, pour évaluer la qualité du béton dans les ouvrages en béton comprend, les essais de résistance à la compression, effectués sur des éprouvettes coulées au même moment. Mais cette méthode a beaucoup d'inconvénients qui proviennent du fait que :

- les résultats ne sont pas immédiatement disponibles,
- le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage, les conditions de cure ou le compactage peuvent être différents,
- les propriétés de résistance d'une éprouvette dépendent de sa grosseur et de sa forme.

Plusieurs méthodes de contrôle peuvent être envisagées, parmi les quelles on peut citer les plus couramment utilisées à savoir :

- Les méthodes de contrôle destructif.
- Les méthodes de contrôle non destructif.

La première méthode est généralement évitée car elle présente divers inconvénients, d'une part, par sa nature destructive, et d'autre part, les éprouvettes et les carottes ne sont pas tout à fait représentatives du béton de structure correspondante.

Les méthodes non destructives sont basées sur le fait que certaines propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des moyens non destructifs.

Etant donné la variabilité des paramètres influençant ces propriétés, l'estimation de ces derniers par des paramètres non destructifs peuvent présenter certaines incertitudes.

Deux techniques couramment utilisées en génie civil font l'objet de notre étude à travers deux aspects des structures en béton. Ces deux techniques sont l'utilisation des vitesses ultrasoniques et le rebond du scléromètre. Ces deux techniques sont utilisées pour l'estimation de la résistance à la compression du béton ainsi que l'adhérence des mortiers sur divers supports. Cette estimation est confrontée dans les deux cas à l'évaluation destructive (écrasement et arrachement).

**L'objectif** de cette étude est donc:

- De mieux comprendre les relations entre les deux techniques non destructive et destructive pour l'évaluation des propriétés souhaitées,
- D'évaluer l'effet de divers paramètres de composition des bétons et mortiers, fréquences des transducteurs, ...sur l'évolution des propriétés non destructives (vitesse ultrasonique, indice de rebond)
- D'établir des courbes de corrélation entre les essais destructifs et les essais non destructifs pour les cas de notre étude avec les incertitudes possibles introduites par les différents paramètres précédemment cités.

La présente étude s'articule autour des chapitres suivants :

- Une introduction générale qui présente la problématique et précise le but de cette recherche.
- Le premier chapitre concerne une étude bibliographique sur les compositions et les propriétés des bétons ainsi que les paramètres influant sur l'adhérence des mortiers à leurs supports (bétons, briques, ...).

On y présente la potentialité des méthodes ultrasonores pour l'évaluation des bétons y compris les facteurs affectant la vitesse ultrasonique et les caractérisations des propriétés et dommages des bétons par cette méthode sont présentés. L'aspect dureté du matériau béton est aussi prospecté à travers les essais sclérométriques.

- Dans le deuxième chapitre, on présente dans un premier temps la caractérisation des matériaux de base pour la confection des bétons et mortiers envisagés, puis les dispositifs et techniques expérimentaux utilisés dans cette étude. Ce programme expérimental se compose des essais de caractérisation des différents bétons à l'état frais, et des essais pour la caractérisation des bétons à l'état durci. Ces derniers essais s'articulent sur des essais non destructifs (les essais ultrasoniques et sclérométriques) ensuite sur des essais destructifs (essais de compression des bétons et d'arrachement des mortiers).

Les résultats et les discussions de ces essais sont présentés dans les chapitres trois et quatre.

- Le troisième chapitre concerne les différents résultats caractérisant la résistance des bétons par les deux méthodes (non destructive et destructive). Plusieurs paramètres ont été variés pour estimer leur influence sur les résultats acquis (composition du béton, forme des éprouvettes et fréquence des transducteurs). Ces résultats sont alors commentés et discutés et des courbes de corrélations entre la vitesse des ondes ultrasoniques ou l'indice de rebondissement d'une part et la résistance du béton d'autre part sont proposées et discutées.
- Le Quatrième et le dernier chapitre est consacré à l'évaluation de l'adhérence de deux types de mortier sur deux supports différents (béton, parpaing) et avec deux épaisseurs (1 cm et 2 cm). Cette évaluation est prospectée à travers les vitesses des ondes ultrasoniques de surface dans un premier temps et puis par essais destructifs d'arrachement.
- Enfin cette thèse se termine par une conclusion générale et quelques perspectives futures à cette étude.

*Chapitre I :*  
*Etude bibliographique*

---

## Chapitre I : Etude bibliographique

### I.1 Introduction

Le béton est le matériau de construction reconstituant artificiellement la roche, composé de granulats, de sable, de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvants pour en modifier les propriétés. C'est le matériau de construction le plus utilisé au monde, que ce soit en bâtiment ou en travaux publics.

### I.2 Notions générales sur les bétons et les mortiers

L'ingénieur qui formule un béton ou un mortier, dispose de moyens efficaces pour en assurer la durabilité et la résistance vis-à-vis des environnements habituels. Il est d'ailleurs soutenu dans cette démarche par les normes, qui spécifient justement les bétons en fonction de ces environnements [Baron, 1992] [Baali, 2002].

Formuler un béton résistant, consiste à choisir la qualité et la quantité des constituants en fonction des caractéristiques de l'environnement de l'ouvrage. Alors l'objectif de qualité s'analyse en performances multiples : comportement de ces matériaux dans des conditions expérimentales particulières où l'on renforce un mécanisme de dégradation possible.

#### I.2.1 Critères généraux des bétons

Dans des études antérieures [Baron et al, 1997], les chercheurs ont essayé de modéliser ou déterminer des critères généraux, pour évaluer la durabilité du béton, ils ont conclu que plusieurs paramètres influent sur cette durabilité. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer : la résistance, le rapport E/C, le dosage en ciment, dosage des granulats, dosage de l'eau et plasticité et la porosité.

##### I.2.1.1 Résistance

La résistance aux efforts de compression est la propriété principale du béton, celle qui permet son utilisation comme matériau de construction. Il y a donc avantage, en vue de l'objectif de durabilité à choisir la classe de résistance du béton en fonction de l'agressivité du milieu.

D'un point de vue pratique, cela signifie que c'est l'exigence de durabilité qui peut, parfois, déterminer la résistance à prendre en compte dans le calcul de l'ouvrage.

On peut considérer qu'un niveau de résistance adapté au milieu environnant est un critère de qualité. En effet, tous les bétons de même résistance à la compression ne sont pas également durables [Baron, 1992].

### **I.2.1.2 Rapport E/C**

Chnuillar et Laplante mentionnent que la résistance est en relation directe avec la porosité de la pâte de ciment. Cette porosité résultant principalement de la valeur du rapport E/C, ainsi la résistance à la compression est directement liée au rapport E/C [Chnuillar et Laplante, 1997]. Il faut toutefois être prudent quant au rôle de ce paramètre sur les résistances à court terme, c'est à dire, que la résistance est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue [Aitcin et al, 1997].

### **I.2.1.3 Dosage en ciment**

Le moyen d'accroître les résistances à court terme d'un béton est d'augmenter son dosage en ciment. En effet, pour augmenter la résistance et diminuer la porosité, cela conduit à diminuer le rapport E/C, c'est à dire à augmenter le dosage en ciment. Dans les ouvrages, plus le béton sera dosé en ciment, plus l'exotherme sera importante, ce qui devrait se traduire par des gains de résistance à court terme plus importants ; c'est pour cela que le dosage en ciment est considéré comme une condition de sécurité [Chnuillar et Laplante, 1997].

Sauf justifications spéciales et accord du maître de l'œuvre, le dosage en ciment doit être compris entre 250 Kg/m<sup>3</sup> et 450 Kg/m<sup>3</sup> de béton en œuvre. Pour les ouvrages courants de béton armé, le dosage de ciment est généralement de 350 Kg/m<sup>3</sup>. Pour les ouvrages de béton armé nécessitant des qualités particulières d'étanchéité et de compacité, ainsi que pour les ouvrages de béton précontraint, ce dosage doit être de 400 à 450 Kg/m<sup>3</sup>.

Les dosages minimaux en ciment des ouvrages en béton, sont à choisir suivant les critères de résistance donnés dans les règles de conception et de calcul de ces ouvrages et suivant les critères de durabilité [D.T.R, 1991][ Tyen, 1990].

### **I.2.1.4 Dosage des granulats**

Le dosage des granulats est défini par les proportions en volume ou, de préférence en poids des différents granulats entrant dans la composition d'un mètre cube en œuvre. La détermination de ces proportions doit faire l'objet d'une étude expérimentale particulière, à moins que le constructeur ne dispose, pour des matériaux analogues utilisés dans des conditions identiques, des règles pratiques sûres confirmées par une longue expérience de ces matériaux [Vorobien, 1972][Mehta, 1986].

La proportion relative de sable et de gravier doit être telle que le béton présente une homogénéité satisfaisante, sans aucun risque de ségrégation [D.T.R, 1991][Bertrand et Piketty, 1997][Vorobien, 1972].

Il est noté que, la résistance mécanique des granulats, joue un rôle très important sur la durabilité du béton. Plus les granulats seront pleins serrés, plus ils présentent le minimum des vides

#### **I.2.1.5 Dosage de l'eau et plasticité**

Le dosage en eau, est fixé pour des granulats supposés secs pour un mètre cube de béton en œuvre. Si les granulats employés contiennent une certaine quantité d'eau, cette quantité doit être évaluée et déduite de l'eau totale prévue ; on obtient ainsi l'eau à ajouter lors du malaxage. Le dosage en eau doit être suffisant, pour que le béton présente la plasticité compatible avec une bonne ouvrabilité, mais il ne doit pas être excessif car les résistances du béton diminuent quand le dosage en eau augmente. On ne doit jamais, à la sortie du malaxeur, rajouter de l'eau à un béton jugé trop sec [D.T.R, 1991][Mehta, 1986].

#### **I.2.1.6 Porosité**

La porosité du béton est le degré de remplissage de son volume par les pores. Ainsi, c'est aussi le paramètre de premier ordre qui caractérise la texture du béton ; ce n'est évidemment pas le seul paramètre, mais c'est celui qu'il faut fixer avant d'étudier tous les autres. Il conditionne presque toutes les propriétés du béton et, en premier lieu, sa résistance mécanique.

La porosité d'un matériau peut être caractérisée par la densité, le pourcentage volumique des pores, la taille moyenne des pores, la distribution dimensionnelle des pores, la surface développée des pores [Cherai, 1991].

## I.2.2. Le mortier :

### I.2.2.1. Les composants du mortier :

Un mortier est constitué par le mélange de sable (rivière, mer, carrière), liant (chaux naturelle, chaux artificielle, ciment portland artificiel, ciment au laitier à la pouzzolane,...etc. ) et d'eau (mouillage des granulats, prise des liants) [Baron et al, 1997] [CENTRE 05, 2005].

### I.2.2.2. Le dosage du mortier :

Ces dosages sont indicatifs, en volume et non en poids :

- Mortier de montage ou à maçonner (assemblage des blocs et pierres) :

1 volume de ciment ou de chaux + 2 à 3 volume de sable + 1/3 volume d'eau.

- Le dosage en eau dépend de l'utilisation du mortier :

Un enduit à projeter doit être beaucoup plus liquide qu'un mortier d'assemblage de parpaings. Un mortier trop sec manque d'homogénéité et il est difficile à utiliser (il ne «colle» pas). Un mortier trop humide sèche mal et il est difficile à appliquer en épaisseur (trop fluide).

**Tableau 1.1** : Dosages des mortiers selon l'utilisation [Site 2].

<b>Utilisation</b> <b>Matériaux</b>	<b>Pose de</b> <b>briques</b> <b>et parpaings</b>	<b>Gobetis</b> <b>(sous-couche</b> <b>d'enduit)</b>	<b>Mortier de chape</b> <b>maigre</b>
Ciment	50 kg	50 kg	50 kg
Sable	120 à 130 litres	120 à 130 litres	180 litres
Nature du mélange à obtenir	onctueux	presque liquide	pâteux

### I.2.2.3. Les type de mortiers :

On distingue les mortiers par leur composition et leur utilisation :

**I.2.2.3.1. Les mortiers de ciment :**

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. Un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour 1 m<sup>3</sup> de sable [CENTRE 05, 2005].

**I.2.2.3.2. Les mortiers de chaux :**

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique [CENTRE 05, 2005].

**I.2.2.3.3. Les mortiers bâtards :**

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

Les sables utilisés sont généralement siliceux ou silico-calcaires ; leur granulométrie est de préférence continue. Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants selon la caractéristique recherchée : plastifiants, entraîneurs d'air, retardateurs de prise, hydrofuges. L'incorporation de fibres de verre ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et moins fissurable [CENTRE 05, 2005].

**I.2.2.3.4. Mortiers de chantier :****I.2.2.3.4.1. Mortier colle :**

Dans le domaine de la construction, le mortier colle désigne un mortier adhésif que l'on utilise pour la pose de revêtements céramiques. C'est la plupart du temps ce matériau qu'on emploie pour fixer le carrelage au sol dans une habitation. Il existe différents mortiers colles qu'on prendra soin de choisir en fonction des surfaces à assembler. On trouve par exemple du mortier colle flexible, du mortier colle souple ou encore du mortier colle amélioré et déformable. À noter que deux types de mortier colle sont prévus pour les usages extérieurs et intérieurs. [Site.3]



**Figure I.1** : Fixation du carrelage par le mortier colle.

#### **I.2.2.3.4.2. Les mortiers fabriqués sur chantier :**

C'est encore le cas très souvent pour des nombreux travaux ; le plus grand soin doit être apporté tant au stockage qu'au mélange des constituants qui seront choisis en fonction de l'ouvrage à réaliser : type et classe du liant, nature et granulométrie du sable, dosage en eau, nature des adjuvants [CENTRE 05, 2005].

#### **I.2.2.3.4.3. Les mortiers industriels secs pré-mélangés :**

Comme la plupart des produits industriels, ces mortiers font l'objet de contrôles à tous les stades de leur élaboration, ce qui constitue pour l'utilisateur une sécurité. Les avantages présentés par ces produits sont :

- un pré-dosage de composition constante, garant de régularité et de qualité ;
- un gain de temps pour préparer le mortier ;
- des chantiers plus propres.

Les producteurs proposent de nombreuses formules standard répondant à la plupart des besoins.

#### **I.2.2.3.4.4. Les mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi :**

Les mortiers frais retardés et stabilisés sont élaborés et livrés par des centrales, comme le béton prêt à l'emploi. Du fait qu'ils sont retardés, ces mortiers peuvent être livrés et stockés en quantité importante sur le chantier. On peut les utiliser dans un délai allant jusqu'à 36 heures [CENTRE 05, 2005].

## **I.3 L'adhérence des mortiers**

### **I.3.1 Introduction**

Une construction est généralement réalisée par des éléments, qui doivent être fixés ou protégés par un revêtement. Toutes ces opérations se font avec un liant toujours mélangé avec du sable, de l'eau et éventuellement un adjuvant pour obtenir un mortier. Les mortiers de revêtement peuvent être dosés et trempés sur site, ou pré-dosés en usine ne nécessitant qu'une alimentation en eau à mélanger au moment de l'utilisation (mortiers prêts à l'emploi).

Pour des besoins environnementaux ou pour améliorer certaines propriétés, les recherches ont exploré la substitution des produits naturels et par divers ajouts dans la composition du mortier.

### **I.3.2 Notion d'adhérence**

L'adhérence est définie comme le phénomène qui s'oppose au glissement de deux surfaces mécaniques [Site 7].

L'adhérence entre briques et mortier est donc à considérer comme une caractéristique de la maçonnerie. Lorsqu'on parle d'adhérence, on utilise différentes terminologies. Dans les normes de produits des matériaux « brique » et « mortier » pris individuellement, on retrouve des propriétés telles que « l'adhérence initiale au cisaillement » et la « performance d'adhérence ». Selon les normes de produits, on peut utiliser des valeurs tabulées ou des méthodes d'essais pour déterminer cette caractéristique.

### **I.3.3 Le support :**

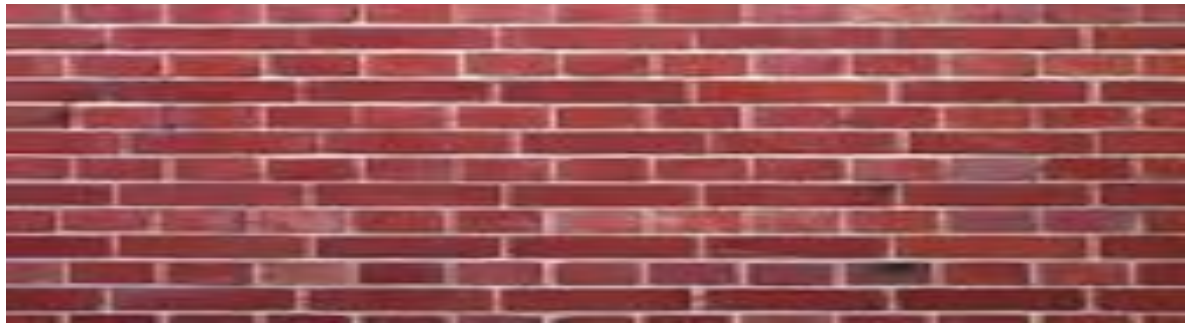
C'est la surface sur laquelle on applique le mortier, il se distingue en plusieurs types tel que :

- Support en brique.
- Support en parpaing.
- Support en béton...etc.

#### **I.3.3.1 Les types de supports :**

##### **I.3.3.1.1 Support en brique :**

La brique est un parallélépipède rectangle de terre argileuse crue et séché au soleil ou cuite au four, utilisé comme matériau de construction. L'argile est fréquemment mêlée de sable.



**Figure I.2 :** Support en brique.

#### **I.3.3.1.2 Support en parpaing :**

Le parpaing (du latin perpetaneus, ininterrompu) est un élément de maçonnerie taillé (pierre de taille, mcëllon) ou moulé (bloc de béton, brique) qui présente un parement sur chacune des deux faces opposées d'un mur. Ce terme sert à désigner fréquemment, par abus de langage, un bloc de béton.



**Figure I.3 :** Support en parpaing.

#### **I.3.3.1.3 Support en béton :**

Ce genre de support peut être un mur, une dalle, une poutre ou encore un poteau. L'essentiel est que ce support est constitué entièrement de béton armé ou non.



**Figure I.4 :** Support en béton.

### **I.3.3.2 La préparation du support :**

De la bonne préparation du support vont dépendre l'adhérence de l'enduit et son aspect final. Les enduits sont appliqués sur des supports de nature très différentes comme on vient de le voir : maçonnerie de pierres, de briques ou de blocs en béton, béton banché brut de décoffrage; bétons de granulats légers, béton cellulaire, fibres-ciment, bois. Certains supports permettent une application directe, c'est le cas de la brique, des blocs en béton, des maçonneries de pierre. D'autres supports nécessitent un traitement préalable. Dans tous les cas, le support doit être débarrassé des poussières et des sels éventuels, être sans trace de plâtre (formation de sulfo-aluminate de chaux expansif avec le ciment), s'il n'est pas assez rugueux, doit être traité, brossé et peigné pour permettre un bon accrochage de l'enduit.

### **I.3.3.3 Création du lien entre mortier et support :**

La potentialité de lien entre un mortier et un support est appelé «appétence» [Courard, 1998]. Ce terme traduit « l'envie » qu'ont deux matériaux à créer un lien. Ce sont les compatibilités chimiques, physiques et mécaniques intrinsèques aux deux matériaux qui caractérisent cette « envie ». La connaissance a priori de tous les paramètres pouvant influencer l'appétence permet de décrire qualitativement le lien entre les deux matériaux. En revanche, cela ne permet pas de prévoir la résistance à la rupture de ce lien. En effet, en raison du caractère hétérogène des matériaux et de l'impossibilité à quantifier l'impact liée à la mise en œuvre, seuls des résultats expérimentaux permettent, à l'heure actuelle, de quantifier cette résistance. Par ailleurs, l'appétence est un concept « statique » qui ne prend pas en compte l'aspect dynamique de la création du lien [Mauroux, 2011].

### **I.3.3.4 Impact de la rugosité du support**

L'augmentation d'irrégularités géométriques à la surface du support conduit à l'augmentation de la surface potentiellement en contact avec le mortier liquide : la surface spécifique. Cependant, la présence d'aspérités peut également conduire à un non imprégnation du support par le mortier. Des bulles d'air peuvent ainsi exister à l'interface entre les deux matériaux limitant la surface de contact entre les deux matériaux : la surface effective. Cette surface, primordiale pour l'obtention d'une bonne adhésion, est donc de manière indirecte affectée par la rugosité [Mauroux, 2011].

### **I.3.3.5 Développement des propriétés mécaniques**

Au très jeune âge, les particules de ciment étant en suspension dans l'eau, le mortier est à l'état liquide et ne possède aucune résistance mécanique. Sous cet état le matériau peut être mise en œuvre mais également imprégner les anfractuosités du support. Dans un second temps, l'hydratation des grains de ciment conduit à l'interconnexion des phases solides et à la formation d'une microstructure susceptible de retransmettre un effort mécanique. Cet instant critique annonçant le passage d'un matériau liquide à solide est appelé « seuil de percolation ». L'utilisation d'onde ultrasonore permet par exemple de détecter cette transition. Le rapport E/C du mortier en gouvernant l'espace inter-granulaire est un paramètre prépondérant quant à l'initiation de ce seuil de percolation [Mauroux, 2011].

## **I.4 Notions d'excitation et de propagation des sons et des ultrasons**

### **I.4.1 Son**

Le son est une sensation auditive due à une vibration acoustique. Chez l'homme, la sensibilité au son, ou audition, correspond aux vibrations qui atteignent l'oreille interne et dont les fréquences sont comprises entre 15 Hz et 20 000 Hz. L'unité de fréquence du son, le Hertz (Hz), représente un cycle par seconde. Le terme de son est parfois restreint aux ondes acoustiques qui se propagent dans l'air, mais les physiciens actuels en étendent la portée aux vibrations similaires qui se produisent dans les milieux liquides et solides. Les sons de fréquence supérieure à 20 000 Hz sont appelés ultrasons [Mehamdia, 2010].

D'une manière générale, une onde peut se propager transversalement ou longitudinalement dans un milieu. Dans les deux cas, seule la quantité d'énergie véhiculée par l'onde se déplace, tandis que le milieu demeure pratiquement inchangé. Un exemple simple d'onde transversale se présente lorsqu'on secoue l'extrémité libre d'une corde attachée à un poteau. Une onde va

parcourir la corde jusqu'au poteau, avant de se réfléchir et de revenir à son point de départ. Chaque portion de la corde se sera déplacée transversalement et à tour de rôle, de haut en bas et de bas en haut. Ce type de déplacement d'onde s'appelle onde transversale. Un autre exemple d'onde transversale est celui de la pierre qu'on jette dans l'eau. À partir du point d'impact vont se former des séries de vaguelettes. Un bouchon flottant placé près du point d'impact va monter et descendre, perpendiculairement à la direction de la propagation de l'onde. En revanche, le bouchon ne subira pas ou peu de déplacement longitudinal.

Un exemple typique d'onde longitudinale est celui de l'onde acoustique. Les molécules d'air qui constituent le support du son, se déplacent d'avant en arrière, parallèlement à la direction du déplacement de l'onde. On peut par conséquent considérer une onde acoustique comme une suite périodique de compression et de dilatation de l'air. Au passage de l'onde, chaque molécule transmet une certaine quantité d'énergie aux molécules voisines, tout en conservant plus ou moins sa position initiale.

#### **I.4.1.1 Vitesse du son**

La fréquence d'une onde acoustique correspond à une mesure du nombre d'ondes qui passent par seconde en un point donné. La distance entre deux sommets successifs de cette onde s'appelle la longueur d'onde. Le produit de cette longueur d'onde par la fréquence est égal à la vitesse de propagation de l'onde, qui est la même pour tous les sons se propageant dans le même milieu à température constante.

La vitesse de propagation du son dans l'air sec à une température de 0 °C est de 331,6 m/s. Lorsque la température s'élève, la vitesse du son augmente également. Ainsi, à 20 °C, la vitesse du son est de 344 m/s. En revanche, une modification de la pression dans un milieu de densité constante n'a pratiquement pas d'influence sur la vitesse du son.

Lorsque le son se propage dans un gaz, sa vitesse dépend de la densité de ce gaz. Cela peut se comprendre facilement : si les molécules du gaz sont lourdes, elles se déplacent moins facilement, si bien que le son se propagera plus lentement dans un tel milieu. Par conséquent, plus le gaz est dense, plus la vitesse du son dans ce gaz est faible. Le son se propage donc plus rapidement dans de l'air humide que dans de l'air sec, puisque l'air humide contient un plus grand nombre de molécules légères.

En général, le son se propage plus rapidement dans les liquides et dans les solides que dans les gaz. Il est montré que la vitesse du son est proportionnelle à la racine carrée du module

d'élasticité du milieu. C'est pourquoi le son se déplace très rapidement dans l'acier qui est très élastique : sa vitesse est de presque 5000 m/s. Dans le cas du cuivre, la vitesse du son est de 3 353 m/s à la température ordinaire, mais décroît lorsque la température augmente, parce que l'élasticité du cuivre diminue. En revanche, la vitesse du son dans l'eau, qui est de 1 525 m/s à la température ordinaire, augmente lorsque la température s'élève.

#### **I.4.1.2 Réfraction, réflexion et interférence**

Le son se propage en ligne droite lorsqu'il traverse un milieu ayant une densité uniforme. Cependant, comme la lumière, le son est sujet à la réfraction dès qu'il pénètre dans un nouveau milieu. La réfraction se traduit par un changement de la direction initiale des ondes. Lorsque le son passe d'un milieu dans un autre, il a tendance à revenir vers celui dans lequel il se propage plus lentement.

À l'instar de la lumière, l'onde acoustique peut également subir une réflexion ou une diffraction. La réflexion d'un son correspond au phénomène de l'écho. En acoustique, on utilise beaucoup la réflexion pour amplifier ou pour capter des sons.

Le son est également soumis aux interférences. Si un son émis par une source emprunte deux chemins différents (un chemin direct et un chemin réfléchi) pour parvenir à une source réceptrice, les deux sons créés vont alors se superposer. S'ils sont en phase, leur combinaison aboutira à un son plus fort. En revanche, s'ils sont en déphasage, le son perçu sera moins puissant que celui obtenu sans interférence. Des sons de fréquences différentes peuvent également interférer : on obtient alors des distorsions complexes.

### **I.4.2 Les ultrasons**

Les ultrasons sont des ondes sonores de fréquence supérieure à 20 kHz, correspondant à des sons inaudibles pour l'homme.

#### **I.4.2.1 Production et détection**

Les générateurs modernes d'ultrasons peuvent produire des fréquences de plusieurs gigahertz en transformant un courant électrique alternatif en oscillations mécaniques. La détection et la

mesure des ondes ultrasonores s'effectuent principalement à l'aide d'un récepteur piézo-électrique ou par des moyens optiques, les ondes ultrasonores pouvant diffracter la lumière.

#### **I.4.2.2 Applications**

Les ultrasons ont de nombreuses applications en physique, en chimie, en technologie et en médecine. Les ondes ultrasonores sont utilisées depuis longtemps pour la détection et la communication sous-marines dans les sonars, très employés pour la navigation et, en particulier, pour la guerre sous-marine.

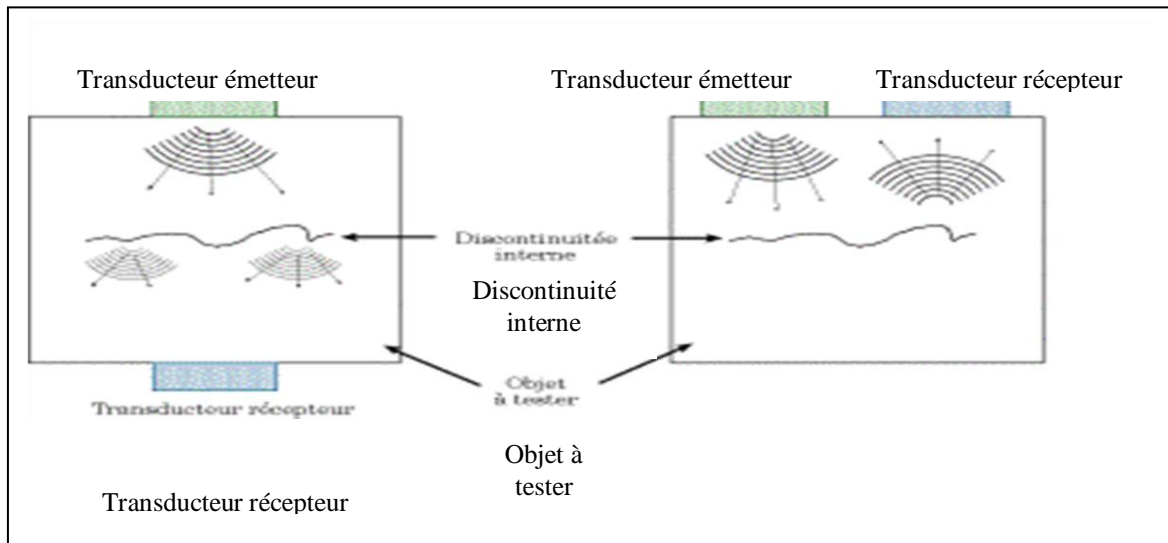
En physique, les ultrasons servent à déterminer certaines propriétés de la matière, telles que la compressibilité, les chaleurs spécifiques et les constantes élastiques. On les utilise également pour détecter les défauts de certains matériaux. Les ultrasons dont les fréquences sont de l'ordre du GHz peuvent être utilisés pour obtenir un « microscope acoustique », capable de visualiser des détails inférieurs à 1  $\mu\text{m}$ . Les ondes acoustiques de surface, de fréquence ultrasonique, constituent une partie importante des appareils de contrôle électronique.

En médecine, les ultrasons sont utilisés pour les diagnostics, ou remettre en état des tissus endommagés. La physiothérapie utilise également les ultrasons [Site 1].

#### **I.4.3 Utilisation des ultrasons**

Les méthodes acoustiques sont aujourd'hui les méthodes d'essai non destructives les plus répandues. Elles doivent leur large popularité surtout à un rapprochement évident entre les phénomènes qui régissent la propagation des ondes et les propriétés physico-mécaniques du milieu que ces ondes traversent. Il y a cependant dans cette analogie une restriction qui apparaît tout de suite. Tandis que la propagation des ondes est un phénomène dynamique et purement élastique dans le domaine des faibles énergies employées, les propriétés physico-mécaniques des matériaux n'ont pas toutes un caractère exclusivement élastique. Par exemple : le module d'élasticité dynamique ou le coefficient de poisson dynamique garde un caractère purement élastique pour des sollicitations relativement faibles mais, par contre, les résistances mécaniques du matériaux à tout type de sollicitation, du fait même de la notion de rupture qu'elles impliquent, renferment certainement, outre les propriétés élastiques, les propriétés visco-plastiques du matériaux. La différence entre les conditions de propagation des ondes élastiques dans différents milieux a également créé la possibilité d'appliquer ces catégories de

méthodes non destructives pour déterminer les défauts internes des ouvrages ou des éléments de construction.



**Figure I.5:** Evaluation non destructive par ultrasons

#### I.4.3.1 Mesure des constantes élasto-dynamiques

Les méthodes ultrasoniques à impulsions permettent de déterminer aussi bien le coefficient de Poisson dynamique ( $\mu_d$ ), que le module d'élasticité dynamique ( $E_d$ ) ou le module d'élasticité transversale dynamique ( $G_d$ ), seules deux de ces trois quantités étant indépendantes, entendue qu'elles sont reliées entre elles, conformément à la théorie de l'élasticité, par la relation :

$$G_d = \frac{E_d}{2(1+\mu_d)} \quad (\text{I.1})$$

Pour une détermination complète des constantes élastiques, il faut connaître deux des vitesses de propagation des ultrasons, de type différents, formant un rapport qui permet de déterminer le coefficient de Poisson dynamique, si l'on connaît le rapport  $a$  de la vitesse de propagation des ondes transversales à la vitesse de propagation des ondes longitudinales :

$$a = \frac{V_T}{V_L} \quad (\text{I.2})$$

Le coefficient de Poisson a pour relation :

$$\mu_d = \frac{1-2a^2}{2-2a^2} \quad (\text{I.3})$$

Pour préciser la relation entre les coefficients de Poisson dynamique et statique, il faut spécifier la grandeur de la charge à laquelle on détermine le coefficient de Poisson statique. En admettant entre les deux coefficients une relation de la forme générale :

$$\mu_d = \alpha \mu_{st} \quad (I.4)$$

$\alpha$  a dans le cas du béton, les valeurs moyennes suivantes :

1,00 pour les charges extrêmement faibles (pratiquement nulles) ;

1,20 pour les charges d'environ un tiers de la charge de rupture, ce qui est le cas usuel;

0.65 pour les charges au voisinage de la rupture.

La détermination la plus directe du module d'élasticité dynamique se fait à l'aide de la vitesse de propagation des ondes de dilatation. Dans ce but on emploie la relation classique qui résulte de la théorie de la propagation des ondes :

$$E_d = V_d^2 \gamma \quad (I.5)$$

Où  $\gamma$  est la masse volumique du matériau.

Mais à cause des dimensions des éprouvettes et de la fréquence des ultrasons employés, les conditions pour la formation des ondes de dilatation , c'est-à-dire :

$$\lambda \leq 0.2 d \quad (I.6)$$

Où  $d$  représente la plus grande dimension de l'éprouvette transversale à la direction de propagation, sont rarement remplies, et la relation (1.13) ne peut pas être appliquée. Le cas le plus fréquent dans les corps solides est celui de la mesure de la vitesse des ondes longitudinales, parce que la condition :

$$\lambda \leq 2 d \quad (I.7)$$

$$V_D = \sqrt{\frac{(1+\mu_d)(1-2\mu_d)}{1-\mu_d}} \cdot V_L, \quad (I.8)$$

$$E_d = V_L^2 \gamma \frac{(1+\mu_d)(1-2\mu_d)}{1-\mu_d} \quad (I.9)$$

Le tableau I.2 donne des valeurs des constantes élasto-dynamiques de quelques matériaux usuels, que l'on peut rencontrer dans le bâtiment :

**Tableau I.2** : Valeurs des constantes élasto-dynamiques de quelques matériaux usuels.

Matériaux	$\gamma$ ( Kg/dm <sup>3</sup> )	$\mu_d$	$E_d$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$G_d$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Aluminium	2.7	0.34	710 000	264 000
Cuivre	8.9	0.35	1 250 000	464 000
Fer	7.8	0.28	2 100 000	820 000
Fonte	7.7	0.27	1 170 000	448 000
Nickel	8.8	0.31	2 054 000	785 000
Plomb	11.4	0.44	160 000	58 000
Béton jeune	2.4	0.25-0.30	100 000-200 000	-
Béton de plus de 28 jours	2.35	0.20-0.24	300 000-450 000	-
Plexiglas	1.18	0.35	53 500	15 000
Marbre	2.66	0.30	736 000	282 000
Gneiss	2.65	0.27	700 000	250 000
Porcelaine	2.41	0.23	150 000	60 000
Basalte	2.72	0.30	586 000	238 000
Polystyrène	0.02	0.41	699 000	268 000

#### I.4.3.2 Détermination de la résistance du béton

La détermination de la résistance du béton à la traction et surtout à la compression a fait l'objet de longues recherches dans beaucoup de pays de sorte que le niveau atteint a permis de standardiser ces méthodes d'essai.

Aujourd'hui il y a encore une diversité d'opinions en ce qui concerne l'efficacité des méthodes ultrasoniques à impulsions dans la détermination de la résistance du béton ; ce qui est accepté unanimement ou, tout au moins par la majorité des chercheurs dans ce domaine.

Un premier fait reconnu est que la seule mesure de la vitesse de l'ultrason dans le béton, non confirmée par d'autres observations, risque de conduire, dans l'évaluation de la résistance du béton, à de grandes erreurs qui dans certains cas peuvent même dépasser  $\pm 40\%$ .

Un deuxième fait également reconnu est qu'en général plus la vitesse de propagation est grande, plus la résistance du béton à la compression est forte.

Une première voie, a été de procéder à des essais à des âges différents. A côté de l'avantage que présente sa simplicité remarquable, cette méthode présente aussi des inconvénients, à savoir : l'influence qu'exerce l'âge du béton sur la relation entre la vitesse de propagation de des ultrasons et la résistance du béton à la compression.

Les regards se sont aussi portés vers les facteurs qui provoquent réellement la variation de la résistance du béton dans un ouvrage donné. La condition supplémentaire que devaient remplir ces facteurs était qu'ils ne modifient pas la forme de la relation entre la vitesse et la résistance.

Dans ces conditions les recherches faites ont montré qu'on peut choisir comme facteurs de variation simultanée de la résistance du béton et de la vitesse de propagation, soit le degré de compactage du béton, soit le rapport eau/ciment employé dans la préparation du béton, soit les deux facteurs.

La logique de l'équivalence s'explique par le fait que les deux facteurs provoquent une modification de la porosité du béton, à laquelle sont sensibles tant les mesures de vitesse de propagation que les mesures de résistance. Ce choix a rencontré initialement une certaine opposition, telle celle manifestée par certaines délégations à la session du Groupe d'Essai Non Destructifs du RILEM, tenue à Bucarest en 1964, mais le temps a travaillé en sa faveur, de sorte qu'à la conférence des pays est-européens de 1967 tenue à Bratislava et qui avait pour sujet les méthodes d'essai du béton à l'aide des ultrasons, la méthode a été acceptée comme méthode unique, même par les pays qui s'y étaient opposés en 1964. Aujourd'hui elle est aussi prévue dans les recommandations RILEM [Jones, 1969].

Les essais à différents âges pour établir la courbe de transformation vitesse-résistance ne paraissent logiques que dans les cas où l'on veut suivre l'évolution du durcissement d'un béton dans le temps, ce qui est assez peu fréquent.

Il y a lieu de remarquer que le mode de compactage et de changement non contrôlé de l'eau de mélange sont les facteurs qui soumettent le plus souvent les résistances du béton dans l'ouvrage à des variations ne pouvant pas être contrôlées [Balan et al, 1972].

## I.5 La dureté et les essais sclérométriques du béton

Pour mesurer la dureté d'un matériau, un pénétrateur de faible déformabilité est enfoncé à la surface du matériau à tester avec une force connue pendant un temps donné. Plus l'empreinte laissée est petite, plus le matériau est dur. La dureté se mesure sur différentes échelles selon le type de matériau considéré. Il existe une grande variété d'essais de dureté possibles, les plus courants et les plus familiers sont les essais de pénétration ou de rebondissement pour caractériser la dureté. Ces essais ont l'avantage d'être plus simples à réaliser, rapides et généralement non destructifs. Par ailleurs, ils permettent d'apprécier et d'estimer dans certaines mesures la résistance mécanique des matériaux, leur rigidité, la résistance des corps fragile.

### I.5.1. Mesure de la dureté par rebondissement

La mesure de dureté par rebondissement consiste à mesurer la distance de rebondissement d'une petite masse tombant d'une hauteur connue sur la surface du matériau à tester. L'énergie de déformation élastique est absorbée par les matériaux.

Plus le matériau est mou, plus il absorbera d'énergie élastique. Il existe aussi une variante de cet essai pour d'autres matériaux. Le mode opératoire reste identique mais l'interprétation est différente. Il s'agit dans ce cas de mesurer l'énergie de déformation plastique absorbée par le matériau. Si le choc est parfaitement élastique (pas de déformation plastique, pièce à tester très dure), la pointe rebondit théoriquement jusqu'à sa hauteur de lâcher (en négligeant les frottements) ; on peut relier la différence de hauteur  $h$  à l'énergie cinétique  $\Delta E_c$  absorbée lors du choc :

$$\Delta E_c = m g h \quad (I.10)$$

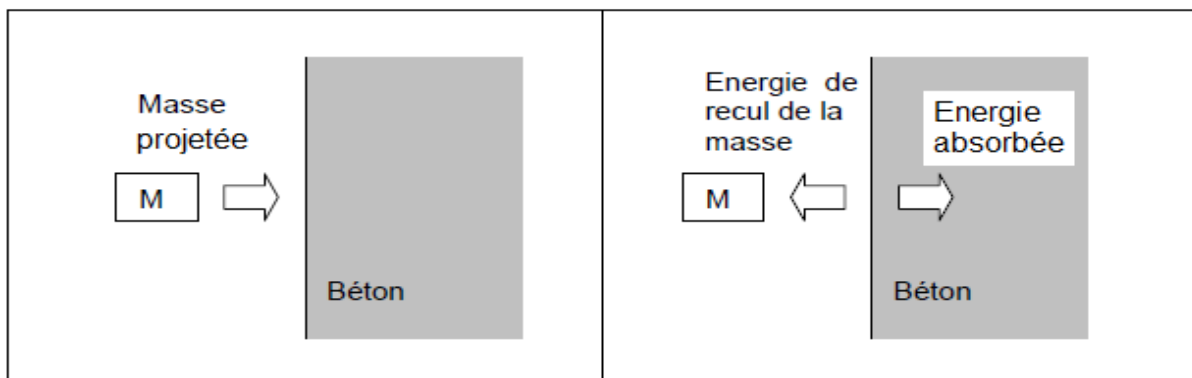
où  $m$  est la masse lâchée et  $g$  est l'accélération de la gravité. Dans le cas d'un objet extrêmement mou, la pointe s'enfonce et ne rebondit pas. Les appareils sont en principe étalonnés pour obtenir une dureté de 100 pour un acier trempé à 0,9 % de carbone et d'environ 35 pour les aciers doux [Site 6].

Afin de contourner les inconvénients de la méthode destructive, une gamme d'essais in-situ, appelés essais non destructifs, a été développée, étant entendu que la structure peut être contrôlée sans toutefois modifier, ni sa performance ni son apparence.

L'essai au scléromètre consiste à projeter une masse sur la surface du béton avec une énergie initiale constante. Suite au choc, une partie de l'énergie est absorbée par le béton (énergie de déformation permanente), l'autre partie provoque le rebondissement de la masse mobile qui est proportionnel à l'énergie restée disponible (fig.I.6).

Le marteau à rebond Smith, également connu sous le nom de marteau suisse, a été développé en 1948. Cet essai non destructif utilisant cette technique n'est pas nouveau pour l'étude à résistance normale [Aitcin, 1990] [Bungey, 1982]. Les scléromètres sont utilisés pour déterminer la dureté de surface du béton et sont l'un des instruments les plus répandus dans le domaine des contrôles non destructifs de la résistance de compression du béton. C'est la méthode la plus rapide et la plus économique pour évaluer la qualité et la résistance du béton. Ils sont disponibles en version analogique ou digitale.

La résistance à la compression peut être déterminée à partir de la courbe de calibration de l'appareil. Dans le cas d'une version digitale, on peut avoir les deux résultats : Indice du rebond et la résistance. Dans l'autre version, à partir de la courbe de calibration, on aura la résistance (fig. I.7).



**Figure I.6** : Principe du scléromètre [CNERIB, 2004]



(a)

(b)

**Figure I.7** : Scléromètres analogique (a) et digital (b) [Site 5]

Le marteau à percussion ou simplement le marteau à rebond mesure la dureté de la surface du béton en libérant un piston à ressort qui heurt le béton et mesure la distance de rebond. Ce marteau à rebond teste uniquement le béton en dessous sur une surface de contact relativement petite. Les résultats sont donc sensibles aux variations locales du béton telles que la présence d'un gros granulat dur (gravier), d'une pâte molle ou de vides [Khan, 2004]. Cet essai non destructif n'est donc pas nouveau pour l'étude du béton à résistance normale

Montero et Conçalves se sont intéressés à la norme EN 13791 constitue un outil précieux pour évaluer la résistance à la compression caractéristique dans les grands structures au moyen de méthodes indirectes [Montero et Conçalves, 2009]. Cependant, ils indiquent que certains aspects pertinents tels que la précision des résultats des tests du marteau à rebond et le niveau de confiance doivent être clarifiés. Ils avancent que négliger l'erreur dans les résultats de l'essai du scléromètre sous-estime écart type de la résistance in situ mais ceci peut être atténué en augmentant le nombre de mesures dans chaque emplacement de test.

Dans une étude comparative, Chai a trouvé une différence entre les résistances d'écrasement et celles données par le scléromètre, en utilisant la courbe de calibration du fabricant du scléromètre, qui dépasse les 36% en moyenne [Chai, 2006]. Donc, il est préalable de procéder à une vérification et un étalonnage préalable du marteau de Schmidt.

Demirdag et al. Avancent que la taille des éprouvettes de roche a une grande influence sur l'indice de rebond. Des éprouvettes cubiques de différent a arrêt (6, 7, 8, 10, 12 and 15cm) ont été soumises aux essais par le marteau de Schmidt. La comparaison des résultats a permis de déterminer la valeur minimale de l'arrêt de l'éprouvette et qui est de 12 cm. Pour les éprouvettes de moindre volume, des équations de corrélations ont été proposées [Demirdag et al, 2009].

## **I.6. Conclusion**

Au travers cet état d'art sur deux matériaux proches que sont les bétons et les mortiers mais avec deux aspects différents. Ces deux aspects se focalisent sur les propriétés intrinsèques du béton et principalement sa résistance tandis que pour le mortier c'est plutôt son adhérence à plusieurs supports qui est prospectée.

Pour une caractérisation non destructive de ces aspects pour ces deux matériaux, on s'est intéressé aux modes du contrôle non destructif les plus utilisés chez nous et que sont les essais ultrasoniques et les essais sclérométriques. Ces deux essais qui constituent une évaluation non directe des propriétés souhaités sont influencés par plusieurs paramètres (composition, état

d'hygrométrie, formes des éprouvettes, fréquences des ultrasons, ...) qui peuvent introduire certaines incertitudes dans la détermination des propriétés des ces matériaux.

**Chapitre II :**  
***Matériaux et***  
***procédures***  
***expérimentales***

## Chapitre II : Matériaux et procédures expérimentales

### II. 1 Introduction

Nous allons présenter dans cette partie, les caractéristiques des matériaux utilisés pour la réalisation des différents essais.

### II. 2 Caractéristiques des matériaux utilisés

Nous avons utilisé pour les essais des matériaux disponibles et très utilisés localement dont les caractéristiques ont été déterminées expérimentalement au laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH) de l'université de 8 Mai 1945 Guelma.

#### II .2. 1 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés sont : un sable de la région de Tebessa, deux types de gravier concassés (5/15 et 15/25) provenant de la carrière SARL SAPAM de la carrière Bendjerah Guelma, un ciment CPJ –CEM II-A 42.5 de la cimenterie de Hdjar Essoud (Skikda) et de l'eau potable disponible au niveau du laboratoire LGCH Guelma.

##### II.2.1.1 Caractéristiques physiques des graviers

Les résultats sont regroupés dans le tableau II.1 :

**Tableau II.1** : Caractéristiques physiques des graviers

Désignation	5/15	15/25
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.57	2.58
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.58	1.57
Impureté (%)	1	1.32

### II.2.1.2 Caractéristiques mécaniques des graviers

Les graviers utilisés dans l'étude du béton, ont été soumis à deux essais mécaniques en laboratoire.

#### **- Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles)**

L'essai consiste à mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de gravier [NF18-573, 90]

#### **- Essai de résistance à l'usure (Essai MD) :**

L'essai consiste à mesurer [NF P18-572, 90] la quantité d'éléments inférieurs à 1.6mm, en soumettant le matériau à l'usure de boulets normalisés dans la machine de MICRO- DEVAL (MD). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II.2 :

**Tableau II.2 :** Caractéristiques mécaniques des graviers

Caractéristiques	5/15	15/25
Coefficient de Los Angeles	24%	29%
Coefficient Micro-Deval « MD »	20%	22%

#### **Commentaires**

a)- Selon le mode opératoire pour le coefficient de Los Angeles, le seuil est fixé à 40%. Pour le gravier utilisé  $L_A < 40$ , nous pouvons conclure qu'il est utilisable pour le béton hydraulique.

b)- Selon la norme NF P18-572, le seuil est fixé à 35%. Si «MD » < 35% : ce qui est le cas pour notre gravier. Il en résulte que le gravier est acceptable pour le béton.

### II.2.1.3 Les caractéristiques chimiques des graviers

Les résultats de l'analyse chimique du gravier ont été fournis par la SARL SAPAM.

**Tableau II.3** : Compositions chimiques des graviers

Désignation	%	%	Observations
	Insolubles	Carbonates	
5/15	09.10	88.62	Calcaires marneux
15/25	10.40	84.80	Calcaires marneux

### II.2.1.4 Caractéristiques du sable

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur le mortier. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs.

**Tableau II.4** : Caractéristiques du sable

Caractéristiques	Equivalent de sable		Compacité	Masse volumique	
	ESV (%)	ESP (%)	C (%)	Apparente (g/cm <sup>3</sup> )	Absolue (g/cm <sup>3</sup> )
	80.43	77.08	64.51	1,54	2,70

Le sable est propre ( $75\% \leq \text{ESV} < 85\%$ ,  $70\% \leq \text{ES} < 80\%$ ).

### II.2.1.5 Caractéristiques physiques du ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé de classe 42.5, qui provient de la cimenterie de Hdjar Essoud (Wilaya de SKIKDA). Les différentes caractéristiques sont regroupées dans le tableau II.5 :

**Tableau II.5** : Caractéristiques physiques du ciment

Caractéristiques	Ciment
	CPJ-CEM II-A 42.5
Masse volumique absolue	3.1
Masse volumique apparente	1.12
Surface spécifique	3702

## II. 2.1.6 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est une eau potable disponible au niveau du laboratoire de génie civil et d'hydraulique de l'université de Guelma.

## II. 2.1.7 Caractéristiques des matériaux utilisés pour l'adhérence des mortiers

### II.2.1.7.1. Mortier industriel (prêt à l'emploi)

C'est un mortier que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins.

Pour notre étude nous avons travaillé avec un mortier monocouche d'imperméabilisation et de décoration fabriqué par Mortéro Sarl (Bejaïa – Algérie). Le fabricant donne les informations suivantes en ce qui concerne ce mortier :

- ❖ **Consommation** : 1.6 kg /m<sup>2</sup> d'épaisseur.
- ❖ **Dosage en eau** : 3.9 a 4.3 litres par sac de 25kg.
- ❖ **Précautions d'emploi** :
  - La température d'utilisation doit être comprise entre +5°C et +30°C.
  - Ne pas appliquer en plein soleil ou en courant d'air.
- ❖ **Stockage et conservation** :
  - 1 an à partir de la date de fabrication en emballage d'origine non ouvert et stocké à l'abri de l'humidité.
- ❖ **Performances** :
  - Type : OC 3
  - Résistance à la compression : CS III
  - Absorption d'eau à la capillarité : W2
  - Réaction au feu : A1
- ❖ **Préparation du produit** :
  - Temps de mélange dans une machine : environ 5 min.
  - Temps de mélange dans une bétonnière : environ 5 min.
- ❖ **Destinations** :
  - Murs extérieurs.

- Maçonnerie de blocs de béton et briques.
- Murs de béton.
- Mortier de crépissage.



**Figure II.1** : Photo du mortier prêt à l'emploi.

Le mortier prêt-à-l'emploi est constitué d'un mélange de liant (ciment, chaux ou résine), de sable, et le plus souvent d'adjuvants. Ces mêmes composants dictent le comportement du mortier, ses caractéristiques et son utilisation.

#### II.2.1.7.2. Mortier préparé

##### ❖ Composition

La composition de ce mortier est celle d'un mortier normalisé mais avec un sable concassé, donc sa composition est la suivante :

- Sable = 1350 g
- Ciment = 450 g.
- Eau de gâchage : la quantité d'eau est fixée par des essais de consistance.

Les résistances à la compression et à la traction, à 28 jours, sont respectivement :

48.5 MPa et 6.3 MPa.

## II. 3 Compositions et corps d'épreuve

### II. 3.1. Résistance des bétons

L'estimation de la résistance à la compression, par les ultrasons, par scléromètre et par écrasement à l'aide de la presse, a concerné deux compositions de béton et trois types d'éprouvettes prismatiques.

#### II.3.1.1 Compositions des bétons

**Tableau II.6** : Composition des bétons

Composition (kg/m <sup>3</sup> )	Sable	Gravier 5/15	Gravier 15/25	Ciment	Eau	Masse vol.	S/S+G	E/C
B1	400	400	400	350	170	1720	0.33	0.48
B2	500	928	232	440	220	2320	0.30	0.50

- L'affaissement des bétons des deux bétons est de **10 cm**, donc notre béton est très plastique.
- Les différentes dimensions des éprouvettes sont : 10x10x2.5 cm<sup>3</sup>, 10x10x7 cm<sup>3</sup> et 10x10x16 cm. Ces éprouvettes ont donc différents élancements pour en tenir compte dans l'estimation de la vitesse ultrasonique ainsi que dans la résistance.



**Figure II.2** : Eprouvettes en béton de différentes formes

## II. 3.2. Adhérence des mortiers

### II.3.2.1. Supports

L'étude de l'adhérence du mortier a concerné deux types de support.

- a) **Parpaing** : le parpaing utilisé est de dimension 15 x 20 x 40 cm, il est constitué essentiellement de granulats, de ciment et d'eau. C'est un élément creux qui est souvent utilisé en maçonnerie dans la construction des murs.



**Figure II.3** : Le parpaing utilisé.

- b) **Poutrelle en béton** : les poutrelles en béton sont de dimensions 15x 15 x 100 cm<sup>3</sup>.

La composition du béton de ces poutrelles pour 1 m<sup>3</sup> est 750 kg de sable, 700 kg de gravier 5/15, 350 kg de gravier 15/25, 350 kg de ciment et 205 litres d'eau.

L'essai de maniabilité de ce béton (affaissement au cône d'Abrahams) a donné un affaissement de 10 cm.



**Figure II.4** : Les poutrelles en béton.

### II.3.2.2. Revêtement des supports

Les deux différents supports ont été revêtus chacun par l'un et l'autre des mortiers avec deux épaisseurs différentes dans chaque cas (1cm et 2 cm).



**Figure II.5 :** Photos des supports revêtus par une couche de mortier préparé.



**Figure II.6 :** Photos des supports revêtus par une couche de mortier industriel prêt à l'emploi.

### II. 3.2.3. La résine époxyde

L'essai d'arrachement à l'aide du dynamomètre nécessite le collage de pastilles sur le revêtement. Ce collage est réalisé par une résine époxyde dont les propriétés sont rassemblées dans le tableau II.7 :

**Tableau II.7** : Propriétés mécaniques de la résine

Caractéristiques	Valeur moyenne
<i>Résistance à la traction</i> ..... (MPa)	70 à 80
<i>Allongement à rupture en traction</i> .....(%)	1 à 1,5
<i>Résistance à la compression</i> ..... (MPa)	140 à 150
<i>Résistance à la flexion</i> ..... (MPa)	110 à 130
<i>Allongement à rupture en flexion</i> .....(%)	1,2 à 1,7
<i>Module de traction</i> .....(GPa)	3 à 10
<i>Coefficient de Poisson</i> .....	0,35

Le comportement mécanique de la résine va dépendre de sa température d'utilisation par rapport à la température de transition vitreuse. Cette transition marque, en effet, une brusque variation de beaucoup de propriétés physiques du matériau.



**Figure II.7** : Photo de la résine époxyde.

## II.4 Méthodologie des essais

La méthodologie expérimentale est basée sur une comparaison entre des essais non destructifs (essais ultrasoniques et essais sclérométriques) et des essais destructifs (résistance des bétons et adhérence des mortiers).

### II.4.1 Auscultation dynamique par les ultrasons

Cette méthode permet de mesurer le temps de propagation d'une impulsion ultrasonique traversant le béton [EN 12504-4, 2005]. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché sont très semblables. Ces appareils comprennent un générateur d'impulsions et un récepteur d'impulsions. Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc. Des cristaux semblables sont utilisés dans le récepteur. Le temps de propagation de l'impulsion dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.

Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages déjà construits en béton.

Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures :

- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, et une substance de contact telle une mince couche de gel de contact est indispensable.
- Le parcours doit être préférablement bien choisi de façon à prévenir toute erreur occasionnée par l'hétérogénéité du béton.
- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau ; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température.



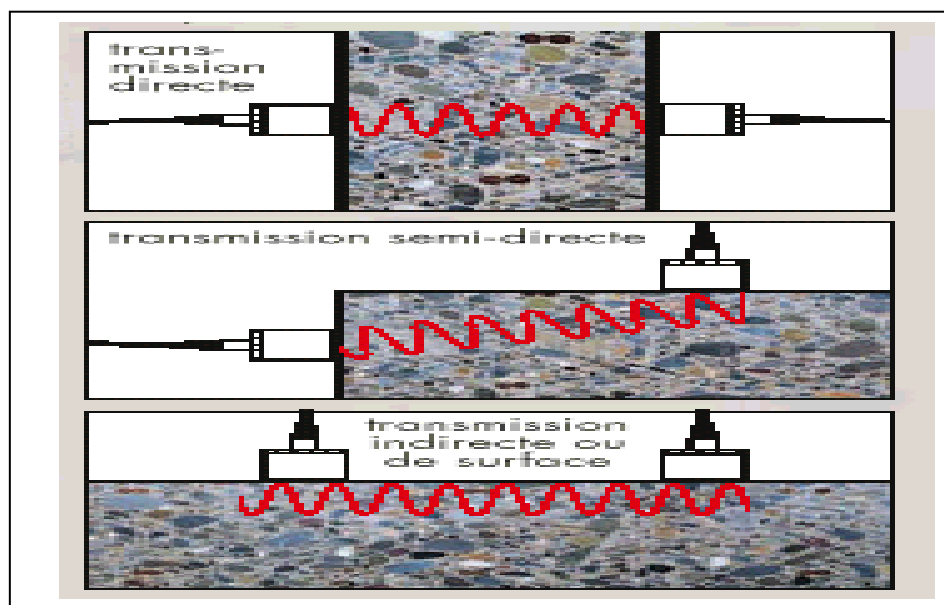
**Figure II.8 :** Appareillage ultrasonique.

L'appareil génère des impulsions ultrasoniques qui sont transmises au béton par transducteurs mis en contact avec la zone à évaluer. Le temps de propagation à travers le béton est visualisé sur un afficheur digital.

L'appareil utilisé dans nos essais est un testeur ultrasonique 58-E0048 avec un transducteur de transmission et un autre de réception. Le dispositif comprend aussi deux câbles de connexion et un barreau de calibration. Lors des essais, on utilise un gel de contact entre les transducteurs et la face du béton.

#### II.4.1.1. Positionnement des transducteurs et temps de parcours

Bien que la direction pour laquelle le maximum d'énergie soit par rapport à la face d'émission, il est possible de détecter des impulsions s'étant propagées dans le béton en d'autres directions. Il est possible donc de faire des mesures de vitesses de propagation en plaçant les deux transducteurs en opposition (transmission directe), adjacents (transmission semi-directe) ou sur le même plan (transmission indirecte ou de surface) [Jones, 1969] [Dupain et al, 2009] .



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

En transmission directe, la longueur de parcours « L » est la distance entre les deux transducteurs et sa mesure devra être effectuée, si possible, à une précision de  $\pm 1\%$ .

En transmission semi-directe, il est généralement suffisant de déterminer la distance de centre à centre des transducteurs. La précision d'estimation de la longueur de parcours dépendra de la dimension des transducteurs comparée à la distance centre à centre.

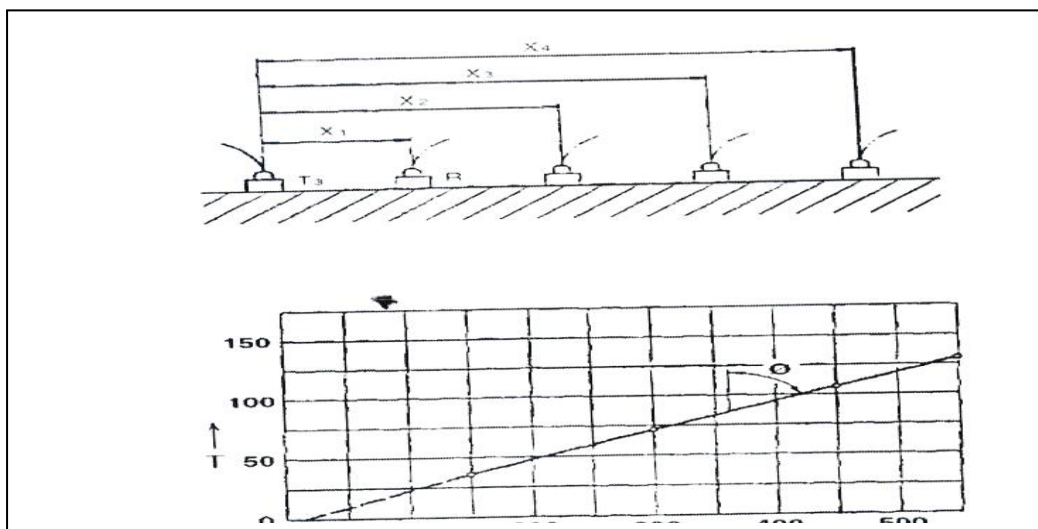
En transmission directe et semi-directe, la vitesse de propagation « V » sera calculée selon la formule :

$$V = \frac{L}{T} \quad (\text{II.1})$$

Avec « T » qui est le temps de propagation.

En transmission indirecte ou de surface, il y a une certaine incertitude par rapport à la longueur exacte de la longueur de parcours, liée à la dimension des surfaces de transducteur en contact avec le béton. Il est dès lors souhaitable d'effectuer une série de mesures à différents espacements de transducteurs pour éliminer cette incertitude.

Pour cela, le transducteur émetteur sera placé en contact avec la surface du béton en un point P fixe et le transducteur récepteur sera déplacé en différents points alignés à des distances fixes. Les temps de propagation relevés seront reportés sur une courbe donnant la relation temps/distance entre transducteurs. Un exemple est montré en figure II.10.



**Figure II.10** : Vitesse de propagation déterminée en transmission indirecte ou de surface.

La pente de la meilleure droite tractable passant par les points sera mesurée et relevée comme vitesse conventionnelle de propagation sur la ligne de mesure.

**Remarque :** on a utilisé l'auscultation ultrasonique en mode directe pour l'estimation de la résistance des bétons et l'auscultation indirecte pour l'estimation de l'adhérence des mortiers sur les différents supports.

On a utilisé différents types de transducteurs (diamètre, fréquence) pour tenir compte de ces deux paramètres dans l'acquisition de vitesses ultrasoniques et leurs répercussions sur l'estimation de la résistance des bétons. Quant aux essais ultrasoniques par les ondes de surface, un seul type de transducteurs a été utilisé transducteurs (B').



**Figure II.11 :** Les différents transducteurs

**Tableau II.8 :** Les différents types de transducteurs

Type	A	B	C	B'
Diamètre (mm)	49.5	49.5	49.5	7.5
Fréquence (KHz)	25	54	150	54

#### II.4.1.2 Auscultation ultrasonique pour la résistance des bétons

Les essais pour déterminer les vitesses ultrasoniques ont été réalisés, sur les différentes éprouvettes prismatiques mentionnées précédemment, en mode direct. Ces éprouvettes ont les dimensions suivantes :  $10 \times 10 \times 2.5 \text{ cm}^3$ ,  $10 \times 10 \times 7 \text{ cm}^3$ ,  $10 \times 10 \times 16 \text{ cm}^3$ . Donc, le parcours de l'onde ultrasonique est respectivement :  $D1 = 2.5 \text{ cm}$ ,  $D2 = 7 \text{ cm}$  et  $D3 = 16 \text{ cm}$ .



**Figure II.12:** Essais ultrasoniques sur éprouvettes prismatiques

#### II.4.1.3 Auscultation ultrasonique pour l'adhérence des mortiers

L'acquisition des vitesses ultrasoniques, sur les différents supports (poutrelles en béton, blocs de parpaing) revêtus des différents mortiers, est effectuée en mode indirecte (surface).

Plusieurs positions du transducteur récepteur par rapport au transducteur émetteur ont été prospectées. Un espacement d'environ 25 cm pour les supports en poutrelles en béton est considéré. Tandis que les dimensions des blocs de parpaings nous ont imposés un espacement d'environ 10cm. (fig II.13 et II.14).



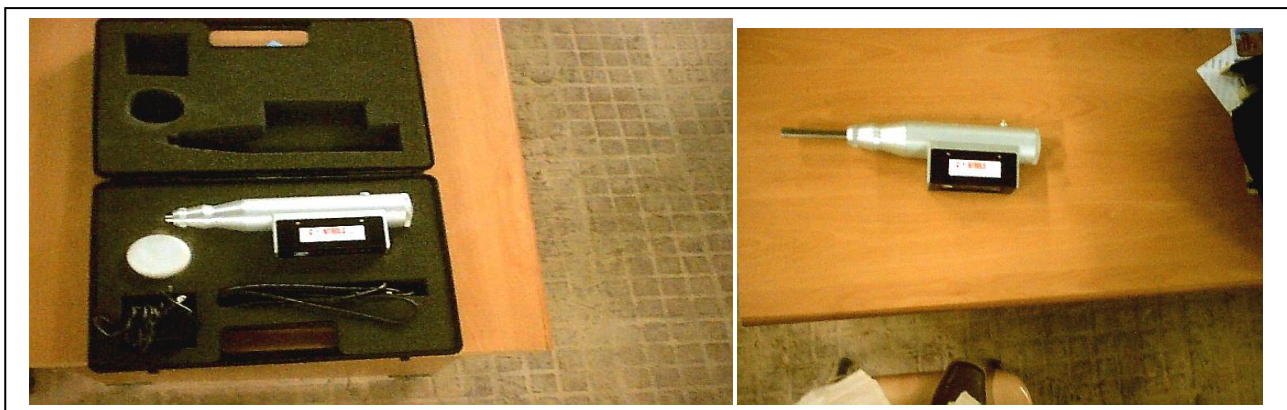
**Figure II.13 :** Photo des essais ultrasoniques sur le revêtement par le mortier préparé.



**Figure II.14 :** Photos des essais ultrasoniques sur revêtement par le mortier industriel prêt à l'emploi.

#### **II.4.2 Méthode sclérométrique (Résistance en compression) (NF P 18-17) [Dupain et al, 2009]**

L'utilisation du scléromètre sur les matériaux de construction, en particulier sur le béton, date de plusieurs décennies. Le scléromètre est le plus connu des appareils pour un contrôle rapide du béton. Appliqué sur une face de la partie à ausculter par une pression de la main, il permet à une petite masse mobile de rebondir plus ou moins en fonction de la dureté superficielle du béton. Il existe une relation assez nette entre la dureté superficielle et la résistance du béton.



**Figure II.15 :** Appareillage sclérométrique.

### II.4.2.1. Utilisation du scléromètre

Avant qu'on procède aux essais, il faut préparer la surface à tester en enlevant, si nécessaire, l'enduit appliqué, avec une pierre abrasive ou avec un autre moyen. Puis, il faut appliquer la tige perpendiculairement à la surface et appuyer le scléromètre d'une manière continue et uniforme contre la surface jusqu'à ce que la masselotte percute. Après l'impact, la masselotte rebondit en entraînant un curseur de référence. Plus le béton est dur, plus le curseur avancera. Lors de l'appui sur le bouton de blocage le curseur est maintenu dans sa position maximale et le capteur électronique relève sa position pour la transformer en valeur digitale. Pour effectuer un autre essai, il faut répéter les mêmes opérations [NF EN 12504-2, 2013], [Dupain et al, 2009].

*Remarque : Les essais sclérométriques ont été réalisés sur les éprouvettes identiques à celles des essais ultrasoniques et dans la même direction que celle du parcours ultrasonique.*



**Figure II.16 :** Utilisation du scléromètre

### II.4.3 Méthode destructive par écrasement (Résistance en compression)

L'écrasement des éprouvettes pour déterminer leurs résistances est réalisé par une presse de 3000 kN de capacité. L'essai, selon la norme [NF EN 12390-3, 2019], est réalisé en plaçant les éprouvettes entre les plateaux de la presse de telle façon que l'axe des sections de compression soit centré sur la rotule du plateau supérieur, et la charge appliquée doit croître (une vitesse de montée en charge constante de 0.5 MPa par seconde  $\pm$  0.2 MPa par seconde)

[Gorisse, 1978], jusqu'à la rupture et on mentionne le résultat d'essai d'écrasement selon la norme [Kedjour, 2003].



**Figure II.17** : La presse de compression.

Avant l'exécution de l'essai, on doit s'assurer de la planéité de surface de contact supérieure ainsi que de l'orthogonalité du cylindre. On a déposé entre les plateaux et les faces des éprouvettes du carton. Ceci dans le but de diminuer l'effet du frettage.

*Remarque* : les essais d'écrasement ont été réalisés sur les mêmes éprouvettes ayant servis aux essais ultrasoniques.

#### **II.4.4 Méthode destructive par arrachement (adhérence des mortiers)**

Cette méthode d'essais est appliquée pour déterminer la force des mortiers aux différents supports [Hollaway et Leeming, 1999]. On a utilisé un dynamomètre de traction (fig II.18) et l'essai d'arrachement consiste à coller un plot métallique sur la surface revêtue et à appliquer un effort de traction jusqu'à la rupture (Fig II.20 et II.21). Les plots utilisés dans le cadre de ce travail sont des plots en aluminium de 50 mm de large. La norme [NF EN 24624, 2016] recommande de réaliser une entaille dans le revêtement tout autour du plot jusqu'au substrat. La force appliquée sur le plot est progressivement augmentée à une vitesse constante, jusqu'à

une force maximale correspondant à la rupture. La force de traction est calculée comme le rapport de la force maximale sur la surface du plot.

Les essais effectués sur les supports ont été réalisés en plusieurs endroits des éprouvettes à des entraxes de 25 cm et 10 cm respectivement pour le béton et le parpaing. Ces endroits correspondent aux endroits d'acquisition des vitesses ultrasoniques.

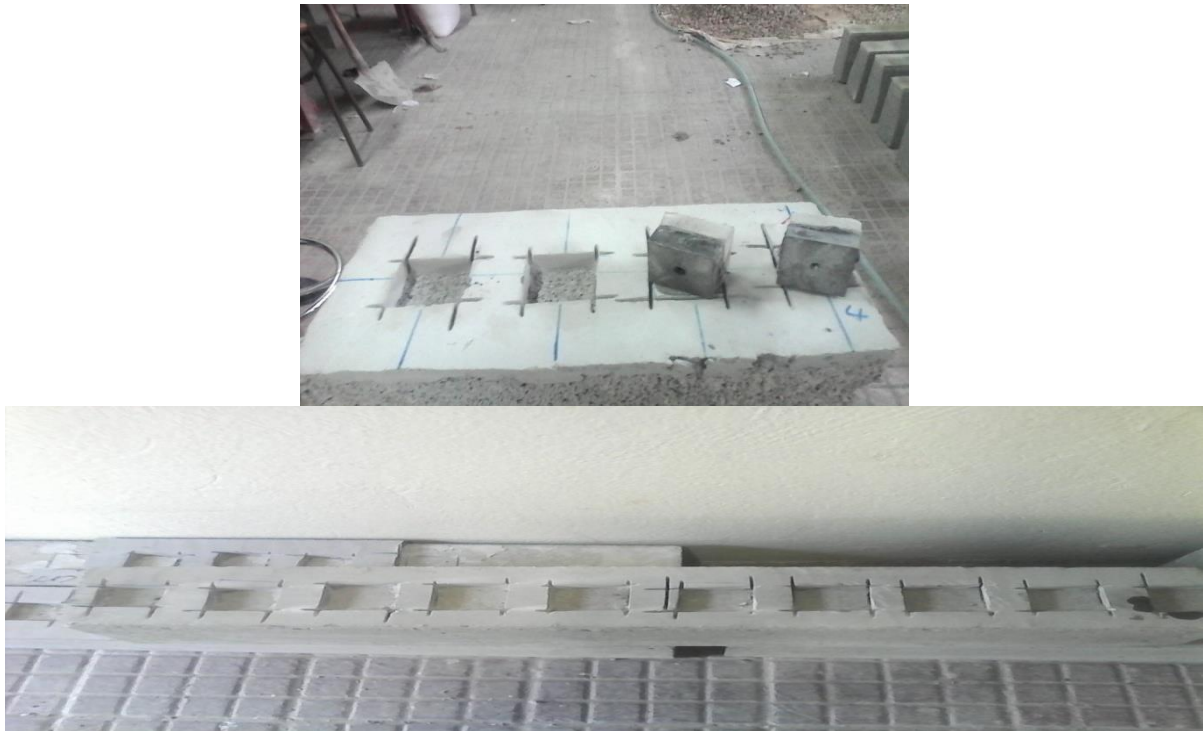


**Figure II.18 :** Photo du dynamomètre de traction

L'essai d'arrachement consiste à coller un plot métallique 5 x 5 cm sur la surface revêtue et à appliquer un effort de traction jusqu'à la rupture, par un dynamomètre de traction en chaque position.



**Figure II.19 :** Photo de l'essai d'arrachement.



**Figure II.20 :** Photos des ruptures lors des essais destructifs (arrachement) sur le mortier préparé.



**Figure II.21 :** Photos des ruptures lors des essais destructifs (arrachement) sur le mortier industriel prêt à l'emploi

## II.5 Conclusion

Les deux volets de cette étude expérimentale concernent la détermination de la résistance du béton et l'adhérence des mortiers.

Le premier volet concerne la résistance des bétons par une détermination non destructive par les ultrasons et par le scléromètre, et une autre destructive par écrasement. Les paramètres variables de ce volet concernent la composition des bétons, la forme des éprouvettes et le type des transducteurs.

Le second volet concerne la détermination de l'adhérence des mortiers par les ultrasons et ensuite par arrachement. Les paramètres variables de ce volet concernent la nature et l'épaisseur du mortier, la nature du support ainsi que le type et l'espacement des transducteurs.

## Chapitre III :

# *Estimation de la résistance des bétons par les essais ultrasoniques et sclérométriques*

## **Chapitre III : Estimation de la résistance des bétons par les essais ultrasoniques et sclérométriques**

### **III.1 Introduction**

Dans ce chapitre nous présenterons l'analyse des différents résultats relatifs aux essais non destructifs par les ultrasons et le scléromètre ainsi que ceux des essais destructifs par écrasement. On s'intéresse aussi aux corrélations entre les résultats de ces différents essais. Les paramètres variables concernent la composition des bétons, les dimensions des éprouvettes (donc le parcours des ondes ultrasoniques) et le type des transducteurs (forme et fréquence).

### **III.2 Evolution des vitesses des ondes ultrasoniques**

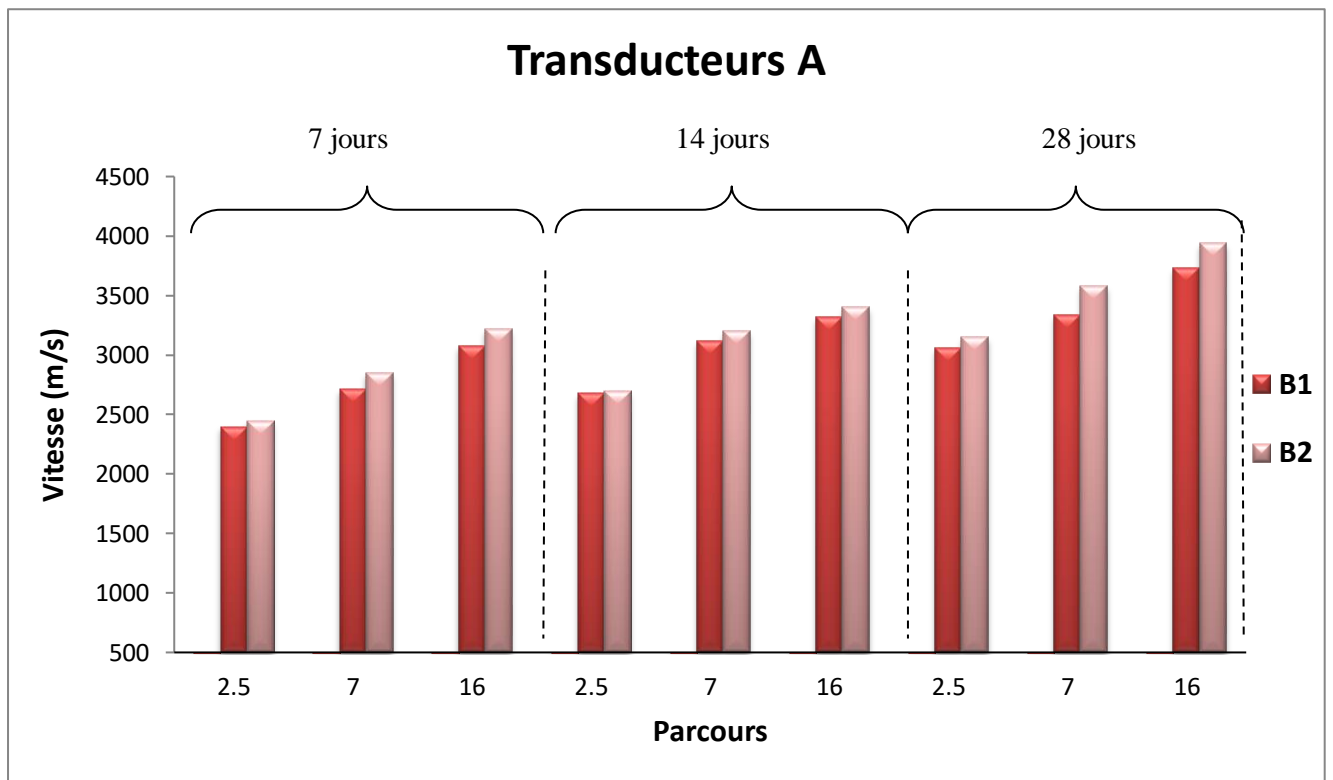
Les essais ultrasoniques ont été effectués selon la procédure d'essais mentionnée dans le chapitre II sur des éprouvettes prismatiques de différentes dimensions pour deux compositions de béton et par différents types de transducteurs (fréquences, diamètres).

#### **III .2.1 Effet du type de béton**

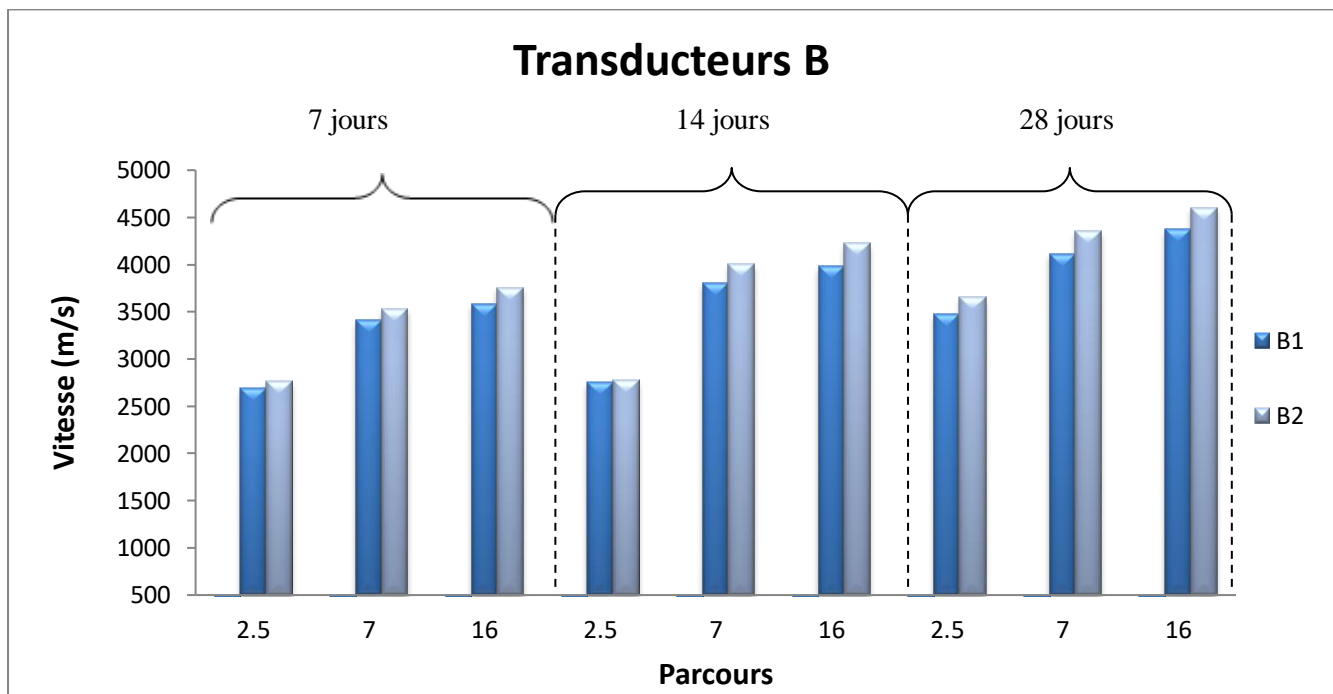
Les figures III.1 à III.4 et le tableau III.1 donnent l'évolution de la vitesse des ondes ultrasoniques pour les deux compositions des bétons (B1, B2) conservés à l'air libre pour les quatre transducteurs (A, B, C et B') et les différents parcours (2.5, 7 et 16 cm) relatifs aux différentes éprouvettes à 7,14 et 28 jours.

**Tableau III.1.** Vitesses ultrasoniques des différents bétons

Vitesse (m/s)						
Parcours	2.5 cm	2.5 cm	7 cm	7cm	16 cm	16 cm
<b>Transducteurs A</b>						
Bétons	B1	B2	B1	B2	B1	B2
<b>7 jours</b>	2397,33 ± 72,50	2443 ± 50	2714 ± 65,50	2851,33 ± 69,50	3078,16 ± 64	3213,83 ± 44,50
<b>14 jours</b>	2675 ± 79,50	2691,25 ± 73,50	3120,75 ± 45	3199 ± 34,50	3317,25 ± 29,50	3401,5 ± 18
<b>28 jours</b>	3060 ± 24,50	3151 ± 14	3336 ± 11	3583 ± 15	3725 ± 11	3940 ± 18
<b>Transducteurs B</b>						
Bétons	B1	B2	B1	B2	B1	B2
<b>7 jours</b>	2692 ± 43	2765,50 ± 18,50	3413,33 ± 40	3535 ± 36,50	3587,5 ± 55,50	3758,33 ± 55
<b>14 jours</b>	2754 ± 50	2782,5 ± 58,50	3802 ± 42,50	4005 ± 75,50	3982 ± 27	4231 ± 63,50
<b>28 jours</b>	3479,5 ± 44,50	3655,5 ± 44,50	4114 ± 29	4355,5 ± 31,50	4375 ± 21	4604,5 ± 17,50
<b>Transducteurs C</b>						
Bétons	B1	B2	B1	B2	B1	B2
<b>7 jours</b>	2482,33 ± 65,50	2604 ± 36,50	3021 ± 121,50	3191 ± 41,50	3314,5 ± 99	3447 ± 55,50
<b>14 jours</b>	2704 ± 22	2761 ± 50	3324 ± 36	3580 ± 41	3653 ± 44	3754 ± 36,50
<b>28 jours</b>	3259 ± 8,50	3394 ± 31,50	3832 ± 33,50	3968 ± 48,50	4109 ± 24,50	4245 ± 41,50
<b>Transducteurs B'</b>						
Bétons	B1	B2	B1	B2	B1	B2
<b>7 jours</b>	956 ± 35,50	925 ± 18	1676 ± 59	1697 ± 55	2316 ± 58,50	2488 ± 95
<b>14 jours</b>	950 ± 13,50	928 ± 17	1679 ± 26,50	1701 ± 15	2372 ± 29	2595 ± 40
<b>28 jours</b>	1110 ± 15	1265 ± 40	1780 ± 10	1770 ± 20	2445 ± 5	2870 ± 10



**Figure III.1.** Evolution des vitesses ultrasoniques des différents bétons - transducteurs A -



**Figure III.2.** Evolution des vitesses ultrasoniques de différents bétons - transducteurs B -

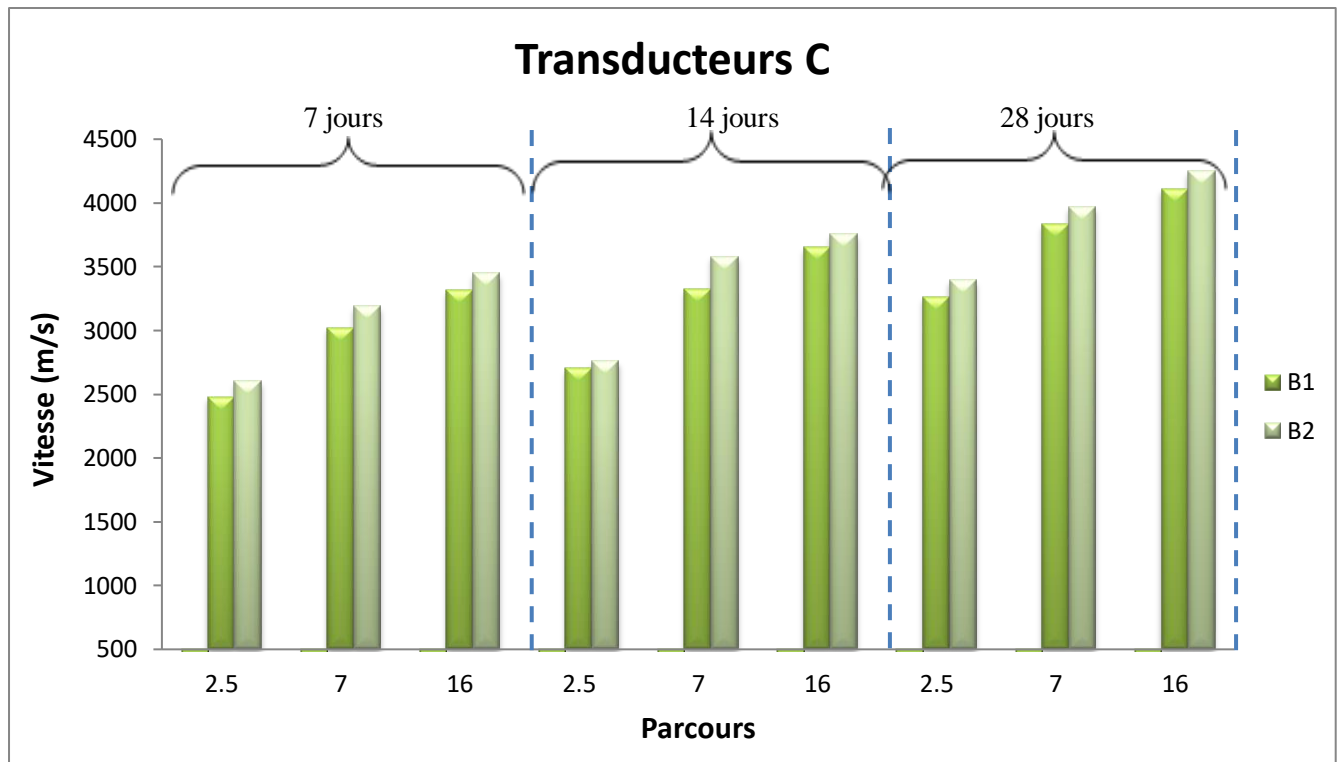


Figure III.3. Evolution des vitesses ultrasoniques de différents bétons - transducteurs C -

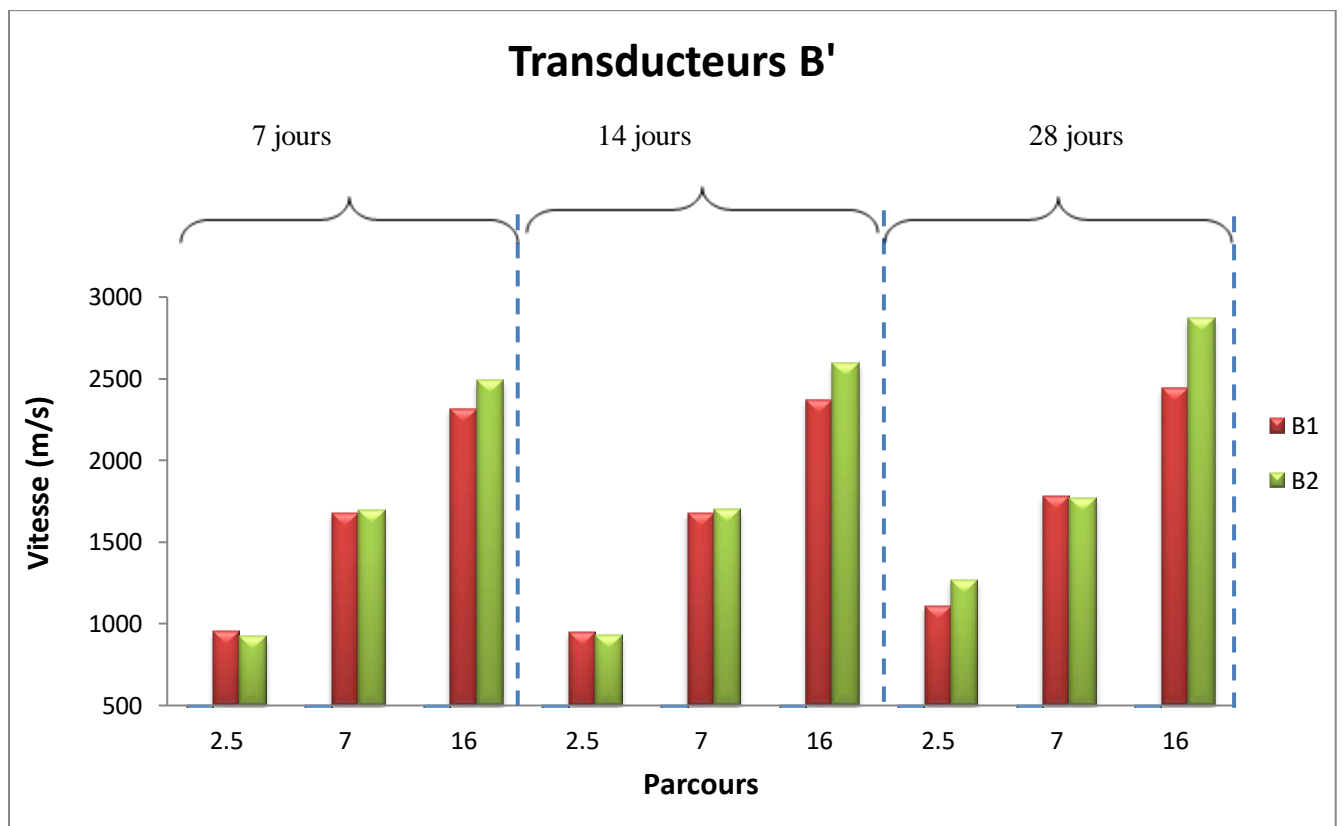


Figure III.4. Evolution des vitesses ultrasoniques de différents bétons - transducteurs B' -

Les bétons de la deuxième composition (B2) présentent des vitesses ultrasoniques supérieures à celles de la première composition (B1) pour l'ensemble des cas. Ces différences dépassent les 17% à 28 jours pour les transducteurs « B' ». En effet, comme il est indiqué dans plusieurs recherches [Bayan et al, 2016] [Lin et al, 2003], l'évolution des vitesses ultrasoniques est fonction de la densité du béton. Le béton B2 présente une densité supérieure à celle du béton B1 de 35%. Cette différence de densité est due principalement au volume des gros granulats qui est plus important dans le cas du béton B2. La deuxième composition compte 45% de graviers en plus que la première composition. Cette différence est aussi dûe à l'effet de la grosseur des graviers. Le béton B2 contient moins de gros gravier (15/25) que le béton B1. En effet, la taille des granulats a un effet inverse sur la vitesse ultrasonique comme l'avancent Khademi et al. [Khademi et al, 2016].

### III.2.2 Effet de l'âge des bétons

L'âge joue un rôle dans l'évolution des vitesses des ondes ultrasoniques. En effet plusieurs recherches se sont intéressées au suivi de la maturation des bétons par les vitesses ultrasoniques [Yousfi et al, 2019] [Lee et Lee, 2020].

Les figures III.5-III.7 montrent l'effet de l'âge sur l'évolution des vitesses ultrasoniques pour les trois parcours et les deux compositions. Les vitesses ultrasoniques subissent des augmentations moyennes de 10% et 25% respectivement à 14 et 28 jours pour les trois parcours et les transducteurs A, B et C. Les transducteurs « B' » donnent des évolutions des vitesses faibles avec le temps et même des perturbations pour le premier parcours (2.5 cm). Ces derniers transducteurs ont un faible diamètre (7 mm), ce qui accentue le phénomène de diffraction du faisceau [Ploix, 2006] [Redouane, 2005]. En effet, les dimensions finies de la source utilisée pour générer les ultrasons implique un phénomène de divergence du champ ultrasonore émis. Dans le cas d'une source circulaire de diamètre  $D$  (cas des transducteurs utilisés dans notre étude), l'ouverture du faisceau peut être calculée par le biais de la formule :

$$\sin \theta = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (\text{III.1})$$

Avec  $D$  diamètre du transducteur et  $\lambda$  la longueur d'onde.

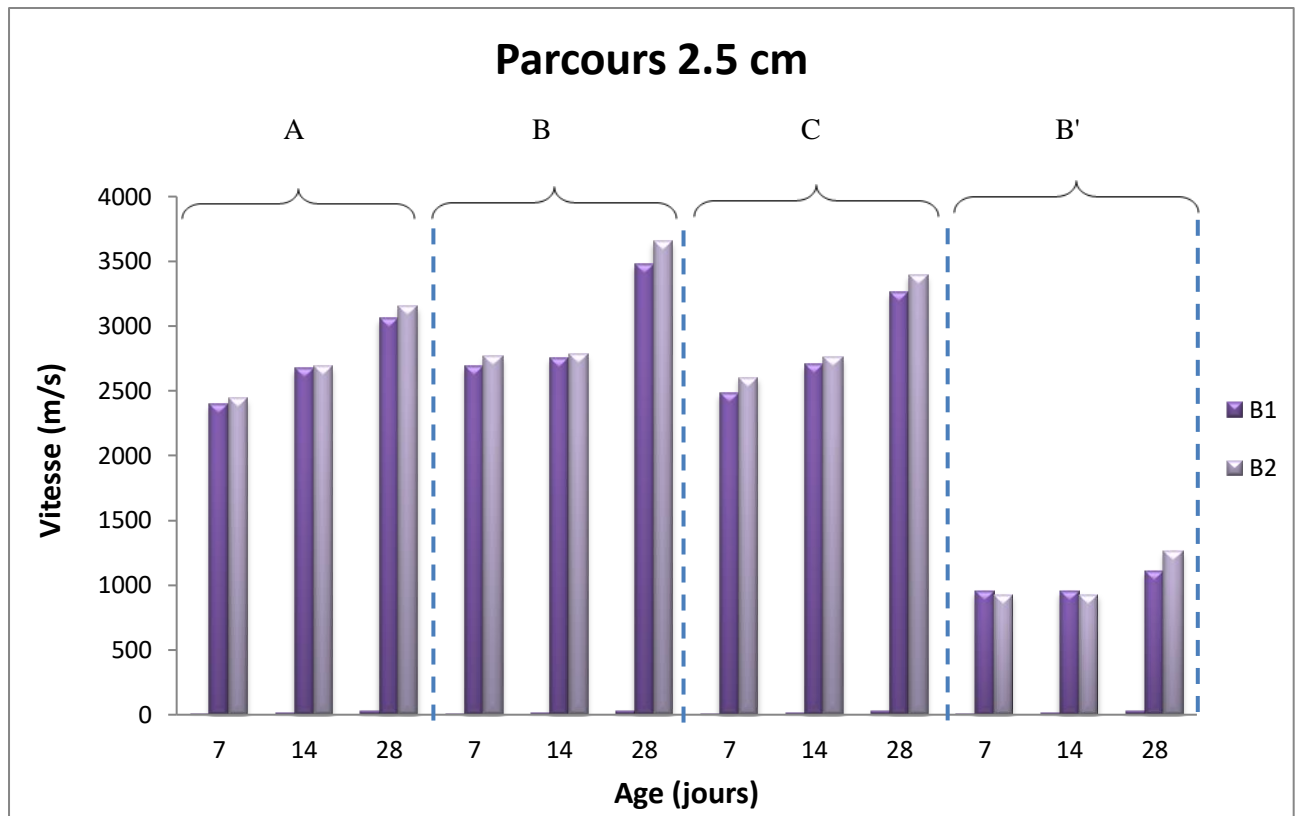


Figure III.5. Evolution des vitesses ultrasoniques de différents bétons –Parcours 2.5 cm

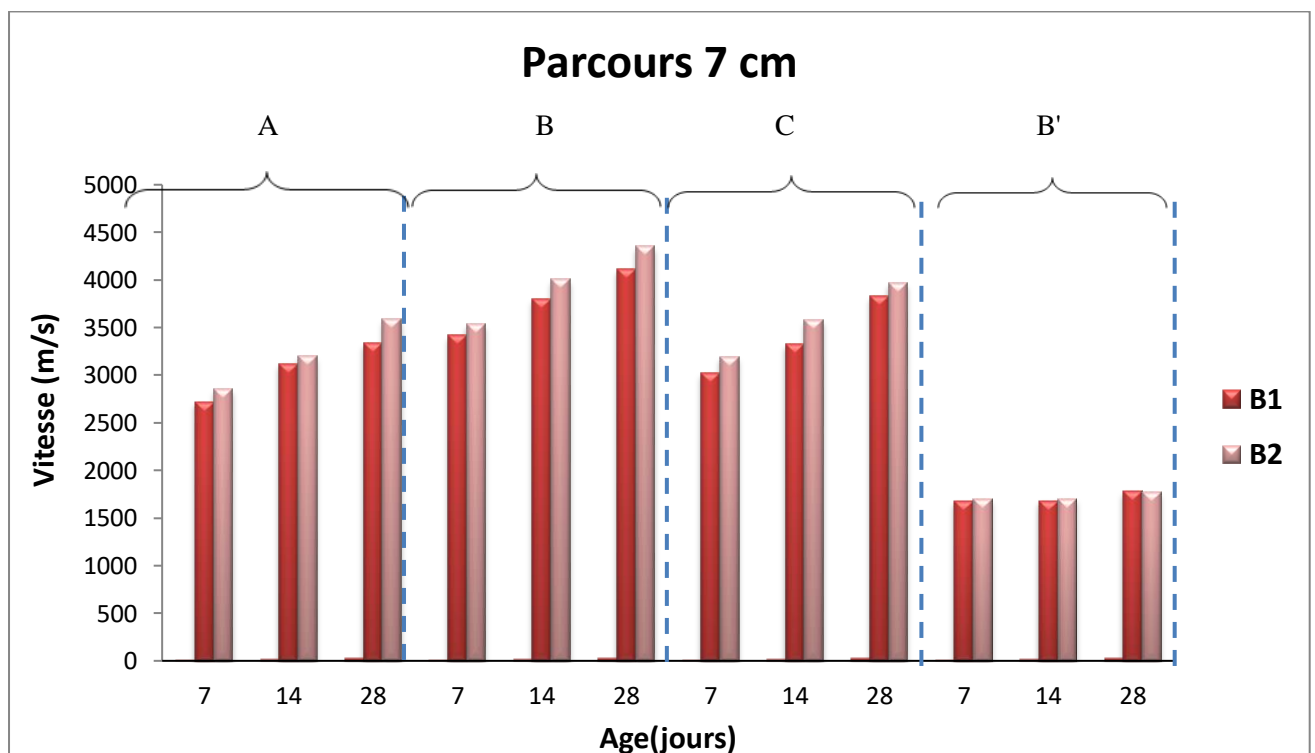
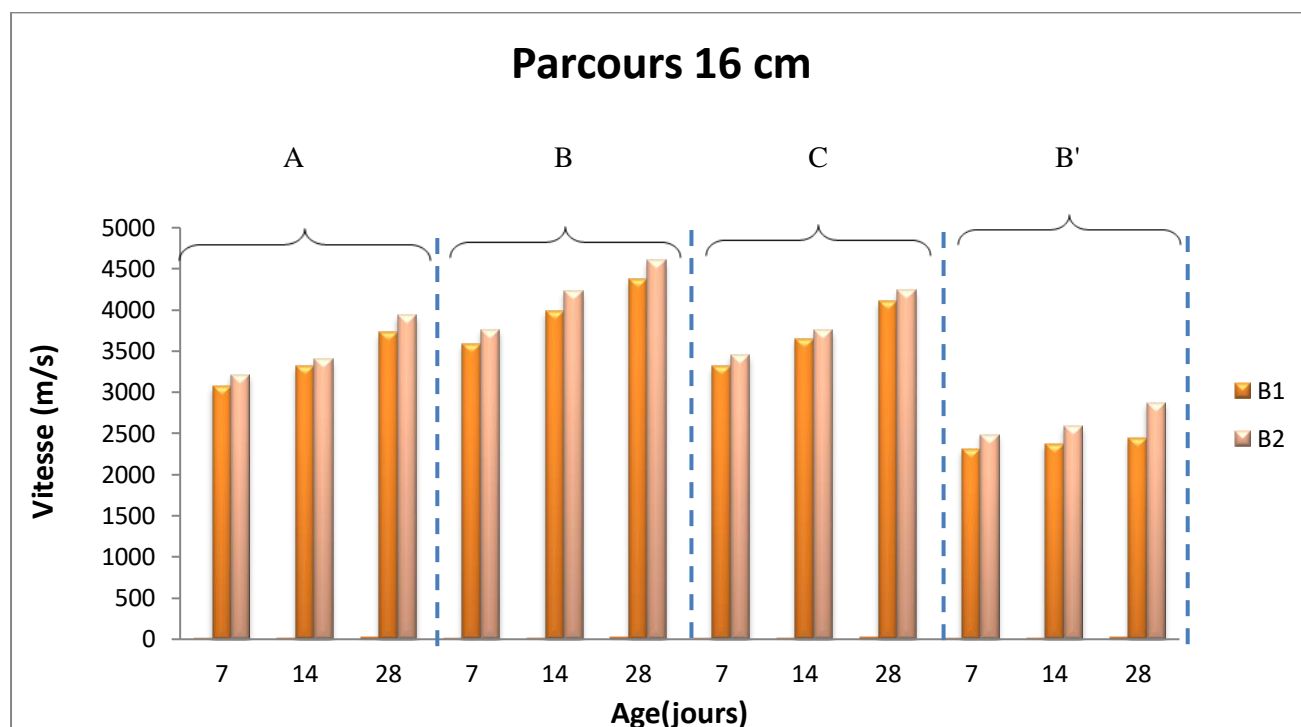


Figure III.6. Evolution des vitesses ultrasoniques de différents bétons –Parcours 7 cm



**Figure III.7.** Evolution des vitesses ultrasoniques de différents bétons –Parcours 16 cm

### III.2.3 Effet du type des transducteurs (fréquences et diamètres)

L'effet du type de transducteurs sur l'évolution des vitesses ultrasoniques est illustré sur les figures III.8 et III.9.

Nous avons utilisé dans cette étude quatre types de transducteurs qui se différencient par le diamètre et la fréquence (tab II.8 et fig. II.11). La fréquence et le diamètre des transducteurs influencent la vitesse de transmission des ultrasons comme indiqué dans plusieurs études [Yu et al, 2011] [Marvila et al, 2019].

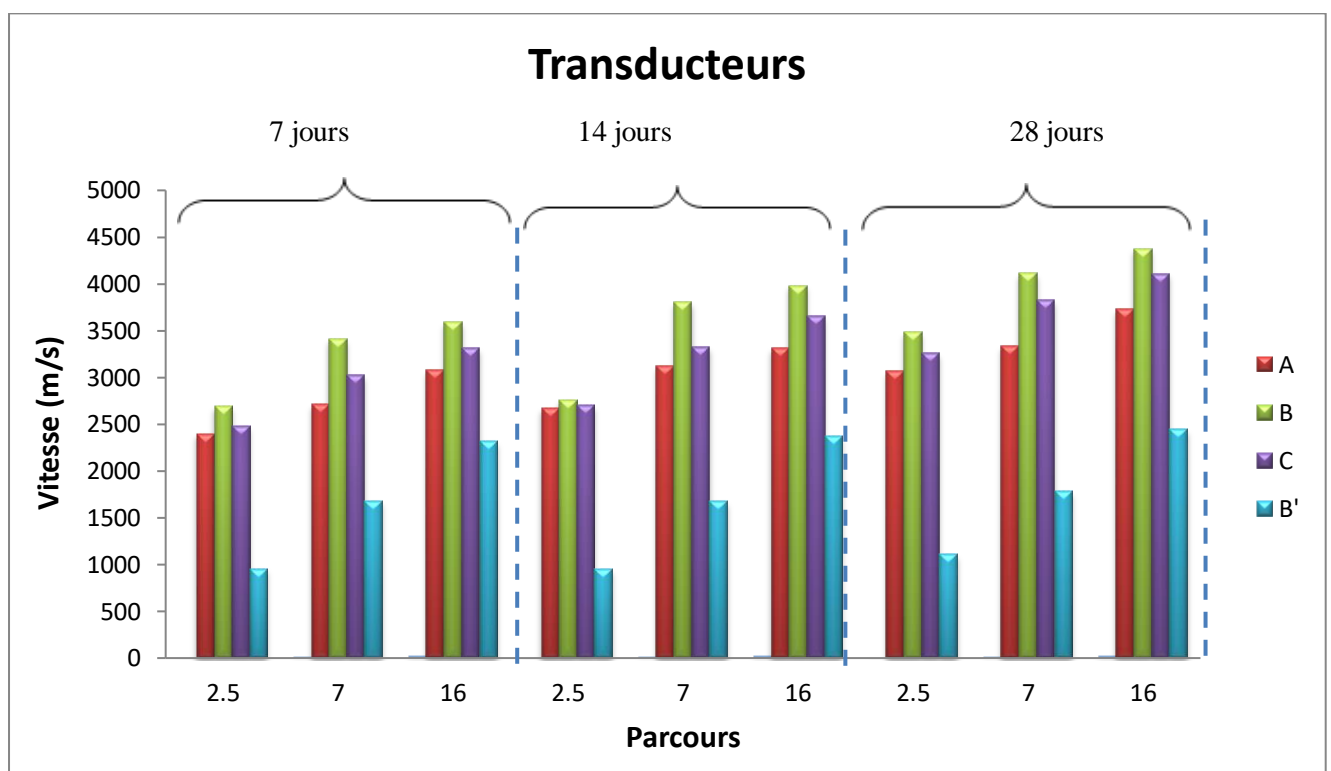
Les transducteurs « B » donnent les valeurs les plus importantes des vitesses ultrasoniques. Seulement ces vitesses sont proches de celles acquises par les transducteurs « A » et « C ».

Les vitesses les plus faibles sont celles des transducteurs « B' ». Ces derniers présentent des chutes importantes des vitesses, par rapport à celles des transducteurs « B » pour le parcours 2.5 cm, de 181%, 190% et 213% respectivement à 7, 14 et 28 jours pour le béton B1. Le béton B2 présente aussi des chutes similaires de ses vitesses acquises par ces transducteurs « B' » pour le même parcours.

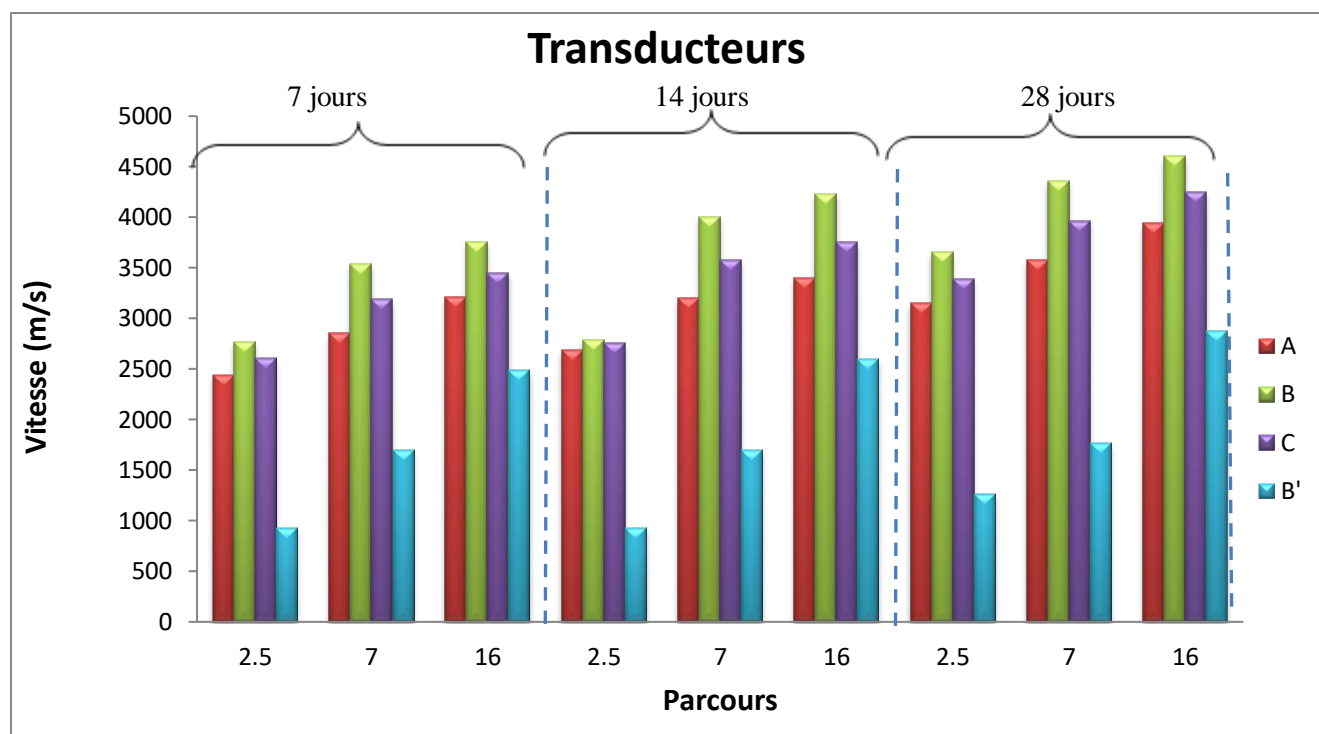
L'augmentation du parcours contribue à diminuer ces chutes de vitesses. On observe une diminution de ces chutes avoisinant les 50 % et 75 % pour les parcours de 7 cm et 16 cm respectivement.

Donc, le fait de diminuer le diamètre de 7 fois (de  $\varnothing_B = 49$  mm à  $\varnothing_{B'} = 7$  mm) conduit à ces chutes des vitesses alors que la variation de la fréquence (pour les bandes utilisées) a provoqué des variations faibles des vitesses. Donc, on remarque bien que le diamètre des transducteurs impacte plus les résultats des vitesses que les fréquences utilisées.

Selon des études, l'augmentation du diamètre des transducteurs donne une faible divergence du faisceau ultrasonore, d'où une meilleure précision et une moindre perturbation des mesures des vitesses par ces transducteurs [Benouis et Grini, 2011] [Mehamdia et Benouis, 2018]



**Figure III.8** Effet du type des transducteurs sur l'évolution des vitesses ultrasoniques  
– béton B1 -



**Figure III.9** Effet du type des transducteurs sur l'évolution des vitesses ultrasoniques  
– béton B2 -

### III.2.4 Effet de la distance du parcours des ondes ultrasoniques

La distance du parcours a un effet non négligeable sur la mesure des vitesses ultrasoniques. En effet, on remarque que les vitesses ultrasoniques augmentent avec la distance parcourue par les ondes (fig. III.10 et III.11). Ceci est valable pour tous les transducteurs et les deux compositions du béton (B1 et B2) et à tous les âges (7, 14 et 28 jours)

La distance du parcours des ondes impacte différemment l'évolution des vitesses selon le type des transducteurs. Les vitesses moyennes acquises par les transducteurs « A » présentent des augmentations entre les parcours de 2.5 cm et 7 cm de 13%, 17% et 9% respectivement à 7, 14 et 28 jours pour le béton B1. Entre les parcours de 7 cm et 16 cm, ces augmentations sont 13%, 6% et 12%. Les transducteurs « B » et « C » donnent des augmentations des vitesses entre les parcours 2.5cm et 7 cm et entre 7cm et 16 cm respectivement 27%, 5% à 7 jours, 38%, 5% à 14 jours et 18%, 5% à 28 jours.

Quant aux transducteurs « B' », ils donnent les plus importantes augmentations des vitesses avec l'augmentation du parcours. Ces augmentations des vitesses pour le béton B1 sont, entre les parcours 2.5cm et 7 cm et entre 7cm et 16 cm, respectivement 75%, 38% à 7 jours, 77%, 41% à 14 jours et 60%, 37% à 28 jours.

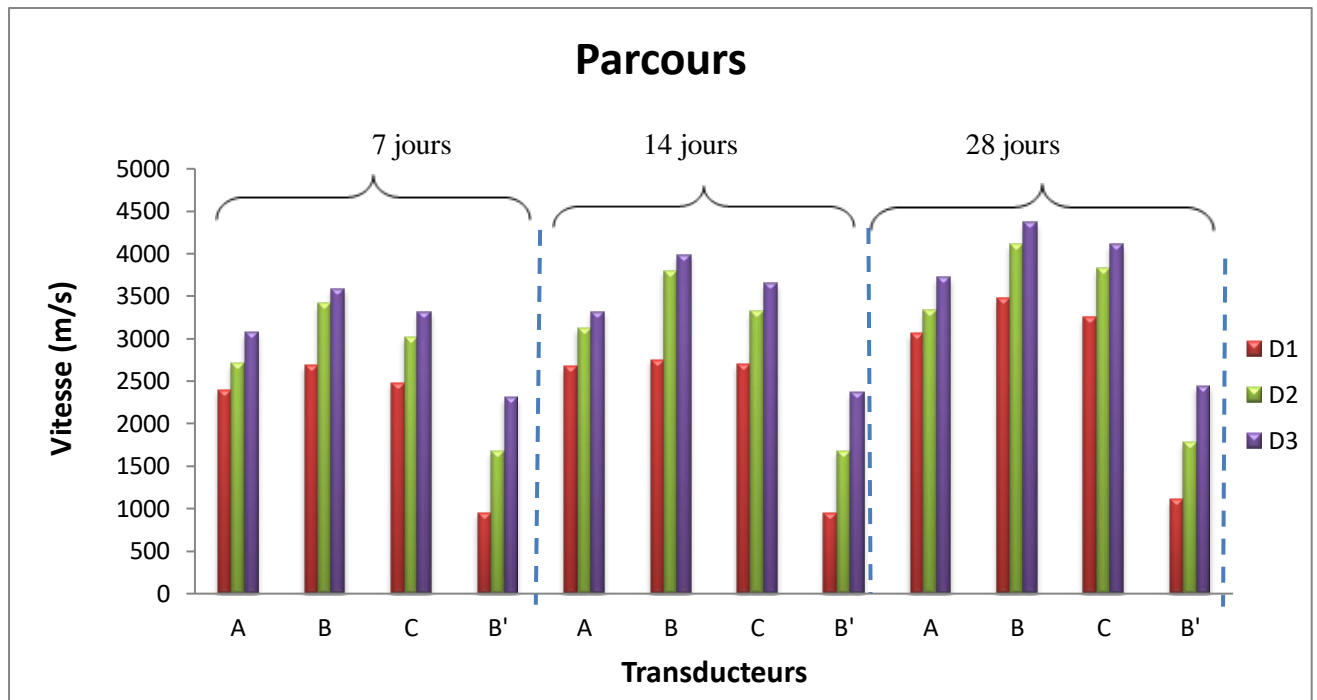
Les augmentations des vitesses provoquées par la distance du parcours des ondes ultrasoniques du béton B2 sont similaires à celles du béton B1.

Donc, on remarque l'importance du choix des dimensions des éprouvettes pour ce genre d'essais non destructifs vis des propriétés des transducteurs utilisés.

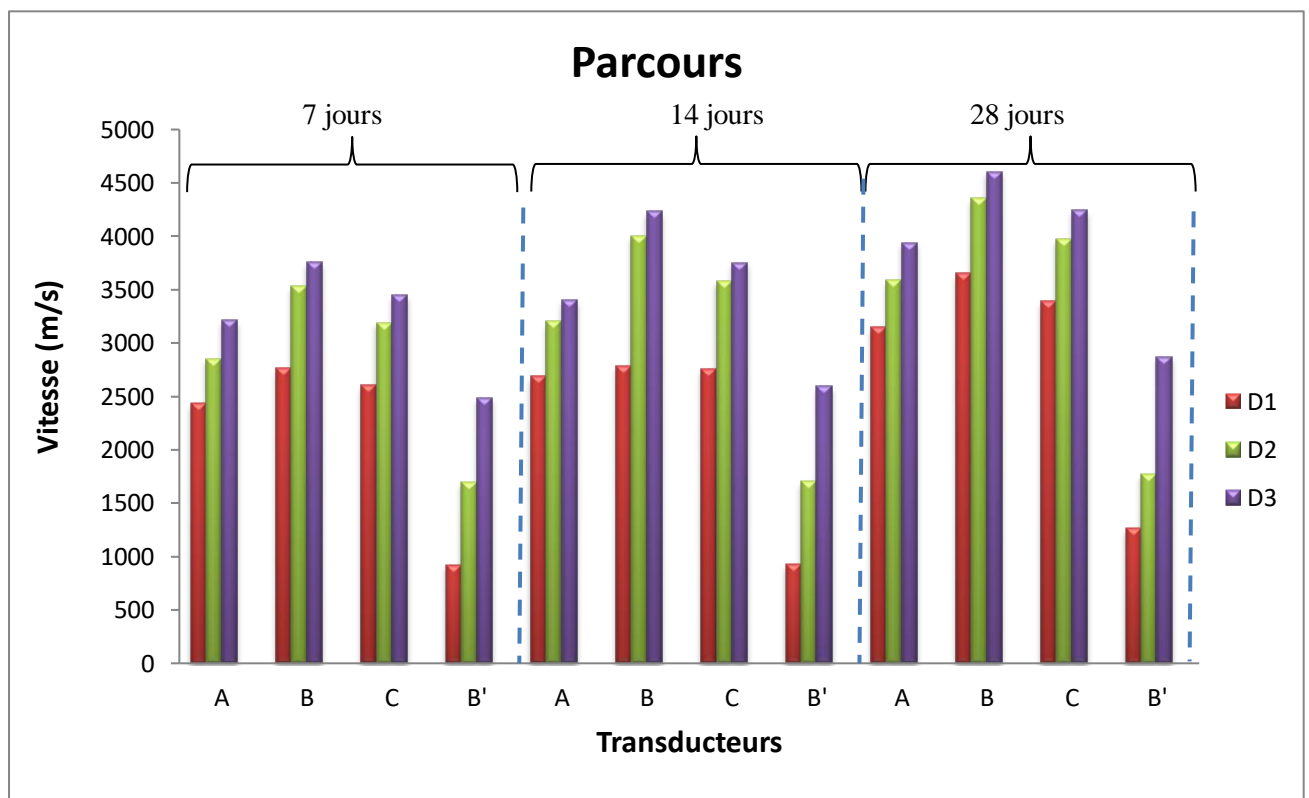
En effet, la fréquence des transducteurs est en étroite liaison avec la distance du parcours. La vitesse de propagation peut être réduite de manière appréciable si la dimension de l'éprouvette est inférieure à une valeur minimale. Cette réduction dépend du rapport entre la longueur d'ondes et la plus petite dimension latérale de l'éprouvette. Cette réduction est insignifiante si ce rapport est inférieur à l'unité. En ce qui concerne l'incidence des dimensions des éprouvettes sur la transmission de l'impulsion ultrasonique, la norme [EN 12504-4, 2005] préconise des dimensions minimales des éprouvettes, pour un béton ordinaire de vitesse 3500 m/s, en fonction des fréquences utilisées. Ces dimensions sont respectivement 146 mm, 65 mm et 23 mm respectivement pour les fréquences 24 kHz, 54 kHz et 150 kHz.

Donc, pour les différents transducteurs, la dimension de l'éprouvette 2.5 cm ne convient pas aux transducteurs utilisés. Même pour la fréquence de 150 kHz, cette dimension du parcours est limite. On remarque que les augmentations des vitesses les plus faibles sont celles entre les parcours 7 cm et 16 cm pour les transducteurs « B » et « C ». En effet ces dimensions sont conformes aux dimensions minimales des éprouvettes (65 mm pour la fréquence de 54 kHz et 23 mm pour la fréquence de 150 kHz).

Les transducteurs « B' », de fréquence 54 kHz présentent des augmentations plus faibles entre les parcours 7 cm et 16 cm qu'entre les parcours 7 cm et 16 cm. Mais ces augmentations restent importantes comparativement aux précédentes. Ceci est dû au faible diamètre de ces transducteurs (7.5 mm).



**Figure III.10.** Effet du parcours des ondes sur l'évolution des vitesses ultrasoniques  
– béton B1 -



**Figure III.11.** Effet du parcours des ondes sur l'évolution des vitesses ultrasoniques  
– béton B2 -

### III.3 Evolution des résistances sclérométriques

Les essais sclérométriques ont été effectués selon la procédure d'essais mentionnée dans le chapitre II sur des éprouvettes prismatiques de différentes dimensions pour deux compositions de béton (B1 et B2) comme pour les essais ultrasoniques

#### III.3.1 Effet du type de béton

Les figures III.12 à III.15 et le tableau III.2 donnent l'évolution des résistances sclérométriques pour les deux compositions de bétons (B1, B2) pour les différents types d'éprouvettes (1, 2 et 3) aux âges 7, 14 et 28 jours.

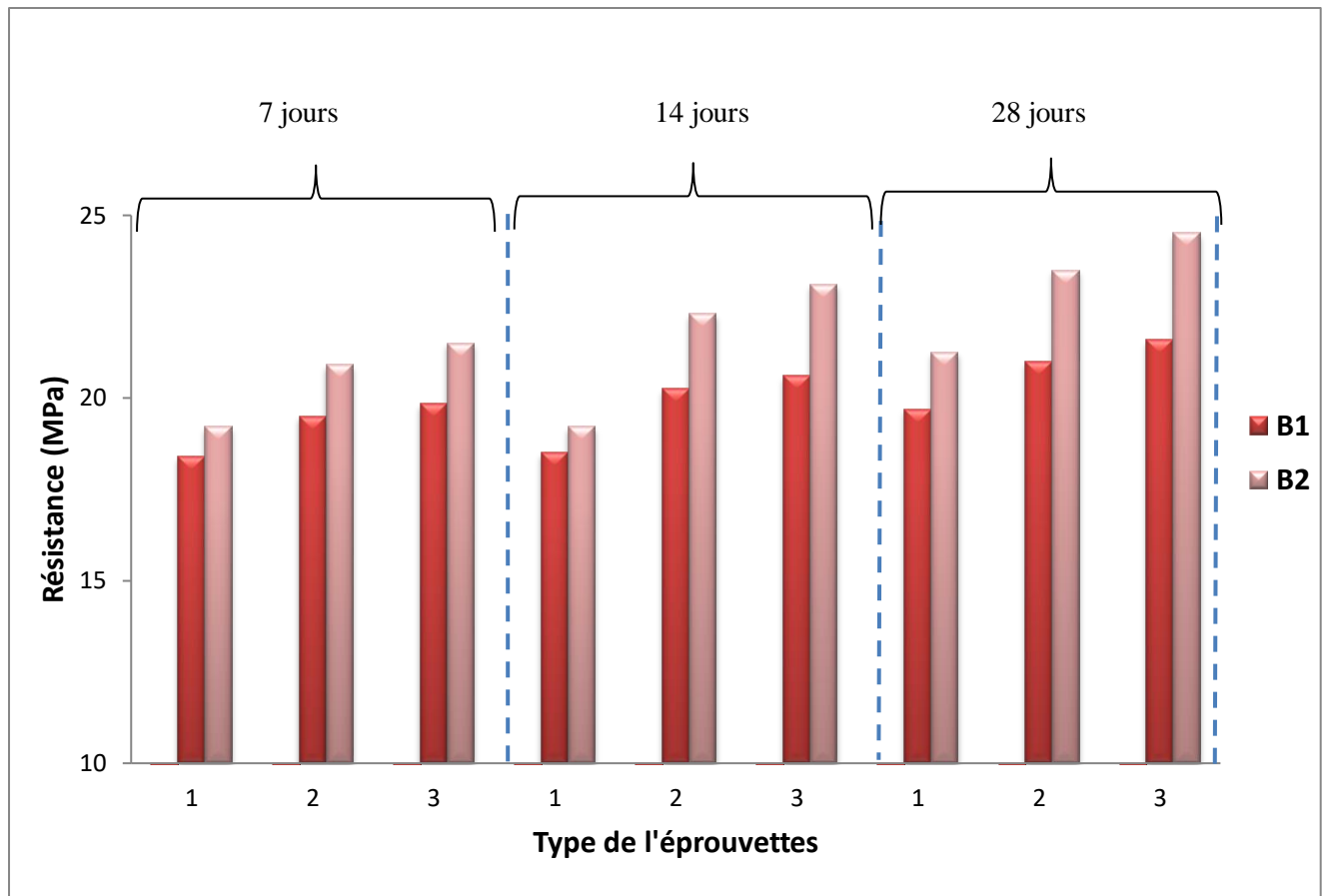
**Tableau III.2.** Résistances sclérométriques des différents bétons

Résistance (MPa)						
Type de l'éprouvette	1	1	2	2	3	3
Bétons	B1	B2	B1	B2	B1	B2
<b>7 jours</b>	18,40	19,20	19,50	20,90	19,85	21,50
	± 0,08	± 0,04	± 0,04	± 0,03	± 0,05	± 0,04
<b>14 jours</b>	18,50	19,22	20,25	22,30	20,60	23,10
	± 0,08	± 0,06	± 0,05	± 0,02	± 0,04	± 0,06
<b>28 jours</b>	19,70	21,25	21,00	23,50	21,60	24,50
	± 0,05	± 0,06	± 0,06	± 0,02	± 0,03	± 0,02

Le béton 2 présente des résistances sclérométriques supérieures à celles du béton 1 à tous les âges et pour les trois types d'éprouvettes. Ces différences de résistances sont, à 7 jours, 4 %, 7% et 8% respectivement pour les éprouvettes de type 1, 2 et 3. Ces différences subissent de légères différences à 14 et 28 jours et sont 4%, 10%, 12% et 8%, 12%, 13,5%.

Donc, l'effet de la composition du béton est plus important avec le murissement du béton.

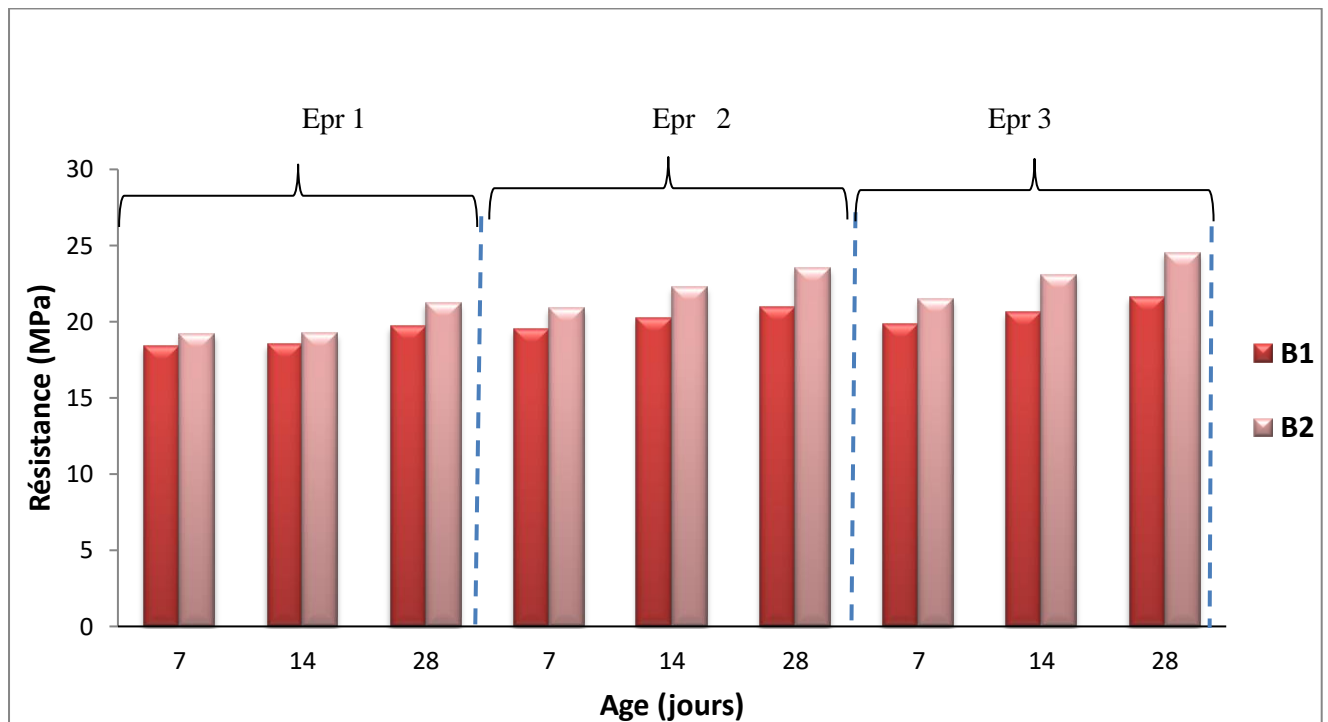
Le béton 2 présente une densité supérieure à celle du béton 1 par l'incorporation de plus de graviers. La résistance sclérométrique est liée à la dureté du matériau, donc un rebondissement du marteau de Schmidt dans le cas du béton B2 supérieur à celui du béton B1.



**Figure III.12.** Evolution des résistances sclérométriques des différentes éprouvettes des bétons

### III.3.2 Effet de l'âge des bétons

Les résistances sclérométriques évoluent avec l'âge des bétons mais en fonction du type d'éprouvette. Les éprouvettes les plus volumineuses présentent les évolutions les plus importantes. Les augmentations des résistances du béton B1, entre 7 jours et 28 jours, sont respectivement 7%, 8% et 9% pour les éprouvettes de type 1, 2 et 3. Celles du béton B2 sont 11%, 12% et 14% pour les mêmes éprouvettes.

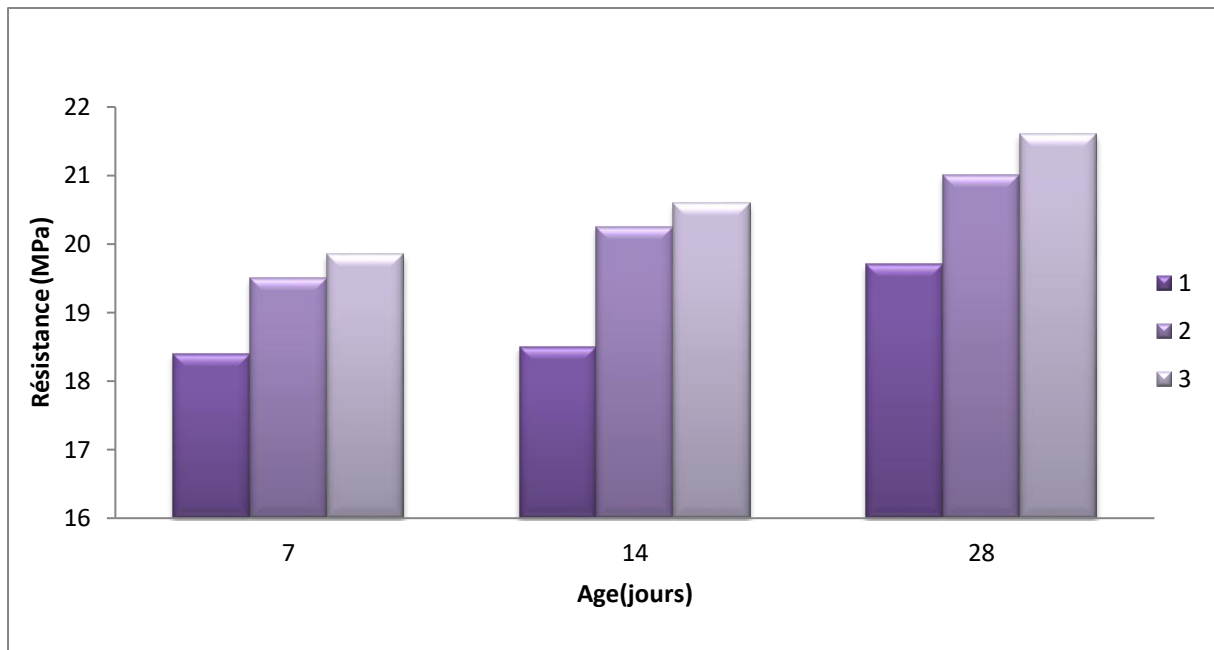


**Figure III.13.** Effet de l'âge des éprouvettes sur l'évolution des résistances sclérométriques des différents bétons

### III.3. 3 Effet du type de l'éprouvette

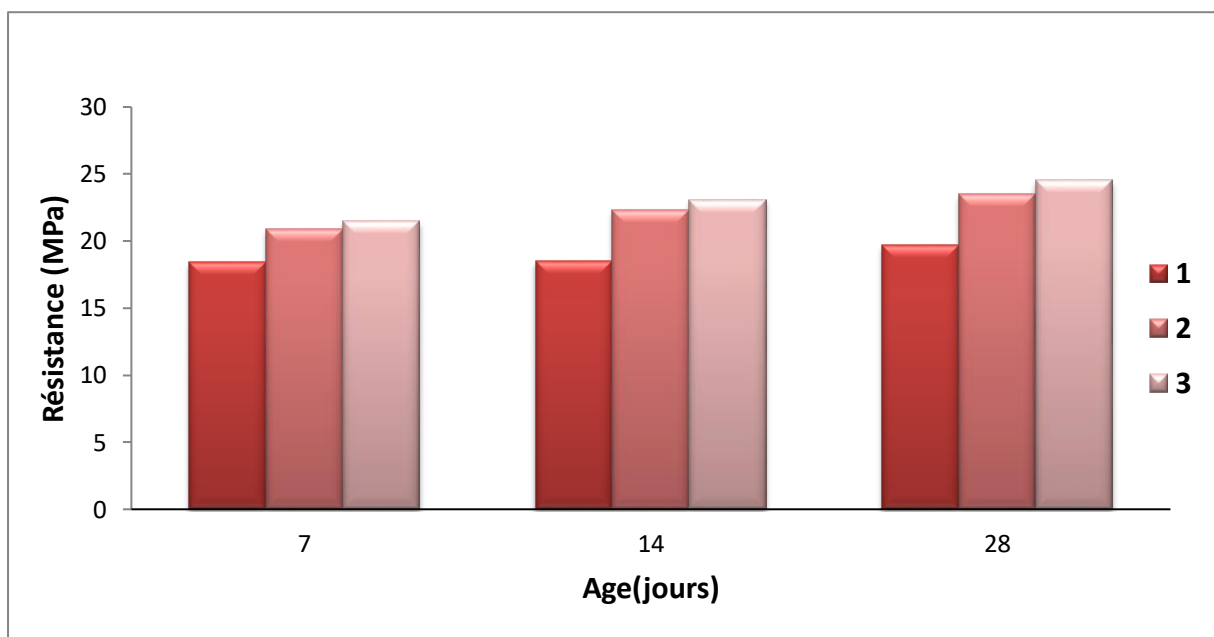
Les résistances des éprouvettes sont liées à leurs volumes pour tous les âges et les deux compositions. Les résistances sclérométriques des éprouvettes de type 2 ont des augmentations entre 6 à 16 % par rapport aux résistances des éprouvettes de type 1.

Ces augmentations diminuent en passant des éprouvettes 2 à celles de type 3 avec des gains entre 1.7 et 3.4%. On note que les éprouvettes de type 2 sont 2.8 fois plus importantes que celles du type 1. Alors que ce rapport entre les éprouvettes de type 3 et celles de type 2 n'est que 2.3.



**Figure III.14.** Effet du type d'éprouvette sur l'évolution des résistances sclérométriques

-béton –B1-



**Figure III.15.** Effet du type d'éprouvette sur l'évolution des résistances sclérométriques

-béton –B2-

### III.4 Evolution des résistances par écrasement

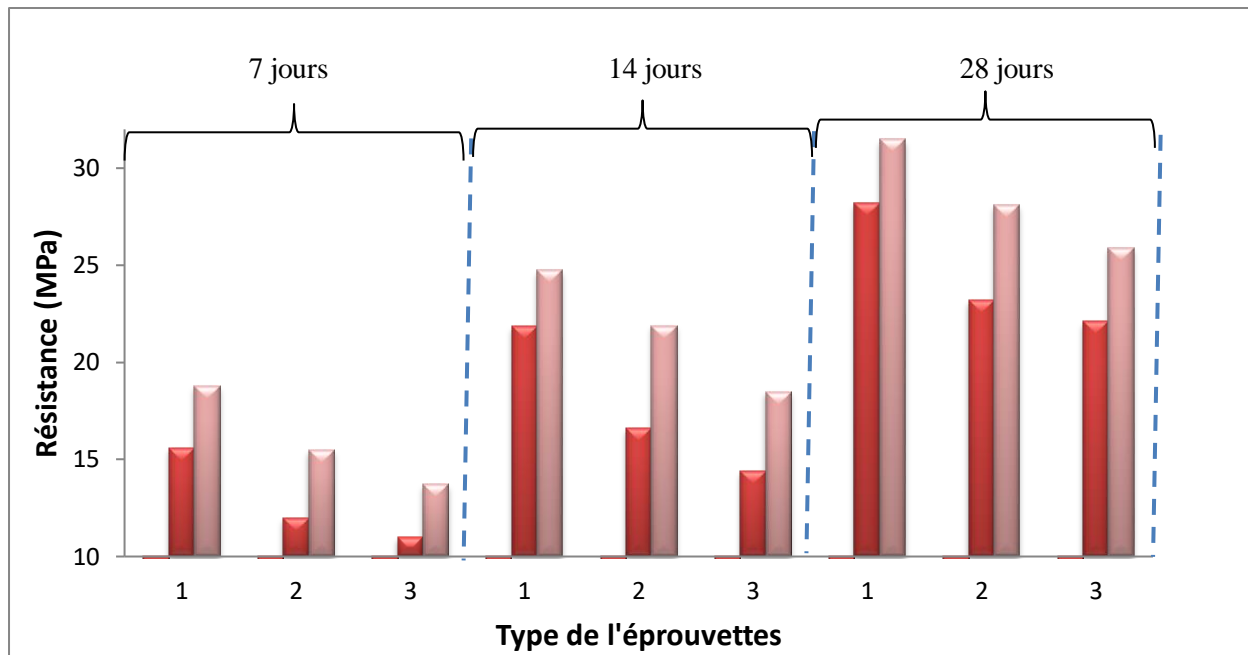
Les essais d'écrasement, pour déterminer la résistance à la compression, ont été effectués selon la procédure d'essais mentionnée dans le chapitre II sur les mêmes éprouvettes prismatiques de différentes utilisées pour les essais ultrasoniques.

#### III.4.1 Effet du type de béton

Les figures III .16 à III.19 et le tableau III.3 donnent l'évolution des résistances par écrasement pour les deux compositions de bétons (B1, B2) pour les différents types d'éprouvettes (1,2 et 3) aux âges 7, 14 et 28 jours.

**Tableau III.3.** Résistances à la compression par écrasement des différents bétons

Résistance (MPa)						
Type de l'éprouvette	1	1	2	2	3	3
Bétons	B1	B2	B1	B2	B1	B2
<b>7 jours</b>	15,60	18,80	12,00	15,50	11,00	13,70
	± 0,48	± 0,60	± 0,56	± 0,55	± 0,65	± 0,44
<b>14 jours</b>	21,85	24,75	16,60	21,90	14,40	18,50
	± 0,43	± 0,64	± 0,60	± 0,54	± 0,40	± 0,53
<b>28 jours</b>	28,21	31,50	23,20	28,10	22,10	25,90
	± 0,62	± 0,58	± 0,56	± 0,40	± 0,62	± 0,59

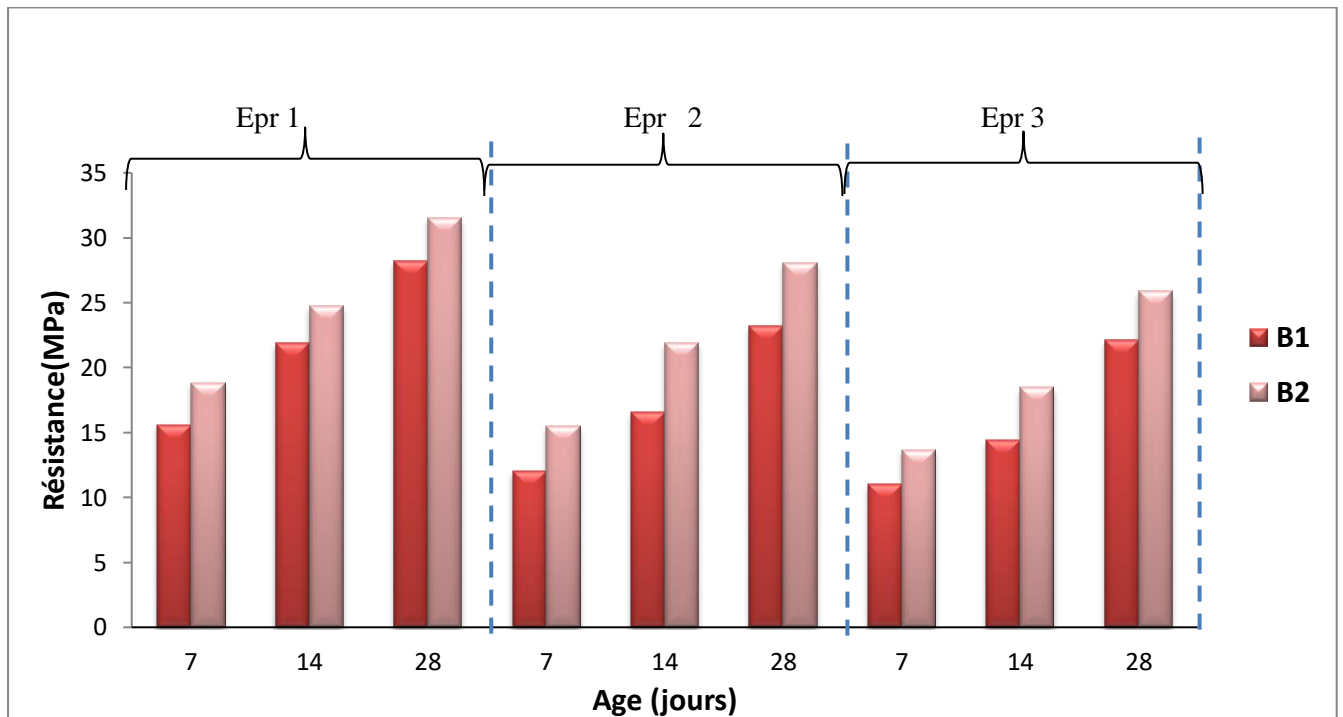


**Figure III.16.** Evolution des résistances par écrasement des différentes éprouvettes des bétons.

Comme pour les résistances sclérométriques, le béton B2 présente des résistances par écrasement supérieures à celles du béton B1 à tous les âges et pour les trois types d'éprouvettes. Ces différences de résistances sont, à 7 jours, 20.5 %, 29% et 24.5% respectivement pour les éprouvettes de type 1, 2 et 3. Les différences à 14 et 28 jours restent proches de celles à 7 jours contrairement aux résistances sclérométriques. Elles sont 13%, 32%, 28.5% et 11.5%, 21%, 17% respectivement à 14 et 28 jours.

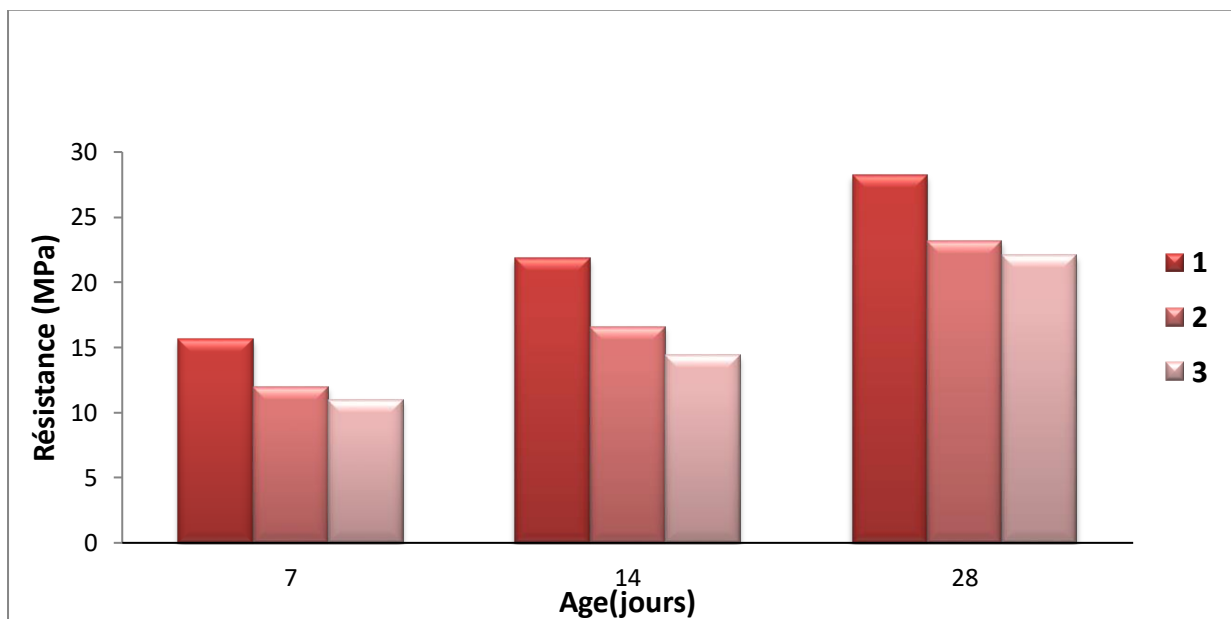
### III.4.2 Effet de l'âge des bétons

L'effet de l'âge des bétons sur les résistances à l'écrasement est moins sensible au type d'éprouvette et à la composition du béton. Les augmentations des résistances du béton B1, entre 7 jours et 28 jours, sont respectivement 81, 93 et 100% pour les éprouvettes de type 1, 2 et 3. Celles du béton B2 sont 67, 81 et 89% pour les mêmes éprouvettes. On remarque aussi que ces augmentations de la résistance avec l'âge sont beaucoup plus importantes que celles des résistances sclérométriques.



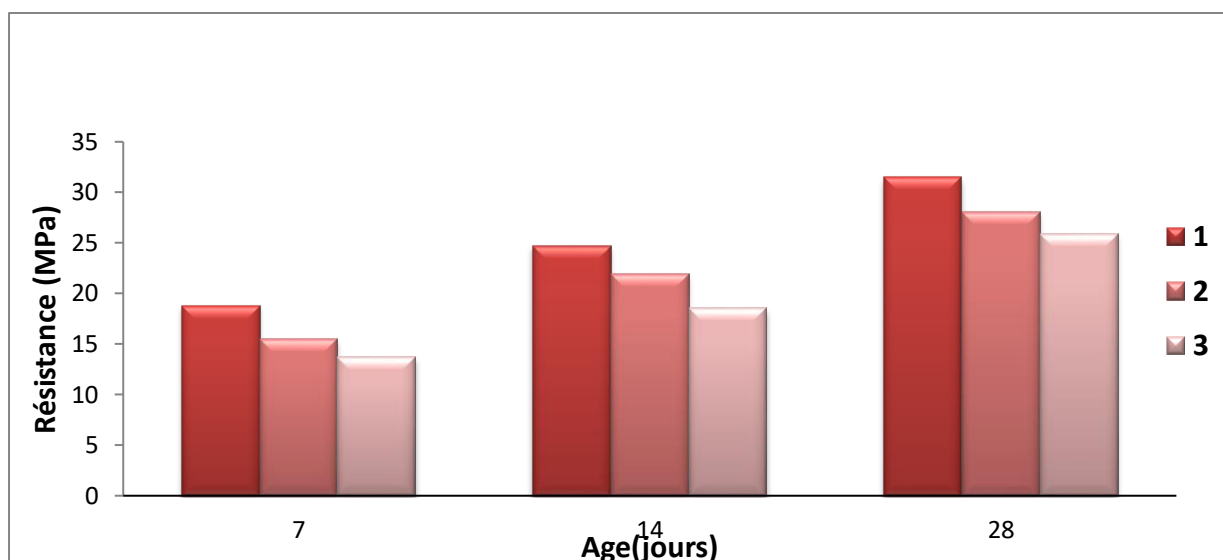
**Figure III.17.** Effet de l'âge des éprouvettes sur l'évolution des résistances par écrasement des différents bétons

### III.4. 3 Effet du type de l'éprouvette



**Figure III.18.** Effet du type d'éprouvette sur l'évolution des résistances par écrasement

-béton -B1-



**Figure III.19.** Effet du type d'éprouvette sur l'évolution des résistances par écrasement

-béton –B2-

Contrairement aux résistances sclérométriques, les résistances par écrasement sont inversement proportionnelles aux volumes des éprouvettes (fig. III.19 et III.20). Les diminutions des résistances des éprouvettes de type 2 par rapport à celles de type 1 sont, à 7, 14 et 28 jours, respectivement 23, 24 et 18 % pour le béton B1 et 17.5, 11.5 et 11% pour le béton B2.

Entre les éprouvettes de type 3 et 2, ces chutes deviennent 8, 13 et 5% pour le béton B1 et 11.5, 15.5 et 8% pour le béton B2.

Cet effet du volume de l'éprouvette sur les résistances est dû au caractère fragile du matériau béton. L'analyse de Weibull stipule que pour les matériaux homogènes et isotropes, la rupture est amorcée à partir d'un défaut unique considéré comme le plus critique (le maillon faible). Et donc plus le volume est important plus le nombre de défauts est grand. Ce qui résulte à une probabilité de rupture plus grande [Gouair, 1994] [Site 4]. Le matériau béton est donc supposé obéir à cette distribution de Weibull [Peiying et al., 2012].

Comme il est stipulé dans le guide de bonnes pratiques des essais de compression sur éprouvettes lors d'une comparaison entre les résultats d'essais sur éprouvettes, il convient bien de vérifier la nature des éprouvettes testées par les laboratoires : cylindres, cubes, moulées ou carottées et procéder aux corrections nécessaires rapportées aux volumes des éprouvettes testées [Bavelard et Beinisch, 2006].

### III.5 Corrélations entre les vitesses ultrasoniques et les résistances

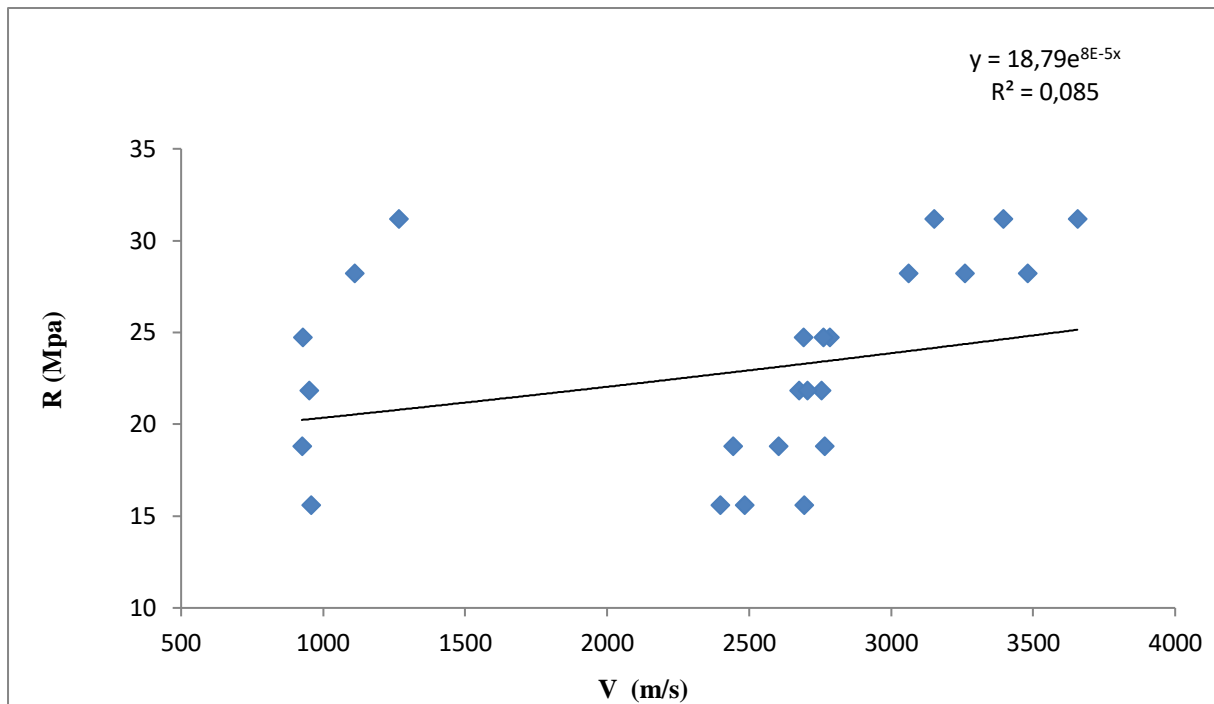
On s'intéresse dans cette partie de l'étude à l'estimation de la résistance du béton par les vitesses des ondes ultrasoniques. Les paramètres variables de ces corrélations entre les vitesses ultrasoniques et les résistances à la compression sont ceux déjà évoqués précédemment. Donc, on a trois fréquences et deux diamètres des transducteurs (A, B, C et B') avec trois distances du parcours des ondes (D1, D2 et D3) pour chacune des compositions du béton (B1, B2).

#### III.5.1 Effet du type de l'éprouvette (parcours de l'onde)

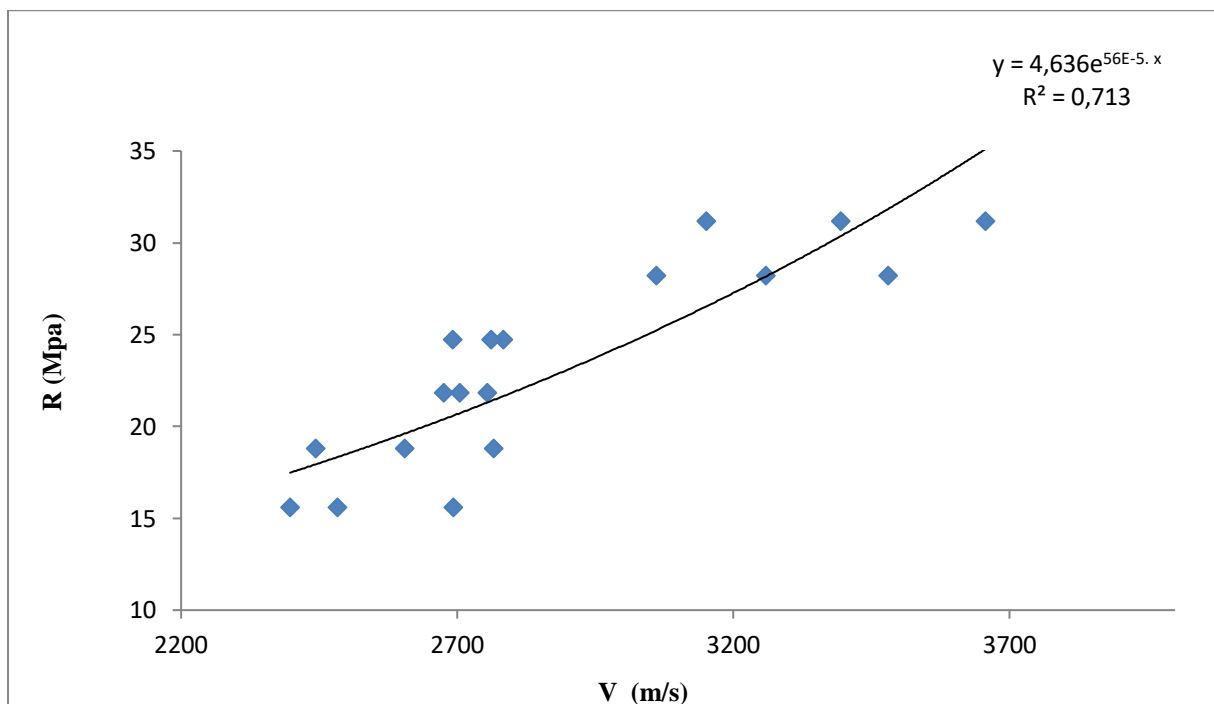
La figure III.20 présente la corrélation entre les vitesses ultrasoniques et les résistances à la compression, pour le type d'éprouvette 1, de l'ensemble des bétons et transducteurs. On remarque que cette relation est loin d'exister et que ceci est dû principalement à l'intégration des résultats des vitesses des transducteurs « B' ». Comme on l'a vu précédemment, ces transducteurs qui ont un faible diamètre (7.5 mm) donnent les valeurs les plus faibles des vitesses. Le fait de ne pas considérer ces transducteurs (fig. III. 21) améliore beaucoup cette relation ( $R^2=0.713$ ).

Ce qui est avancé pour le premier type d'éprouvette reste valable pour les deux autres types d'éprouvettes (fig. III.22 à 25). On n'a toujours pas de relations lorsqu'on considère tous les transducteurs. Ces relations deviennent existantes sans prise en compte des transducteurs « B' » mais elles restent incertaines avec des coefficients de corrélations ( $R^2$ ) inférieurs à 1.

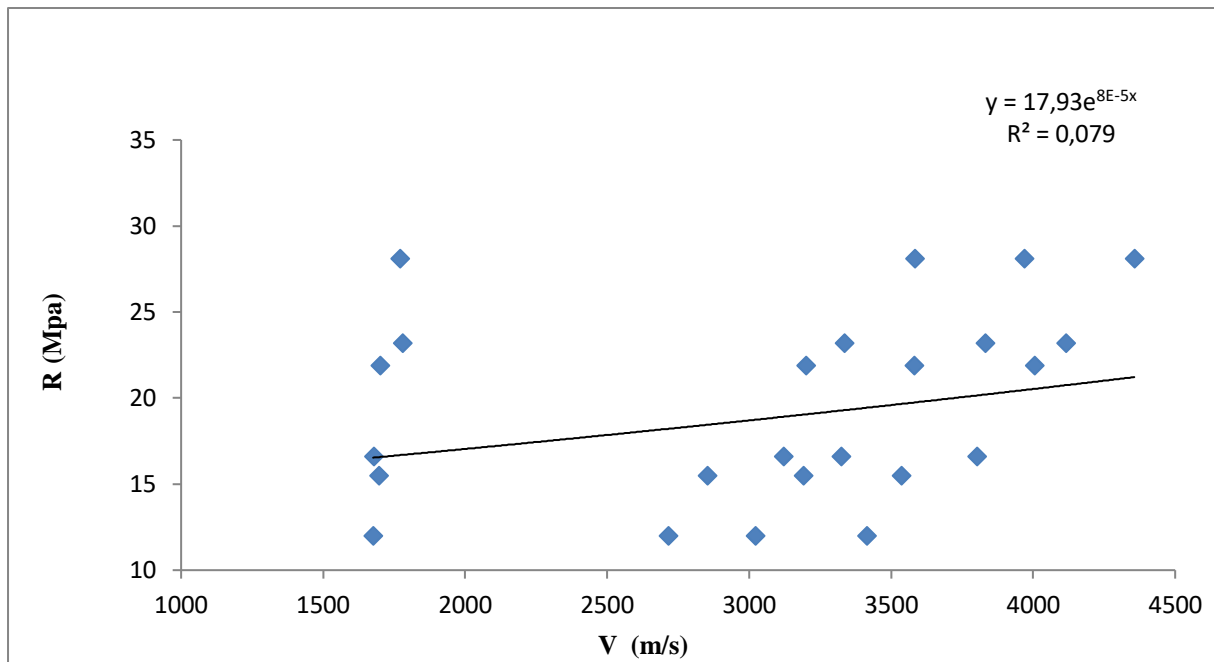
Comme il est avancé dans l'état d'art, les dimensions des éprouvettes devraient être en relation avec les longueurs d'ondes utilisées. Donc utiliser des fréquences non conformes aux dimensions (parcours) conduisent à des incertitudes dans les mesures acquises. L'incidence des dimensions des éprouvettes sur la transmission de l'impulsion est stipulée dans la norme [EN 12504-4, 2005].



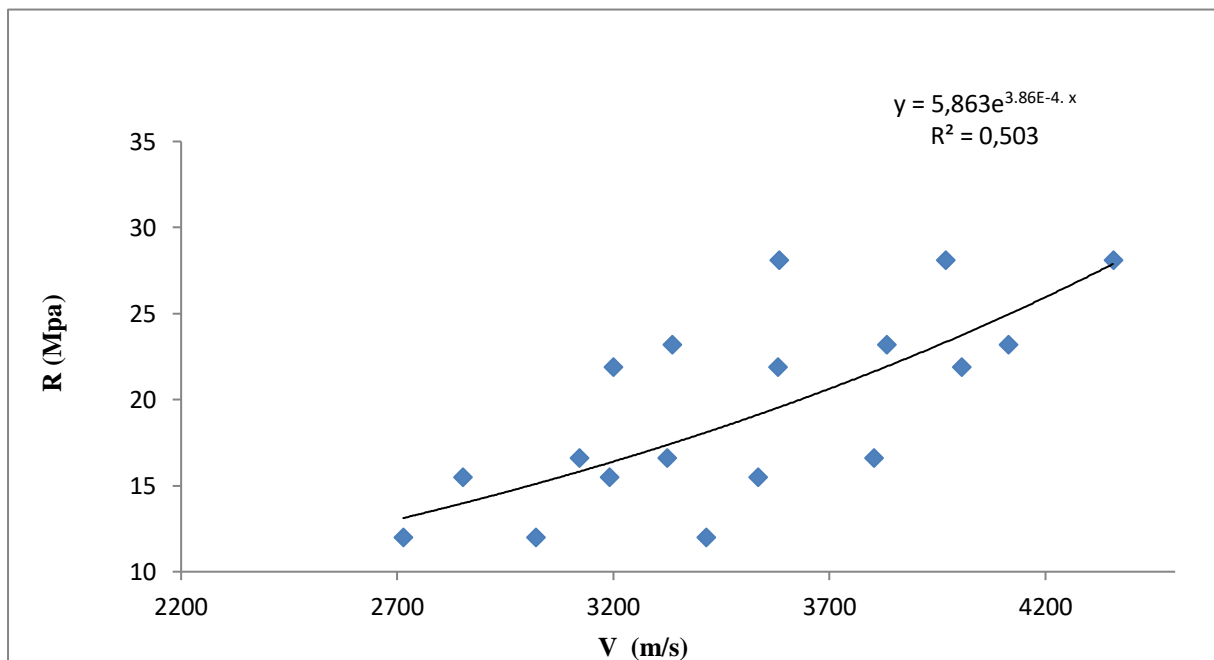
**Figure III.20** Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - Parcours D1- Transducteurs A, B, C et B'



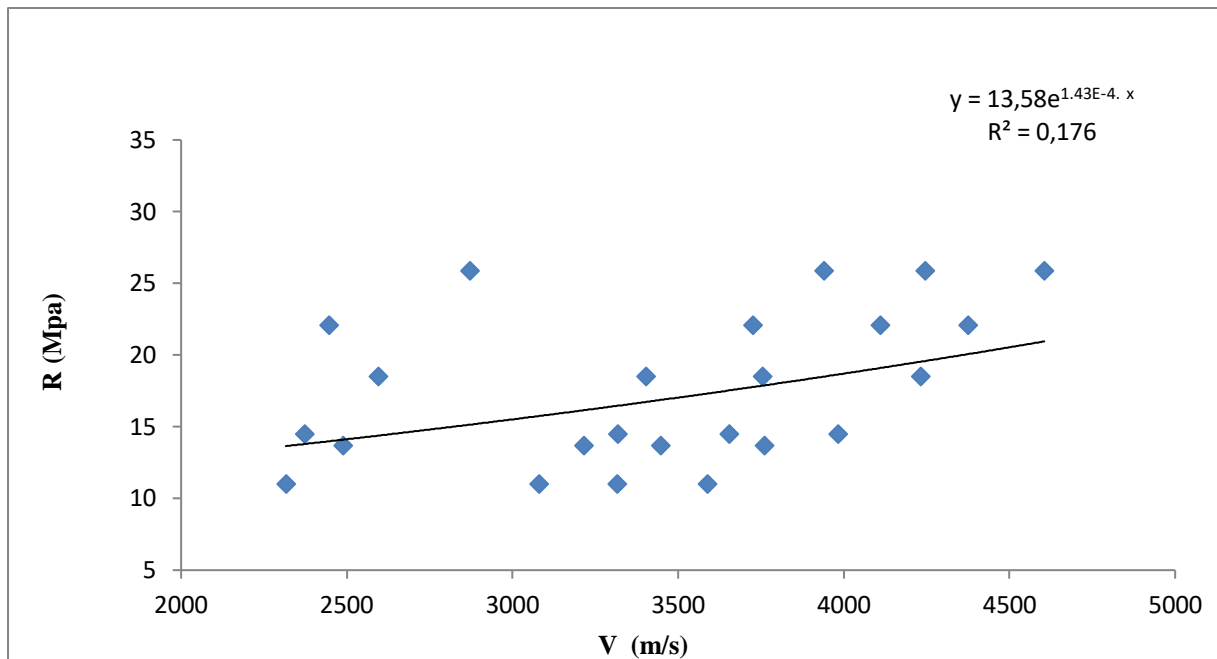
**Figure III.21** Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - Parcours D1- Transducteurs A, B, et C



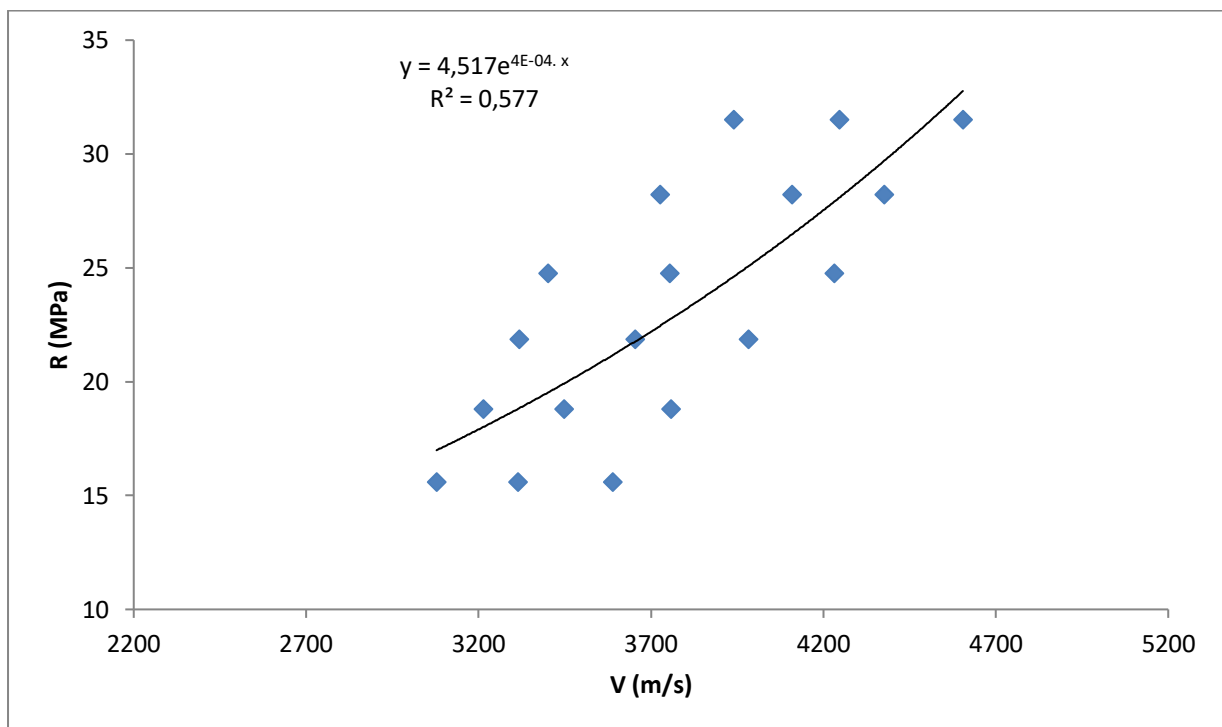
**Figure III.22** Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - Parcours D2- Transducteurs A, B, C et B'



**Figure III.23** Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - Parcours D2- Transducteurs A, B et C



**Figure III.24** Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - Parcours D3- Transducteurs A, B et C et B'



**Figure III.25** Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - Parcours D3- Transducteurs A, B et C

### III.5.2 Effet du type de transducteurs et de la composition des bétons

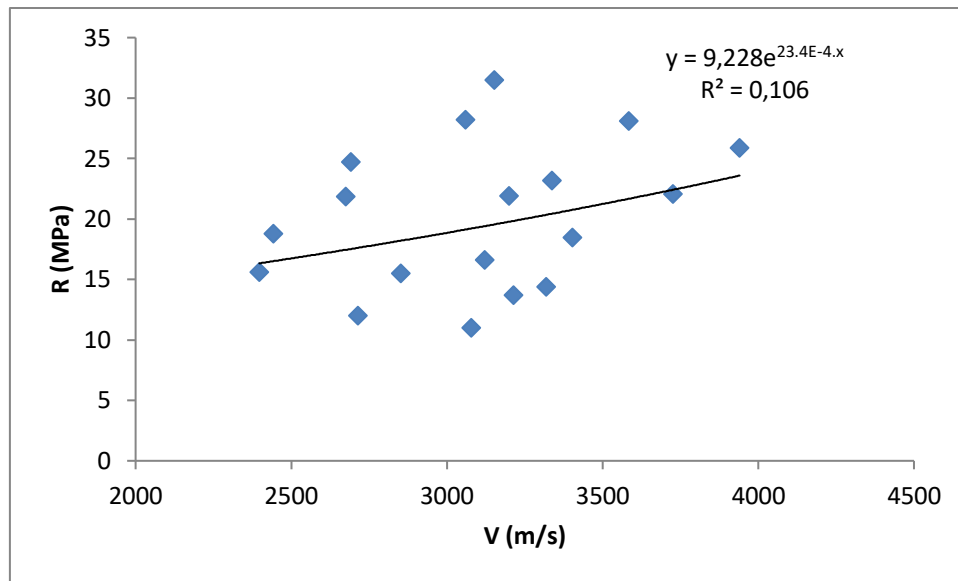
Les vitesses ultrasoniques acquises par les différents transducteurs présentent des différences qui peuvent influencer sur les corrélations. On prospecte dans cette partie les effets des transducteurs sur ces corrélations à travers les relations spécifiques à chaque transducteur.

Les figures III.26 (a), III.27 (a), III.28 (a) et III.29 (a) représentent ces relations en considérant tous les parcours et tous les bétons. On remarque que ces corrélations sont très imprécises et ne peuvent donner une estimation fiable des résistances à partir des vitesses.

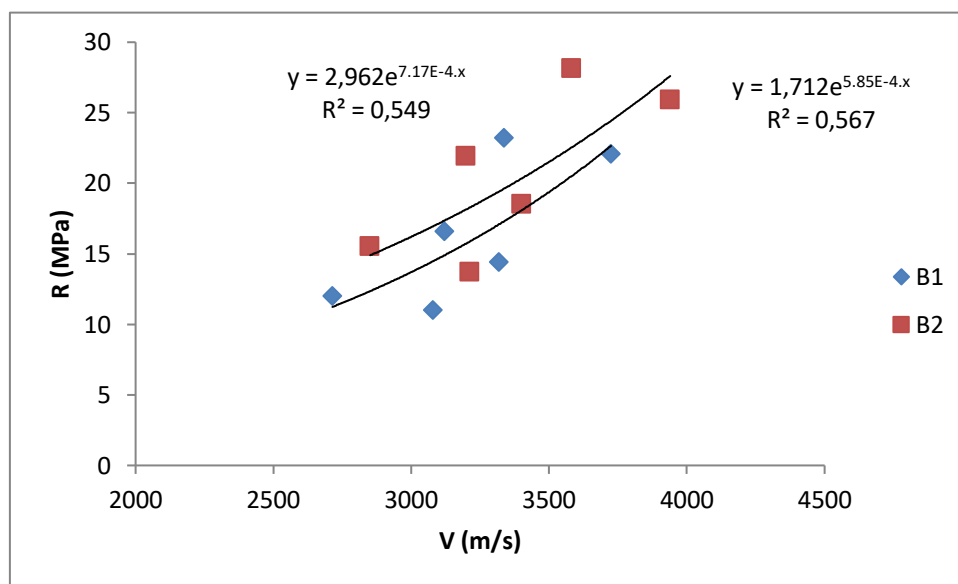
Les transducteurs utilisés ont des fréquences qui nécessitent des distances dépassant celle du premier parcours (25 mm). Le fait d'éliminer ce parcours améliore ces corrélations mais pas dans la mesure à être utiliser pour une bonne estimation.

Donc, l'effet de la composition est aussi important dans cette estimation. Le fait de s'intéresser à chaque composition seule pour les deux parcours (2 et 3) a conduit à une bonne estimation des résistances par les vitesses ultrasoniques pour les transducteurs « A », « B » et « C » (fig. III.26 (b), III.27 (b) et III.28 (b)). On remarque que les transducteurs « B » donnent les meilleures corrélations alors les transducteurs « B' » de faible diamètre n'ont apporté aucune amélioration aux corrélations et semblent mal-adaptés aux dimensions des éprouvettes choisies (fig. III.29 (b)).

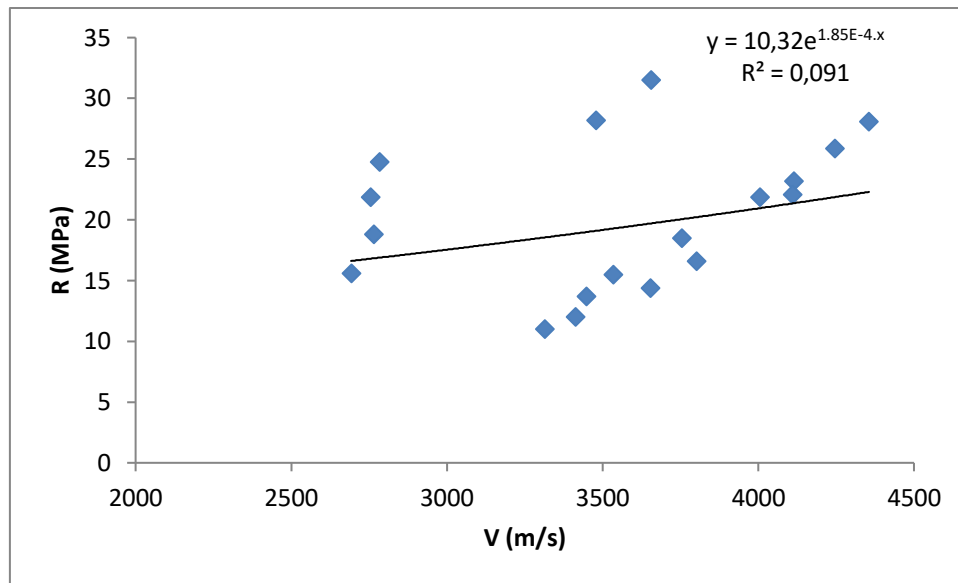
Yu [Yu, 2018] avance qu'avec des tailles maximales des granulats de 22 mm dans les bétons, la fréquence minimale souhaitable est 50 kHz. C'est le régime pour lequel l'interaction est importante entre les ondes et les diffuseurs sous forme de diffusion. D'autre part, il a été observé que l'augmentation de la fréquence engendre une croissance importante de l'atténuation lors des mesures. Ceci est confirmé par nos corrélations où les transducteurs « B », de fréquence 54 kHz et de diamètres 49.5 mm ont donné les meilleurs résultats.



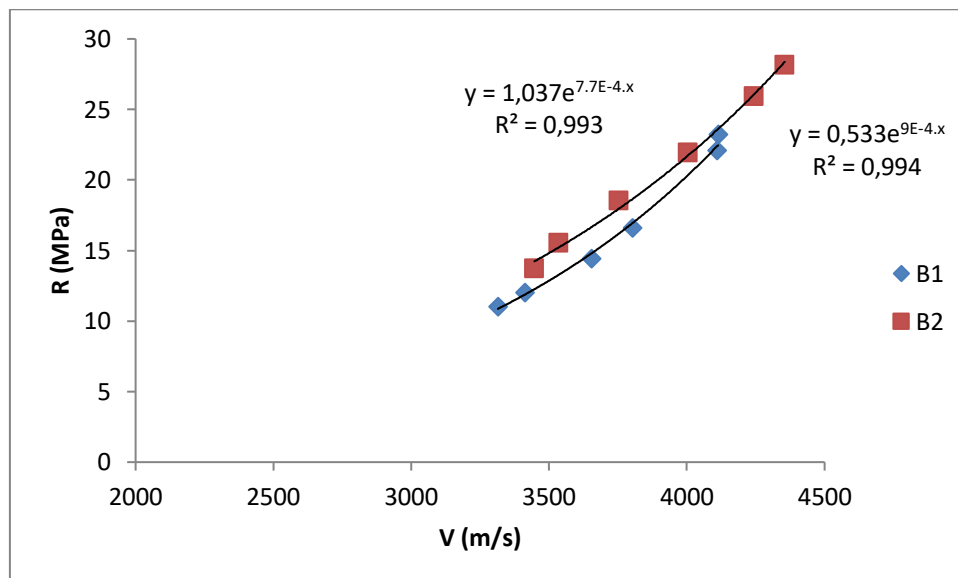
**Figure III.26 (a)** Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - transducteurs A –



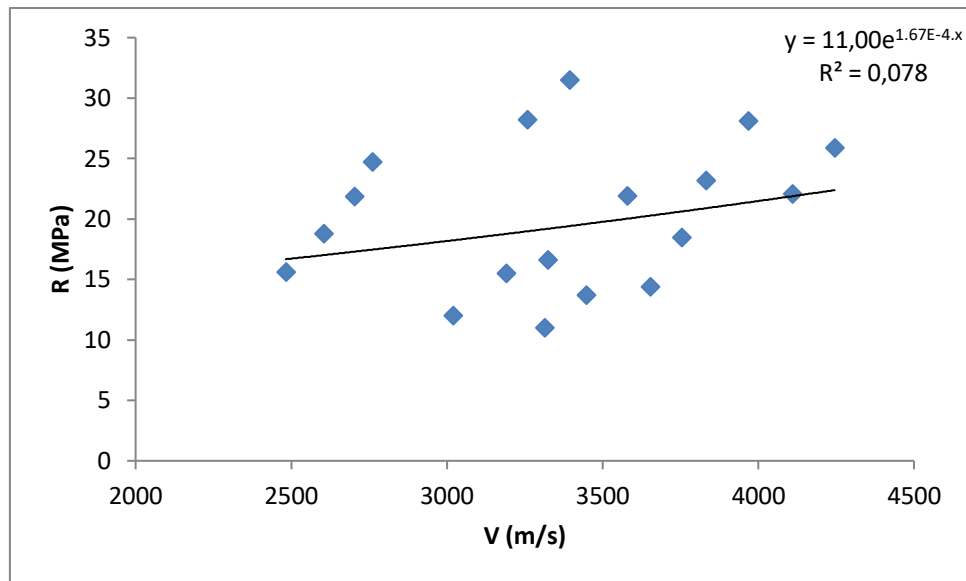
**Figure III.26 (b)** Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression pour chaque béton (transducteurs « A », parcours 2 et 3)



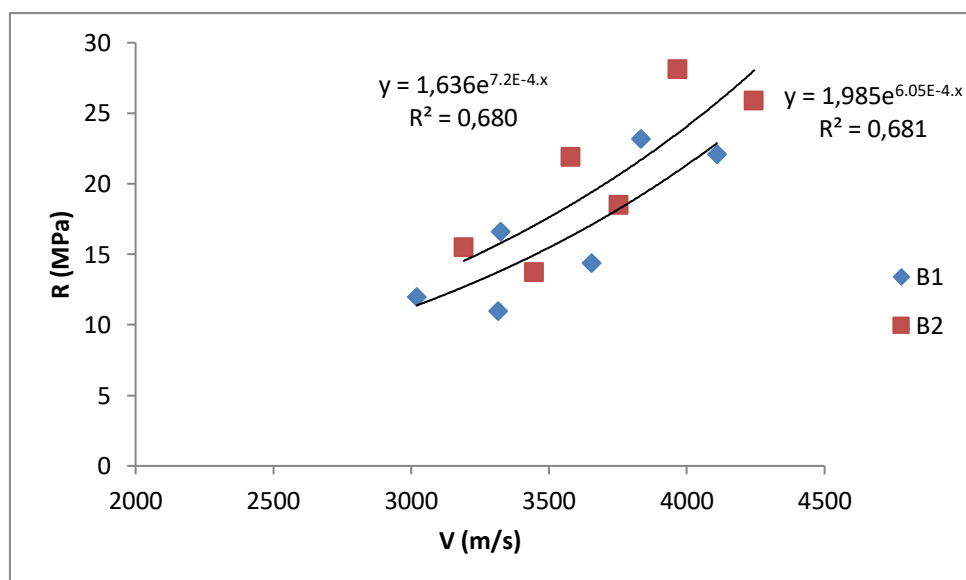
**Figure III.27 (a)** Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - transducteurs B –



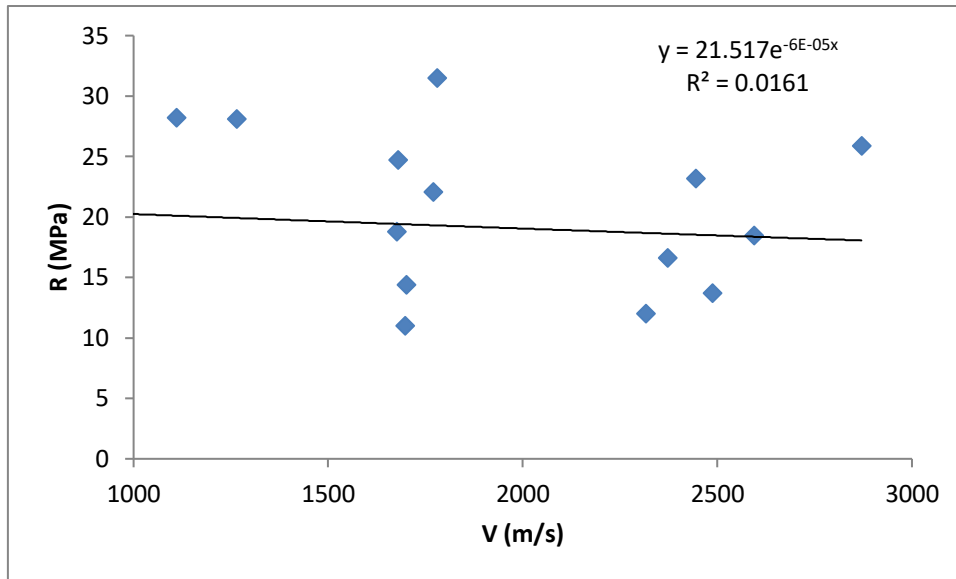
**Figure III.27 (b)** Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression pour chaque béton (transducteurs « B », parcours 2 et 3)



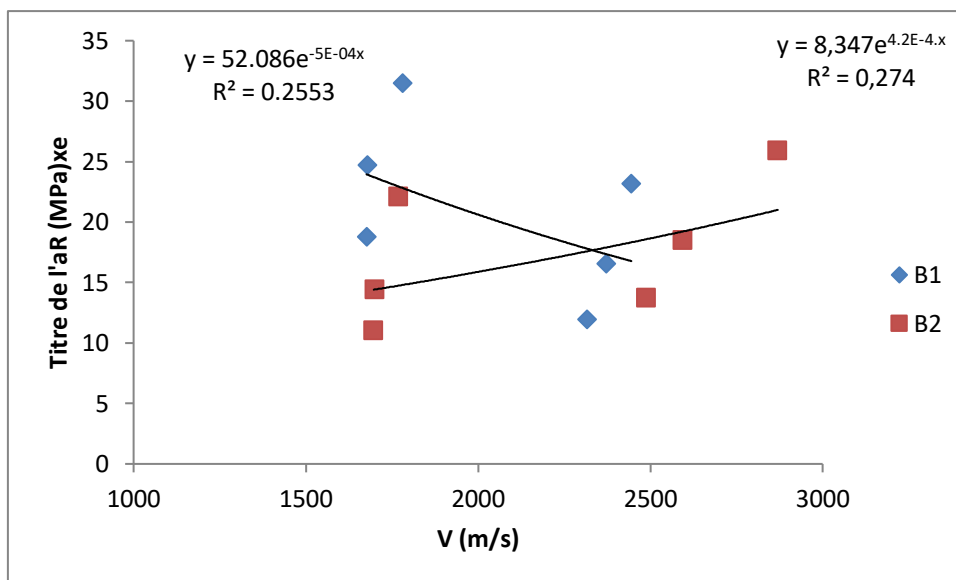
**Figure III.28 (a)** Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons - transducteurs C –



**Figure III.28 (b)** Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression pour chaque béton (transducteurs « C », parcours 2 et 3)



**Figure III.29 (a)** Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents béton - transducteurs B' –



**Figure III.29 (b)** Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression pour chaque béton (transducteurs « B' », parcours 2 et 3)

### III.5. 3 Conclusion

A travers cette étude corrélatrice entre les vitesses ultrasoniques et les résistances à la compression par écrasement, il s'avère que le type de l'éprouvette (donc la distance du parcours des ultrasons) des transducteurs et la composition des bétons impactent la qualité des corrélations. Les éprouvettes de type 1 et les transducteurs de faible diamètre « B' » ont un effet

négligeable sur ces corrélations. Les transducteurs « B », de fréquence 54 kHz et de diamètre 49.5 mm, donnent les meilleures corrélations pour les deux types de béton.

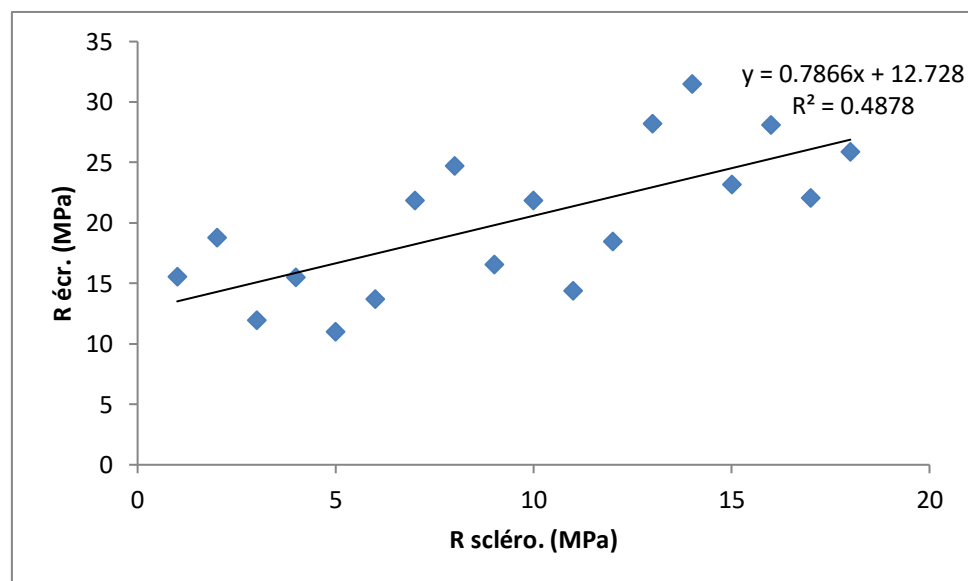
### III.6 Corrélations entre les résistances sclérométriques et par écrasement

Comme on l'a vu précédemment, les résistances aussi bien sclérométriques que par écrasement sont en relation avec leurs volumes. Si à 7 jours, les résistances déterminées par scléromètre sont supérieures à celles par écrasement, la tendance s'inverse avec l'âge.

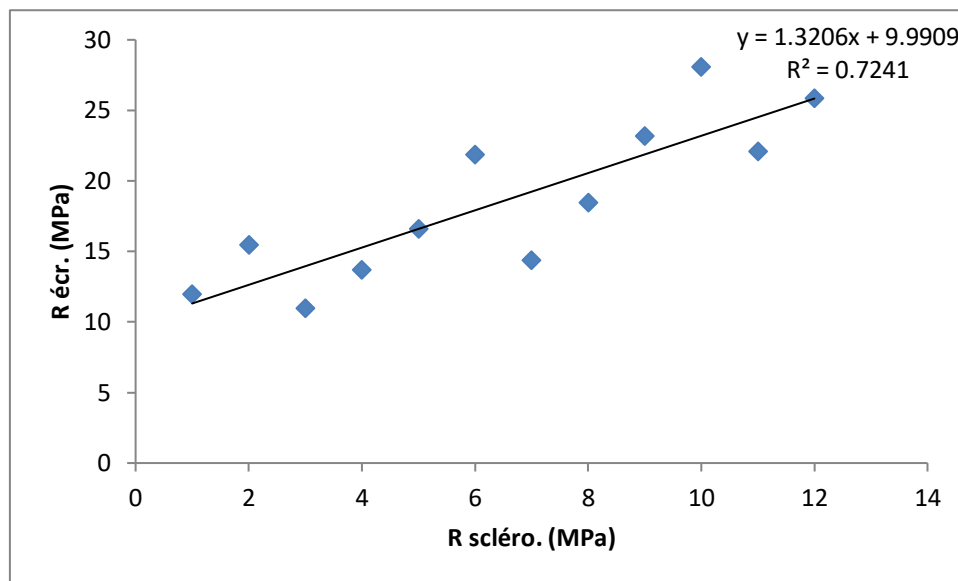
Les relations entre les deux types de résistance sont mentionnées dans la figure III.30 pour l'ensemble des éprouvettes (types 1, 2 et 3) et des bétons (B1 et B2). Cette relation présente un coefficient de corrélation moyen qui reflète une certaine incertitude.

Les éprouvettes de type 1 ont été précédemment source d'incertitude dans l'évolution des différentes propriétés étudiées car leurs dimensions ne sont pas conformes réglementairement aussi bien pour les vitesses que pour les résistances.

En éliminant les éprouvettes de type 1 de la corrélation, la corrélation entre les résistances sclérométriques et par écrasement se trouve améliorée (fig. III.31). Cette relation est de type linéaire comme celles trouvées par Aydin et Saribiyik [Aydin et Saribiyik, 2010] sur des éprouvettes cubiques 15x15x15 cm<sup>3</sup> à 28 et 90 jours. Katuwal propose aussi des relations linéaires mais spécifiques à chaque type de granulat [Katuwal, 2019]. D'autres chercheurs avancent des relations de type exponentiel [Boukhelkhal et Kenai, 2015].



**Figure III.30** Corrélations entre les résistances à la compression par scléromètre et par écrasement (éprouvettes type 1, 2 et 3)



**Figure III.31** Corrélations entre les résistances à la compression par scléromètre et par écrasement (éprouvettes type 2 et 3)

### III.7 Conclusion

Les vitesses ultrasoniques augmentent avec la distance parcourue par les ondes. Ceci est valable pour tous les transducteurs et les deux compositions du béton (B1 et B2) et à tous les âges (7, 14 et 28 jours). Ces vitesses sont plus impactées par le diamètre des transducteurs que par les fréquences utilisées. Les vitesses les plus faibles sont celles acquises par les transducteurs de faible diamètre.

La distance du parcours des ultrasons dans l'éprouvette, le type des transducteurs et la composition des bétons impactent la qualité des corrélations entre les vitesses et les résistances. Les faibles parcours et les transducteurs de faible diamètre « B' » ont un effet négatif sur ces corrélations. La fréquence souhaitable est donc celle de 54 kHz pour le grand diamètre (B ». C'est le régime pour lequel l'interaction est importante entre les ondes et les diffuseurs.

Les éprouvettes les plus volumineuses présentent les évolutions les plus importantes des résistances sclérométriques tandis que les résistances par écrasement sont inversement proportionnelles aux volumes des éprouvettes.

La forme des éprouvettes influence les relations entre les résistances déterminées par scléromètre et celles par écrasement.

*Chapitre IV :*  
*Estimation de*  
*l'adhérence des mortiers*  
*par la vitesse*  
*ultrasonique*

## **Chapitre IV : Estimation de l'adhérence des mortiers par la vitesse ultrasonique**

### **IV.1 Introduction**

La compréhension des propriétés d'adhérence entre un mortier et un support est un enjeu majeur pour les industriels qui tentent au travers de formulations de plus en plus complexes d'améliorer les performances de leurs produits. Au-delà de l'appétence d'un mortier pour un support (compatibilités chimiques et physiques de deux matériaux), c'est la durabilité du lien entre les matériaux qui est recherchée. Cependant, les mortiers sont soumis lors de leur service à des sollicitations externes parfois sévères (séchage, gel/dégel, carbonatation, etc.) pouvant conduire à une perte d'adhérence [Mauroux, 2011].

Les enduits sont appliqués sur des supports de nature très différente : maçonnerie de pierres, de briques ou de blocs de béton, béton brut non lié, béton de granulats légers, béton cellulaire, etc. Certains supports permettent une application directe; c'est le cas de la brique, des blocs de béton et de la maçonnerie en pierre. Les autres supports nécessitent un traitement préalable.

La bonne adhérence d'un enduit sur son support est fondamentale; sinon on a une détérioration du revêtement. L'adhérence peut être définie comme la force qui doit être fournie au système adhérent pour séparer deux constituants [Lamure, 2007]. Cette adhérence est généralement caractérisée par un essai destructif d'arrachement (pull out) qui mesure la force nécessaire pour séparer le mortier de son support. Cet essai ne peut être pratiqué que ponctuellement pour ne nuire à la structure donc le recours à un essai non destructif permettra un balayage plus vaste de la surface du mortier.

L'utilisation des ultrasons est l'une des méthodes les plus anciennes de caractérisation du béton et repose sur la mesure de l'amplitude et du temps de parcours d'une impulsion d'onde ultrasonore sur une longueur de trajet connue. Les essais ultrasoniques sont importants en raison de leur facilité d'utilisation et de leur coût raisonnable.

Les ondes de Rayleigh sont des ondes mécaniques se propageant parallèlement à la surface du matériau solide. Ils ont une pénétration dans le corps solide en ne caractérisant que les premiers centimètres de la surface. La profondeur de pénétration de ces ondes dépend de la fréquence des transducteurs [Hevin et al, 1998], [Ould Naffa et al, 2002].

Cette partie consiste à étudier les relations entre la vitesse des ondes ultrasonores indirectes (ondes de surface) et la résistance à l'arrachement des mortiers pour enduits. Ceci afin d'avoir

la possibilité d'estimer l'adhérence des mortiers de manière non destructive en remplacement des essais d'arrachement destructifs.

La prospection de cette caractérisation non destructive concerne deux types de mortiers (un mortier préparé MP et un autre industriel prêt à l'emploi MI) sur deux supports différents (béton et maçonnerie en parpaing) et avec deux épaisseurs (1 et 2 cm) pour chaque mortier.

## **IV.2 Désignation des mortiers et supports**

Les deux mortiers qui font l'objet de notre étude sont un mortier traditionnel préparé (sable, ciment et eau) et un autre industriel prêt à l'emploi. Ces mortiers sont appliqués sur deux support différents, un support en béton et un autre en parpaing et avec deux épaisseurs pour chaque mortier (1 cm et 2 cm). On a alors les désignations suivantes :

- *MP1\_B : mortier préparé d'une épaisseur de 1 cm sur support en béton.*
- *MP2\_B : mortier préparé d'une épaisseur de 2 cm sur support en béton.*
- *MII\_B : mortier industriel d'une épaisseur de 1 cm sur support en béton.*
- *MI2\_B : mortier industriel d'une épaisseur de 2 cm sur support en béton.*
- *MP1\_P : mortier préparé d'une épaisseur de 1 cm sur support en parpaing.*
- *MP2\_P : mortier préparé d'une épaisseur de 2 cm sur support en parpaing.*
- *MII\_P : mortier industriel d'une épaisseur de 1 cm sur support en parpaing.*
- *MI2\_P : mortier industriel d'une épaisseur de 2 cm sur support en parpaing.*

## **IV.3 Evolution des vitesses ultrasoniques**

Les essais non destructifs par les ultrasons ont été conduits pour des pas entre l'émetteur et le récepteur d'environ 25 cm et 10 cm respectivement pour le support en béton et celui en parpaing.

Les résultats des essais non destructifs par ultrasons pour les différents mortiers sur les différents supports sont résumés dans le tableau IV.1.

**Tableau IV.1** : Vitesses ultrasoniques des mortiers sur différents supports

Mortier	Support	Epaisseur (cm)	Référence	Position	Vitesse (m/s)		
Mortier Préparé	Béton	1	MP1_B	1	3043		
				2	3051		
				3	2583		
				4	2661		
				<b>Moy.</b>	<b>2834.5</b> ± 247		
		2	MP2_B	1	2880		
				2	2378		
				3	2059		
				4	1931		
				<b>Moy.</b>	<b>2312</b> ± 423		
Mortier Industriel	Béton	1	MI1_B	1	2247		
				2	2158		
				3	2537		
				4	2730		
				<b>Moy.</b>	<b>2418</b> ± 263.5		
		2	MI2_B	1	1794		
				2	2323		
				3	2334		
				4	2432		
				<b>Moy.</b>	<b>2220.75</b> ± 289		
Mortier Préparé	Parpaing	1	MP1_P	1	2772		
				2	2430		
				3	2100		
				<b>Moy.</b>	<b>2434</b> ± 336		
		2	MP2_P	1	2312		
				2	2321		
				3	1530		
				<b>Moy.</b>	<b>2054.33</b> ± 554		
		Mortier Industriel	Parpaing	1	MI1_P	1	2833
						2	3142
3	2966						
<b>Moy.</b>	<b>2980.33</b> ± 155						
2	MI2_P			1	1934		
				2	2385		
				3	2283		
				<b>Moy.</b>	<b>2200.67</b> ± 236.5		



**Figure IV.1** : Essais ultrasoniques du mortier prêt à l'emploi sur support en béton

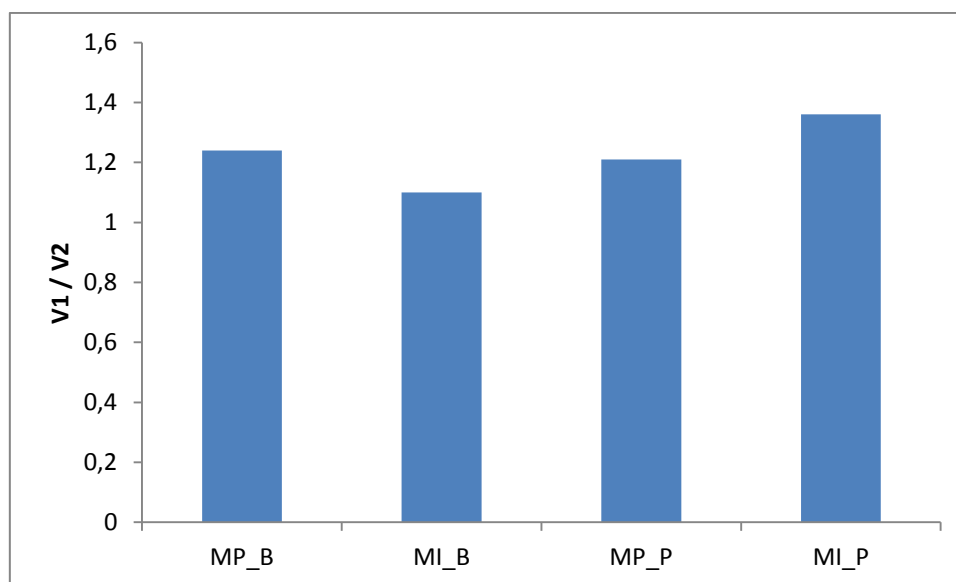
Les vitesses ont été déterminées en quatre points pour le support en béton et en trois points pour le support en parpaing. Ces vitesses sont celles des ondes de surface et qui sont déduites à partir de la pente de la courbe reliant le temps à la distance du parcours de l'onde (voir chap. II). Donc, plus on a des points de mesure plus l'estimation de la vitesse ultrasonique est meilleure. Le transducteur émetteur étant fixe, les points de mesure correspondent à la position du transducteur récepteur. L'acquisition du temps de parcours en chaque point permet de calculer la vitesse de l'onde ultrasonique de surface en ce point. Ces essais ont donné comme vitesses moyennes pour les quatre points de mesure 2834.5, 2312, 2418 et 2220.75 m/s respectivement pour les mortiers MP1\_B, MP2\_B, MI1\_B et MI2\_B (mortiers préparé et industriel de 1cm et 2 cm sur le support en béton). Les mêmes mortiers sur support en parpaing ont eu des vitesses plus importantes que celles des premiers. Ces vitesses moyennes sont 2434, 2054.33, 2980.33 et 2200.67 m/s respectivement pour les mortiers MP1\_P, MP2\_P, MI1\_P et MI2\_P.

On note que l'épaisseur influe négativement l'évolution de ces vitesses. Les vitesses des mortiers d'épaisseur 1cm sont toujours supérieures à celles des mortiers de 2 cm d'épaisseur pour les deux types de mortiers (préparé et industriel) ainsi que pour les deux supports (béton et parpaing). Pour les ondes de surface, cet effet est en général du à des variations des propriétés du matériau avec la profondeur (milieu stratifié horizontalement ou gradient continu avec la profondeur) [Chekroun, 2008]. Cette chute des vitesses ultrasoniques varie de 10% à 36% (fig.IV.2). Le mortier préparé présente des chutes des vitesses, du à l'augmentation de son épaisseur, proches pour les deux supports et qui avoisinent les 20%.

Le mortier industriel subit une différence de ces chutes de vitesses. Il a la chute la plus faible pour le support en béton (10%) et la chute la plus importante pour le support en parpaing (36%).

La nature du support influence les vitesses ultrasoniques des mortiers. Le support en béton a permis d'avoir des vitesses des mortiers supérieures à celles des mortiers sur le support en parpaing respectivement de 16, 12.5% pour le mortier préparé d'épaisseur 1cm et 2cm (MP1, MP2). Quant au mortier industriel, le support en béton présente des vitesses ultrasoniques inférieures de 23% par rapport à celles du support en parpaing pour l'épaisseur de 1cm (MI1). Pour l'épaisseur 2cm (MI2), l'effet du support est presque négligeable. Donc, la nature du support impacte différemment les vitesses ultrasoniques des mortiers selon la nature du mortier ainsi que son épaisseur.

Ceci se repecture aussi sur l'effet de la nature du mortier sur les vitesses. Sur le support en béton, le mortier préparé présente des vitesses supérieures à celles du mortier industriel pour les deux (1 cm et 2 cm) épaisseurs respectivement 17% et 4%. L'effet du support en parpaing est contraire à celui du support en béton sur la variation des vitesses entre les deux types de mortiers. Sur ce dernier support, le mortier préparé présente des vitesses inférieures à celles du mortier industriel pour les deux épaisseurs respectivement 22% et 7%.



**Figure IV.2** : Effet de l'épaisseur sur les vitesses moyennes des différents mortiers

#### IV.4 Evolution de l'adhérence

Une fois les essais non destructifs par les ultrasons réalisés, on a procédé aux essais destructifs par arrachement à l'aide du dynamomètre de traction. Les pastilles pour l'arrachement sont positionnées aux mêmes points que ceux des transducteurs de réception des ultrasons et la rupture s'est produite au niveau des interfaces support/mortier (fig. IV.3.). Ce qui implique que la résistance à la traction des supports est supérieure à la résistance d'adhérence.

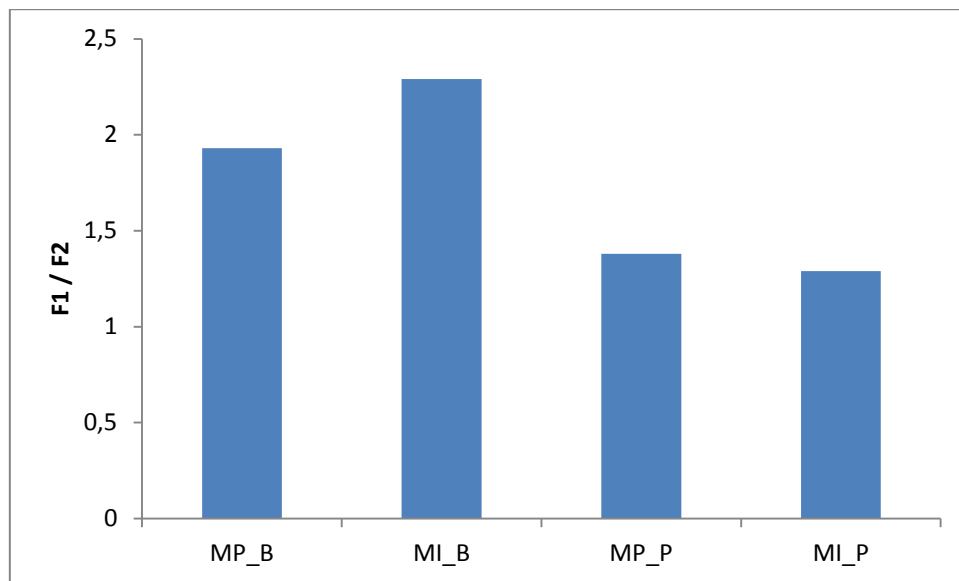
Les résultats des essais destructifs par arrachement pour les différents mortiers sur les différents supports sont résumés dans le tableau IV.2. Les forces moyennes d'arrachement correspondent à des contraintes d'adhérence de 0.3, 0.16, 0.42 et 0.28 MPa pour les mortiers préparé et industriel de 1cm et 2 cm sur le support en béton (MP1\_B, MP2\_B, MI1\_B et MI2\_B). Les mêmes mortiers sur support en parpaing ont des contraintes d'adhérence plus importantes que celles des premiers. Ces contraintes sont 0.68, 0.49, 0.87 et 0.67 MPa respectivement pour les mortiers MP1\_P, MP2\_P, MI1\_P et MI2\_P.



**Figure IV.3** : Essais d'arrachement du mortier industriel sur support en béton

**Tableau IV.2** : Forces et contraintes d'arrachement des mortiers sur différents supports

Mortier	Support	Epaisseur (cm)	Référence	Position	Force (N)	Cont. d'Arr. (MPa)		
Mortier Préparé	Béton	1	MP1_B	1	827	0.33		
				2	813	0.32		
				3	669	0.27		
				4	719	0.29		
				<b>Moy.</b>	<b>757</b> ± 76	<b>0.303</b> ± 0,03		
		2	MP2_B	1	609	0.24		
				2	407	0.16		
				3	315	0.12		
				4	323	0.13		
				<b>Moy.</b>	<b>413.5</b> ± 137	<b>0.16</b> ±0.05		
Mortier Industriel	Béton	1	MI1_B	1	989	0.39		
				2	956	0.38		
				3	1100	0.44		
				4	1134	0,45		
				<b>Moy.</b>	<b>1044.75</b> ± 87	<b>0.42</b> ±0.03		
		2	MI2_B	1	569	0.23		
				2	687	0.27		
				3	765	0.31		
				4	812	0.32		
				<b>Moy.</b>	<b>708.25</b> ± 106	<b>0.28</b> ±0.04		
Mortier Préparé	Parpaing	1	MP1_P	1	1765	0.71		
				2	1757	0.73		
				3	1605	0.64		
				<b>Moy.</b>	<b>1709</b> ± 90	<b>0.68</b> ± 0.04		
				2	MP2_P	1	1281	0.51
		2	1314			0.53		
		3	1070			0.43		
		<b>Moy.</b>	<b>1221.67</b> ± 132			<b>0.49</b> ± 0.05		
		Mortier Industriel	Parpaing			1	MI1_P	1
				2	2255			0.90
3	2187			0.87				
<b>Moy.</b>	<b>2180.67</b> ± 78			<b>0.87</b> ± 0.03				
2	MI2_P			1	1564			0.62
				2	1722	0.69		
				3	1755	0.70		
				<b>Moy.</b>	<b>1680.33</b> ± 102	<b>0.67</b> ± 0.04		



**Figure IV.4 :** Effet de l'épaisseur sur les forces d'arrachement moyennes des différents mortiers

L'augmentation de l'épaisseur a provoqué une chute de la résistance à l'arrachement des deux mortiers et pour les deux supports (fig. IV.4). L'augmentation de 100% de l'épaisseur a conduit à une diminution de cette résistance sur le support en béton de 45 et 32% respectivement pour le mortier préparé et le mortier industriel. Les mortiers sur le support en parpaing ont eu des chutes de leurs forces d'arrachement de 28.5 et 23% respectivement pour le mortier préparé et le mortier industriel. Donc, la diminution de l'adhérence en augmentant l'épaisseur du mortier est plus importante dans le cas du support en béton.

Le développement de la fissuration dûe au retrait restreint est la cause principale de cet effet de l'épaisseur comme le note [Mauroux, 2011]. En effet, plus le volume du mortier est important et plus le retrait restreint est important. Ce qui conduit à plus de contraintes conduisant à la formation des fissures qui engendrent une chute de l'adhérence.

La nature du support et l'état de sa surface de contact avec le mortier ont aussi une influence sur l'adhérence. Les forces d'arrachement des mortiers sur le support en parpaing sont supérieures à celles des mortiers sur le support en béton respectivement de 126, 196, 109 et 137% pour MP1, MP2, MI1 et MI2. La rugosité constitue un facteur primordial dans la qualité du contact. On a aussi dans le cas d'un support poreux, le réseau capillaire est capable d'absorber une certaine quantité d'eau et donc un contact plus sec. Un support poreux aura

aussi une surface de contact plus grande, ce qui a pour effet d'augmenter l'énergie de rupture nécessaire à la séparation. Les supports en parpaing ont donc plus dans le cadre des supports cités précédemment plus que les supports en béton. Ils présentent des surfaces de contact plus rugueuses et plus poreuses que celles des supports en béton [Courard, 1998].

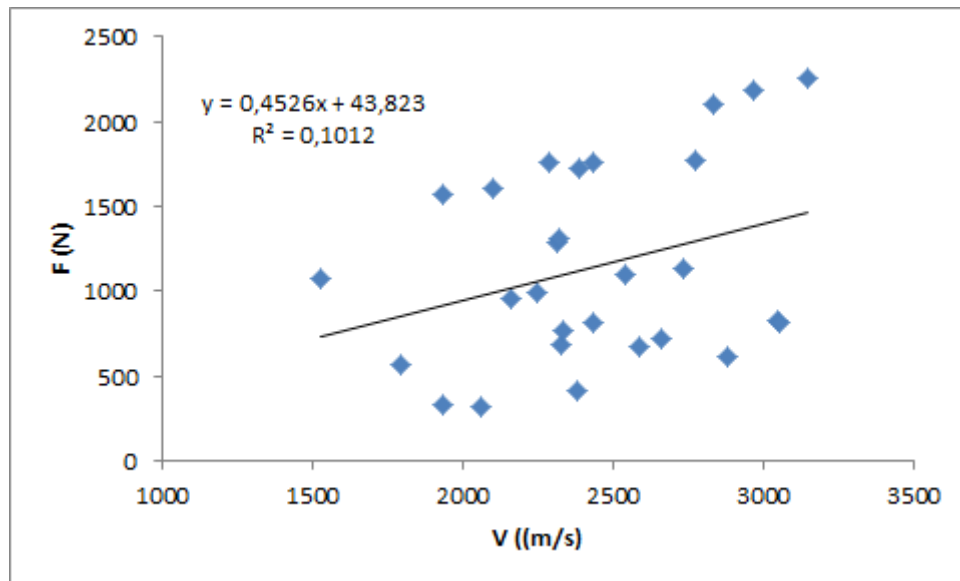
La nature du mortier influence aussi cette adhérence où on remarque un bon comportement du mortier industriel comparativement au mortier préparé et ceci pour les deux épaisseurs et les deux supports. Les forces d'arrachement du mortier industriel sont supérieures à celles du mortier préparé de 38, 71% sur le support béton pour les épaisseurs 1cm et 2 cm et sur le support en parpaing, on a des valeurs supérieures respectivement de 27 et 37% pour les mêmes épaisseurs.

Donc, on remarque de ce qui précède que les évolutions des vitesses ultrasoniques des ondes de surface et des forces d'adhérence des mortiers dépendent des plusieurs paramètres. La nature du mortier et son épaisseur ainsi que la nature du support impactent l'évolution des deux propriétés que sont la vitesse ultrasonique et la force d'arrachement (adhérence). On prospecte dans la suite les relations possibles entre la vitesse et l'adhérence et les incertitudes de ces relations qui peuvent être introduites par les différents paramètres cités.

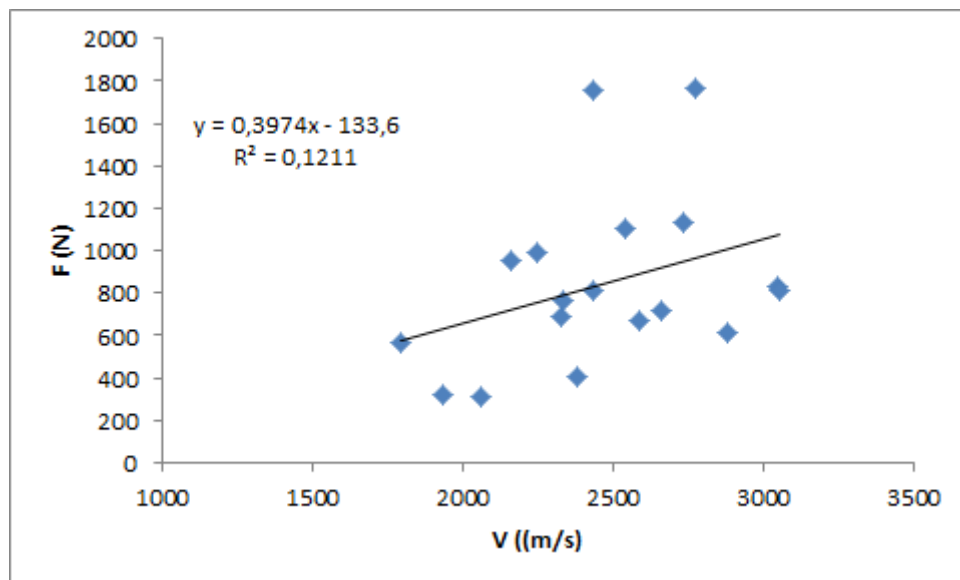
#### **IV.5 Corrélations entre les vitesses ultrasoniques et les forces d'adhérence**

Le fait de s'intéresser à l'évaluation de la force d'arrachement, de tous les mortiers et leurs supports, à partir des vitesses ultrasoniques de surface conduit à des incertitudes importantes (fig IV.5). En plus de la composition des mortiers et celles des supports ainsi que leurs états de surface, la réalisation des mesures dans des conditions expérimentales différentes peut engendrer des variations sur la vitesse [Toumi, 2011]. La température ou encore le mauvais positionnement des transducteurs peuvent influencer le temps de parcours de l'onde ultrasonique de surface [Zhou, 2006] [Hoblos, 2004].

En s'intéressant à chaque support, l'estimation de l'adhérence à partir de la vitesse ultrasonique reste incertaine malgré une certaine amélioration. Cette estimation est meilleure dans le cas du support en parpaing.

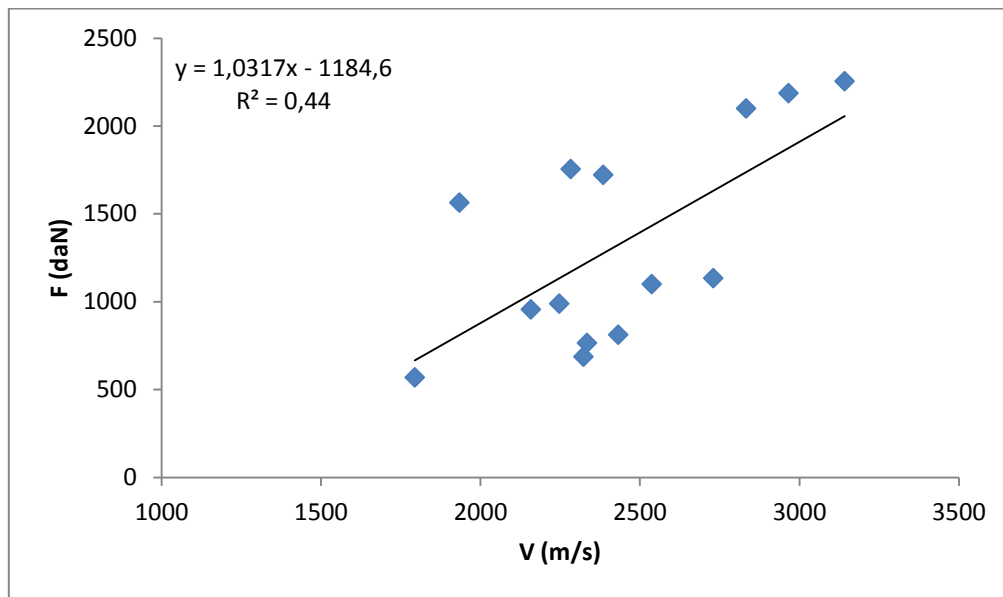


**Figure IV.5 :** Relations entre les vitesses ultrasoniques et les forces d'arrachement (support en béton)



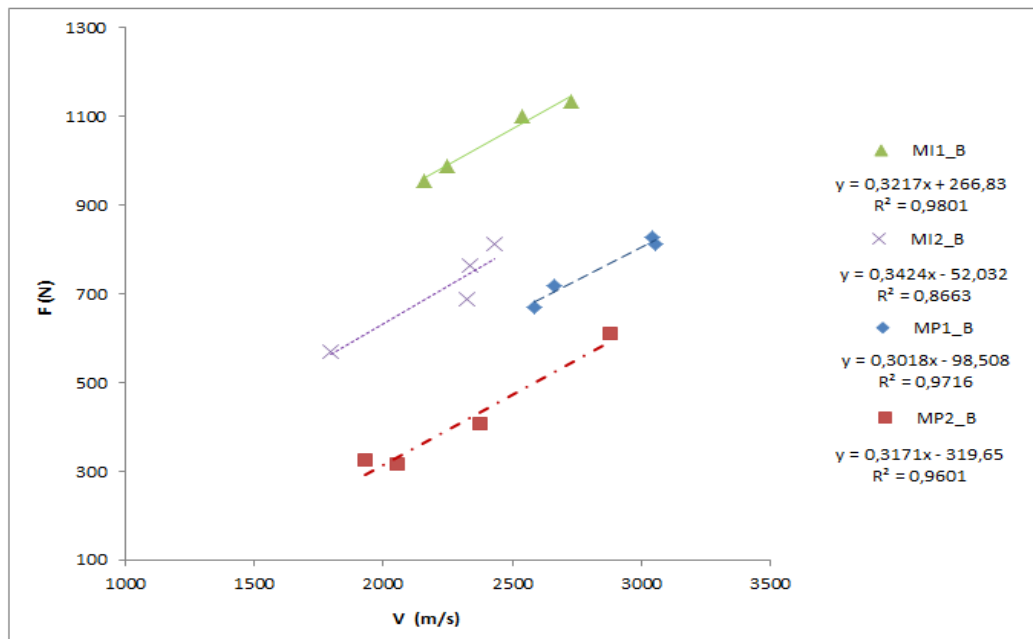
**Figure IV.6:** Relations entre les vitesses ultrasoniques et les forces d'arrachement (support en parpaing)

Même le fait de s'intéresser à chaque mortier n'améliore pas beaucoup cette relation. Dans le meilleur des cas, on a le mortier industriel qui présente une certaine relation entre les vitesses ultrasoniques et les forces d'arrachement (fig. IV.7). Alors qu'on note aucune relation pour le mortier préparé. Le même constat est à faire pour l'effet de l'épaisseur dans les relations entre ces deux propriétés. Aussi bien l'épaisseur de 1 cm que celle de 2 cm ne permet pas d'avoir une relation visible.

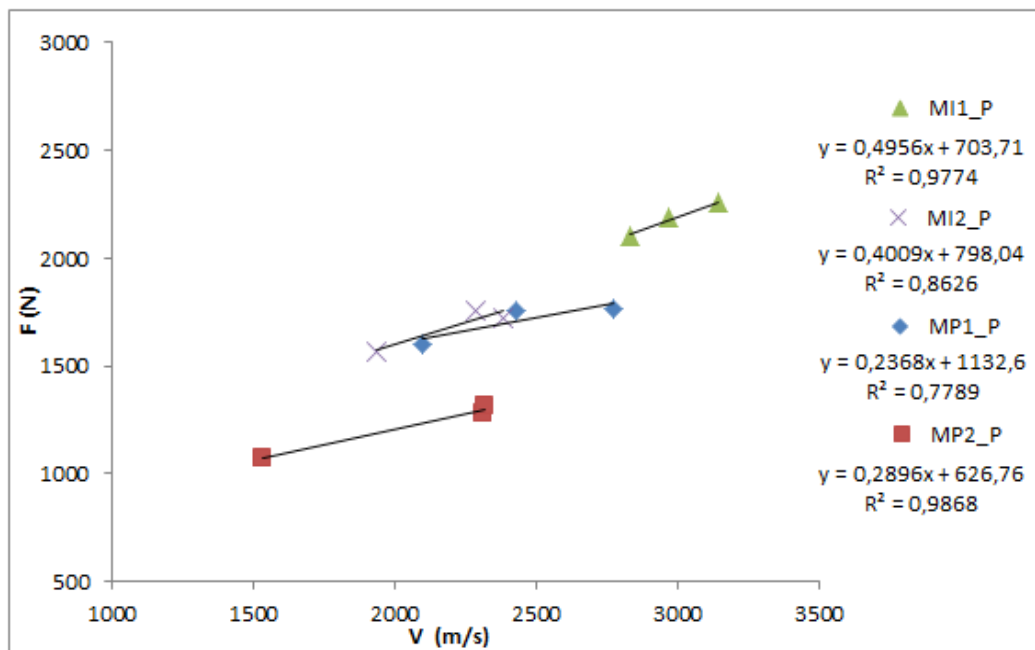


**Figure IV.7 :** Relations entre les vitesses ultrasoniques et les forces d'arrachement (mortier industriel)

Les différents mortiers ainsi que leurs différents supports présentent des compositions et des états de surfaces différentes. Il est aussi noté que la profondeur de pénétration de l'onde de Rayleigh est en rapport direct avec sa longueur d'onde. Ce qui nous a amené à s'intéresser à chaque configuration. Les figures IV.8 et IV.9 indiquent les relations entre les vitesses ultrasoniques et les forces d'arrachement respectivement pour les supports en béton et en parpaing pour chaque épaisseur de mortier. Ceci a beaucoup amélioré ces relations et l'estimation de l'adhérence à partir des vitesses ultrasoniques de surface est devenue satisfaisante et présente des coefficients de corrélation qui varient entre 0.79 et 0.98.



**Figure IV.8 :** Corrélations entre les vitesses et les forces d'arrachement (support en béton)



**Figure IV.9 :** Corrélations entre les vitesses et les forces d'arrachement (support en parpaing)

L'augmentation de l'épaisseur du mortier industriel conduit à une perte de la qualité de la relation entre les vitesses et les forces d'arrachement de 14 % pour les deux supports (béton et parpaing).

Pour le mortier préparé, l'augmentation de l'épaisseur n'a pas affecté cette relation dans le cas du support en béton ( $R^2 = 0,97$  pour  $e = 1$  cm et  $R^2 = 0,96$  pour  $e = 2$  cm). Quant au support en

parpaing, l'augmentation de l'épaisseur a conduit à une meilleure précision de cette relation ( $R^2 = 0.79$  pour  $e = 1$  cm et  $R^2 = 0.98$  pour  $e = 2$  cm).

La vitesse de l'onde de surface est influencée par l'augmentation de la porosité qui diminue la vitesse de propagation alors que la teneur en eau l'augmente [Fnine, 2006]. L'absorption de l'eau contenue du mortier par le support du béton est plus faible que celle par le support en parpaing. Ce qui reflète la sensibilité de la variation de l'épaisseur dans le cas sur support en parpaing.

## IV.6 Conclusion

On s'est intéressé dans cette partie de travail à l'estimation de l'adhérence des mortiers par les vitesses ultrasoniques des ondes de surface. La relation entre la vitesse des ondes de surface et la force d'arrachement a été explorée pour deux types de mortiers sur deux différents supports et pour deux épaisseurs de mortiers. L'accès à une seule face de l'élément à ausculter rend les ondes de surfaces mieux adaptées au contrôle de ces ouvrages.

Les résultats expérimentaux montrent une diminution de la vitesse ultrasonique, à cause de l'augmentation de l'épaisseur du mortier. Cette vitesse est moins sensible à la nature du support alors que de la force d'arrachement est plus affectée.

L'évaluation de la force d'arrachement, de tous les mortiers et leurs supports, à partir des vitesses ultrasoniques de surface présente une faible corrélation linéaire. Ceci est dû à la composition des mortiers et celle des supports ainsi que leurs états de surface. Le fait de s'intéresser à chaque mortier sur chaque support a conduit à une estimation acceptable de l'adhérence des mortiers à partir des vitesses ultrasoniques de surface. Ces corrélations linéaires présentent des coefficients de corrélation ( $R^2$ ) compris entre 0.79 et 0.98.

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale :

On s'est intéressé dans ce travail aux deux méthodes du contrôle non destructif les plus utilisées dans le domaine du génie civil et particulièrement dans le cas des ouvrages en béton. Ces deux méthodes sont celles utilisant les ondes ultrasoniques et le scléromètre.

Les résultats de ces deux méthodes dépendent de plusieurs paramètres comme la composition du béton, la forme des éprouvettes, les diamètres et fréquences des transducteurs, ...

Cette étude a concerné donc la prospection des incertitudes introduites par les paramètres cités sur les résultats de ces deux méthodes. Ceci a été réalisé à travers deux volets différents : le premier s'est intéressé à la caractéristique la plus vulgarisée des bétons et qui est sa résistance à la compression, le second volet est dédié à l'adhérence des mortiers sur leurs différents supports. Les résultats des essais ultrasoniques (en mode direct) et sclérométriques ont été corrélés aux résistances par écrasement alors que l'adhérence a été concernée par les corrélations des résultats des essais ultrasoniques de surface.

Le premier volet a permis de conclure que les vitesses ultrasoniques augmentent avec la distance parcourue par les ondes. Ceci est valable pour tous les transducteurs et les deux compositions du béton (B1 et B2) et à tous les âges (7, 14 et 28 jours). Ces vitesses sont plus impactées par le diamètre des transducteurs que par les fréquences utilisées. Les vitesses les plus faibles sont celles acquises par les transducteurs de faible diamètre.

La distance du parcours des ultrasons dans l'éprouvette, le type des transducteurs et la composition des bétons impactent la qualité des corrélations. Les faibles parcours et les transducteurs de faible diamètre « B' » ont un effet négatif sur ces corrélations. La fréquence souhaitable est donc celle de 54 kHz avec le diamètre 49.5 mm « B ». C'est le régime pour lequel l'interaction est importante entre les ondes et les diffuseurs.

Les éprouvettes les plus volumineuses présentent les évolutions dans le temps les plus importantes des résistances sclérométriques tandis que les résistances par écrasement sont inversement proportionnelles aux volumes des éprouvettes.

La distance du parcours des ultrasons dans l'éprouvette, le type des transducteurs et la composition des bétons impactent la qualité des corrélations. Les faibles parcours et les transducteurs de faible diamètre « B' » ont un effet négatif sur ces corrélations. La forme des éprouvettes influence les relations entre les résistances déterminées par scléromètre et celles par écrasement.

L'autre volet de cette étude est l'estimation de l'adhérence des mortiers par les vitesses ultrasoniques des ondes de surface. La relation entre la vitesse des ondes de surface et la force d'arrachement a été étudiée pour deux types de mortiers sur deux différents supports et pour deux épaisseurs de mortiers. L'accès à une seule face de l'élément à ausculter rend les ondes de surfaces mieux adaptées au contrôle des ouvrages.

L'épaisseur influe négativement l'évolution de ces vitesses. Les vitesses des mortiers d'épaisseur 1cm sont toujours supérieures à celles des mortiers de 2 cm d'épaisseur pour les deux types de mortiers (préparé et industriel) ainsi que pour les deux supports (béton et parpaing). La nature du support et du mortier influence aussi les vitesses ultrasoniques.

L'évolution de l'adhérence avec l'épaisseur est dans le même sens que la vitesse ultrasonique. L'augmentation de l'épaisseur a provoqué une chute de la résistance à l'arrachement des deux mortiers et pour les deux supports.

La nature du support et l'état de sa surface de contact avec le mortier ont aussi une influence sur l'adhérence. Les forces d'arrachement des mortiers sur le support en parpaing sont supérieures à celles des mortiers sur le support en béton

L'évaluation de la force d'arrachement, de tous les mortiers et leurs supports, à partir des vitesses ultrasoniques de surface présente une faible corrélation linéaire. Ceci est dû à la composition des mortiers et celle des supports ainsi que leurs états de surface. Le fait de s'intéresser à chaque mortier sur chaque support a conduit à une estimation acceptable de l'adhérence des mortiers à partir des vitesses ultrasoniques de surface.

Les perspectives à cette étude concernent une expérimentation plus fournie en termes de différentes compositions des bétons et forme d'éprouvette pour une étude statistique plus fiable.

La recherche des paramètres ayant conduit aux imprécisions des relations entre les vitesses ultrasoniques et les forces d'adhérence et la recherche de coefficients de calage qui prennent en considération les paramètres pris en compte (type et épaisseur du mortier, type et état du support, conditions hygrométriques..).

L'utilisation de transducteurs sans contact améliorera certainement l'acquisition des vitesses en enlevant un paramètre source d'imprécision (pression de contact).

Enfin, essayer d'exploiter d'autres propriétés des ultrasons comme l'atténuation, ...etc.

Références  
bibliographiques

---

## Références bibliographiques

[Aitcin et Mehra, 1990] : **P. C. Aitcin et P. K. Mehta**, « Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high strength concrete », ACI Material Journal, Vol. 87, No. 2, pp. 103-110, 1990.

[Aitcin et al, 1997] : **P. C. Aitcin, J. Baron, J.P. Bournazel**, « Viser une résistance à la compression - Les bétons bases et données pour leur formulation », Editions Eyrolles, pp. 278 – 305, 1997.

[Aydin et Saribiyik, 2010] : **F. Aydin et M. Saribiyik**, « Correlation between Schmidt Hammer and destructive compressions testing for concretes in existing buildings », Scientific Research and Essays, Vol. 5(13), pp. 1644-1648, 2010.

[Baali, 2002] : **L. Baali**, « perméabilité, porosité et résistance mécanique d'un béton à base de matériaux locaux comme critères de durabilité », Mémoire de magister, université de Guelma, 2002.

[Balan et al, 1972] : **S. Balan, M. Arcan** traduit du romain par : **R. CĂLINESCU**, « Essai des constructions », Editions meridiane Bucarest ; Editions Eyrolles Paris, 1972.

[Baron, 1992] : **J. Baron**, « Introduction à la durabilité des bétons », pp. 23- 38, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France, 1992.

[Baron et al, 1997] : **J. Baron, R. Gagne J.P. Ollivier**, « Viser la durabilité - Les bétons bases et données pour leur formulation », pp. 307-360, Editions Eyrolles, Paris, France, 1997.

[Balayssac et al, 2009] : **J.P. Balayssac, S. Laurens, G. Arliguie, M.A. Ploix, D. Breysse, X. Dérobert, B. Piwakowski**, « Evaluation of concrete structures by combining non-destructive testing methods (SENSO Project) »- Non-Destructive Testing in Civil Engineering, France, 2009.

[Bavelard, H. Beinish] : **Bavelard, H. Beinish**, « Guide de bonnes pratiques des essais de compression sur éprouvettes », CERIB, France, 2006.

[Bayan et al., 2016] : **S. Bayan , Al-Nu'man, Bestoon R. Aziz, Sabr A. Abdulla, and Sirwan E. Khaleel**, «Effect of Aggregate Content on the Concrete Compressive Strength - Ultrasonic Pulse Velocity Relationship», American Journal of Civil Engineering and Architecture, Vol. 4, No. 1, 2016.

**[Benouis et Grini, 2011] : A. Benouis, A.Grini,** « Estimation of concrete's porosity by ultrasounds ». Physics Procedia, pp.21, 53 – 58, 2011.

**[Bertrand et Piketty, 1997] : R. Bertrand, C.Piketty,** « Les granulats pour bétons - Les bétons bases et données pour leur formulation », pp. 65-8, 6Editions Eyrolles, France, 1997.

**[Blondel, 1956] : M. Blondel,** « La technique de la gammagraphie », Editions Eyrolles, Paris 1956.

**[Boukhelkhal et Kenai, 2015 ] : D. Boukhelkhal, S. Kenai :** « Détermination non destructive de la résistance du béton sur site (Scléromètre & Ultrason) », Rencontres Universitaires de Génie Civil, Bayonne, France, 2015.

**[Bungley, 1982] : J. H. Bungey,** «The Testing of Concrete in Structures», Surrey University Press, USA, 1982.

**[CENTRE 05, 2005] :** Centre d'information sur le ciment et ces applications, «Fiche technique : constituants des bétons et des mortiers », Tome 1, Paris, France, 2005.

**[Chai , 2006] : K. N. Chai,** «Innovative AE and ndt techniques for on-site measurement of concrete and masonry structures state-of-the-art » Report of the RILEM Technical Committee 239-MCM, Part of the RILEM State-of-the-Art, Reports book series, Vol. 20, RILEM, 2016. [doi.org/10.1007/978-94-017-7606-6](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7606-6)

**[Chekroun, 2008] : M. Chekroun,** «Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface», Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, France, 2008.

**[Cherai, 1991] : Y. Cherai,** « Contribution à l'étude et l'optimisation des bétons renforcés de fibres de fontes », Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France 1991.

**[Chnuillar et Laplante, 1997] : G. Chnuillar, P. Laplante,** «Viser une résistance à court terme pour tenir les délais de fabrications - Les bétons bases et données pour leur formulation», pp. 223 -275, Editions Eyrolles, Paris , France, 1997.

**[CNERIB, 2004] : CNERIB,** « Contrôle du beton armé par des essais non destructifs », Cycle formation, Alger, Algérie, 2004.

**[Courard, 1998] : L. Courard**, «Contribution à l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre un béton et un système de réparation. Appétence et adhérence : cause et effet d'une liaison », Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 1998.

**[Demirdag et al., 2009] : S. Demirdag et al.** « The effect of sample size on Schmidt rebound hardness value of rocks », International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 46(4), pp. 725-730, 2009. doi: 10.1016/j.ijrmms.2008.09.004

**[D.T.R, 1991] : Document technique réglementaire (D.T.R, BE 2-1)**, « Règle d'exécution d'ouvrage en béton armé », pp. 20–30, Imprimerie S.R.R.I, El-Biar, Dépôt Légal N:04, Alger Algérie, 1991.

**[Dupain et al, 2009] : R. Dupain, R. Lanchon, J-C.S aint.Arroman**, « Granulats,sols ciments et bétons », Editions Casteilla, 2009.

**[EN 12504-4, 2005] : EN 12504-4** , « Testing concrete - Part 4: Determination of pulse velocity », European Committee for Standardization CEN, 2005.

**[Fnine, 2006] : A. Fnine**, « Auscultation de la peau du béton par ondes ultrasonores haute fréquence », Thèse de doctorat, université des sciences et technologies de Lille, France, 2006.

**[Gorisse, 1978]: F. Gorisse**, « Essais et contrôle des bétons », pp. 122-130, Editions Eyrolles, 1978.

**[Gouair, 1994] H. Gouair**, « Approche probabiliste de la rupture fragile et ductile à grande vitesse de déformation », Thèse de doctorat, Université de Metz, France, 1994.

**[Hannachi, 2015] : S. Hannachi**, «Evaluation de la résistance à la compression du béton sur site :Application de la méthode combinée», Thèse de doctorat , Université de Constantine, juin 2015.

**[Hevin et al, 1998] : G.Hevin, O. Abraham, H.A. Pedersen, M. Campillo**, « aractérisation des fissures de surface avec des ondes de rayon: un modèle numérique», NDT & E International. Vol. 31, pp. 289-297, 1998.

**[Hoblos, 2004] : J. Hoblos**, « Évaluation des contraintes résiduelles par méthode ultrasonore avec prise en compte des effets de la microstructure : application au cas du soudage »,Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 2004.

**[Hollaway et Leeming, 1999] : L. Hollaway, M. Leeming**, «Renforcement des structures en béton armé», Woodhead publishing limited, Cambridge, 327 pages, 1999.

**[Jones, 1969] : R. Jones**, « Recommandations pour tester le béton par la méthode des impulsions ultrasonores.matériaux et construction », RILEM, Vol. 2, No.10, Juillet-Août 1969.

**[Katuwal, 2019] : T. B. Katuwal**, « Correlation between Concrete Compressive Strength and Rebound Number of River Bed and Crusher Run Coarse Aggregate in Pokhara Valley », Technical Journal, Vol. 1, No.1, pp. 29-33, 2019.

**[Kedjour, 2003] : N. Kedjour**, «Le laboratoire du béton », Office des publications universitaires, Algérie, 2003.

**[Khademi et al., 2016]: F. Khademi , M. Akbari , Jamal S. M.**, « Prediction of concrete compressive strength using ultrasonic pulse velocity test and artificial neural network modelling », Romanian Journal of Materials, 46 (3), pp. 343–350, 2016.

**[Khan et al.] S. R. M. Khan, J. Noorzaei, M. R. A. Kadir, Waleed A.M.T. and M. S. Jaafar**, « effectiveness of sclerometer test technique on strength assessment of high performance concrete », In. J. of Eng. and Tech., Vol. 1, No. 2, 2004, pp. 163–168, 2004.

**[Lamure, 2007] : A. Lamure**, « Adhésion et adhérence des matériaux », Extrait\_Adhesion\_et\_Adherence.pdf, 2007.

**[Lee et Lee, 2020] : T. Lee , et J. Lee**, « Setting time and compressive strength prediction model of concrete by non destructive ultrasonic pulse velocity testing at early age », Const. and Buil. Mat., Vol. 252, 2020. [doi.org/10.1016/conbuildmat.2020.119027](https://doi.org/10.1016/conbuildmat.2020.119027)

**[Lin et al., 2003]: Y. Lin, Lai, C. P.; and Yen, T.**, « Prediction of ultrasonic pulse velocity (UPV) in concrete », ACI Materials Journal, Vol. 100, No. 1, pp. 21-28, 2003.

**[Marvila et al, 2019] : M.T Marvila, , A.R.G Azevedo, , J. Alexandre, E. B. Zanelato, , N. G. Azeredo, N. T. Simonassi, S. N. Monteiro**, « Corrélacion entre les propriétés des blocs d'argile structuraux obtenus par des tests destructifs et des tests d'impulsions ultrasoniques », Journal of Building Engineering, Vol. 26, 2019. [doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100869](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100869)

**[Mauroux, 2011] : T. Mauroux**, « Impact du séchage sur les propriétés d'adhérence entre un mortier et un support : influence de l'adjuvantation par des éthers cellulose », Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, France, 2011.

**[Mehamdia, 2010] : A. Mehamdia** «Contrôle du béton par des essais non destructifs» mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie, 2010.

**[Mehamdia et Benouis, 2018 ]: A. Mehamdia, A. Benouis,** « Influence of the size and frequency of contact transducers on the determination of concrete permeability by ultrasonic velocity and attenuation », J. Mater. Environ. Sci., Vol. 9, Issue 3, pp. 730-740, 2018.

**[Mehta, 1986] : A. kumar Mehta,** «Matériaux en béton», Printice hall, Moscou, pp. 9-18, 1986.

**[Monteiro et Gonçalves] : A. Monteiro, A. Gonçalves,** « Assessment of characteristic compressive strength in structures by the rebound hammer test according to EN 13791: 2007 », NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, 2009.

**[Neville, 1988] : A.M. Neville,** « Properties of Concrete », Third Edition. English Language Book Society/ Longman, 1988.

**[NF EN 12504-2, 2013] : NF EN 12504-2,** « Essais pour béton dans les structures - Partie 2 : essais non destructifs - Détermination de l'indice de rebondissement », AFNOR, 2013.

**[NF EN ISO 4624, 2016] : NF EN ISO 4624,** « Détermination de la résistance à l'arrachement par traction », AFNOR, 2016.

**[NF EN 12390-3, 2019] : NF EN 12390-3,** « Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes - Essais pour béton durci - Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes », AFNOR, 2019.

**[Ould Naffa et al., 2002]: S. Ould Naffa, M. Goueygou, B. Piwakowski and F. Buyle-Bodin,** « Detection of chemical damage in concrete using ultrasound », Ultrasonics, 40 , pp. 247-251, 2002.

**[P18-572, 1990] P18-572,** « Granulats - Essai d'usure micro-DEVAL », AFNOR, 1990.

**[P18-573, 1990] P18-573,** « Granulats - Essai de Los Angeles», AFNOR, 1990.

**[Peiyong et al., 2012] G. Peiyong, D. Deng, T. Lei,** « Determination of local damage probability in concrete structure », Procedia Engineering, Vol. 28, pp. 489 – 493, 2012.

**[Ploix,] : M.A. Ploix**, « Etude de l'atténuation des ondes ultrasonores. Application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable austénitique ». Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2006.

**[Redouane, 2005] : D. Redouane**, « Techniques de traitement des signaux ultrasonores appliquées au contrôle non destructif des mat des matériaux ». Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene USTHB, Alger, Algérie, 2005.

**[Toumi, 2011] : W. Toumi Ajimi**, « Evaluation non destructive, par ultrasons, de l'effort présent dans des barres de précontrainte en service », 20ème Congrès Français de Mécanique Besançon, France, 29 août au 2 septembre 2011.

**[ Tyen, 1990] : N.T.Tyen**, « Cours de la technologie du béton », Université Med Boudiaf de M'sila, Algérie, 1990.

**[Vorobien, 1972] : V.A.Vorobien**, «Travaux pratiques des matériaux de constructions », pp. 3–56, Printice hall, Moscou, , 1972.

**[Yousfi et al., 2019] : Q. Yousif, I. Bedirhanoglu , M. Aydin and Z. Zebari**, « The effect of age on the compressive strength of concrete by using ultrasonic pulse velocity », Proceedings of International Structural Engineering and Construction, 2019.

[do-10.14455/ISEC.res.2019.198](https://doi.org/10.14455/ISEC.res.2019.198)

**[Yu et al., 2011] : Z. Yu , Y. Xu and J. Xia**, «Analyse de la dispersion et de l'atténuation des ondes de surface en milieu poroélastique dans la bande de fréquence d'exploration-sismique», Geophysical Journal International, Vol. 187, pp. 871–888, 2011.

**[Yu, 2018] 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 d'Aix Marseille, France, 2018.

**[Zhou, 2006] : X. Zhou**, « Étude paramétrique pour la détermination des contraintes résiduelles par la méthode ultrasonore », Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Troyes, France, 2006.

## *Netographie*

[Site 1] : [http:// www.la.refer.org/matériaux /chapitre-cinq deux.html](http://www.la.refer.org/matériaux/chapitre-cinq-deux.html).

[Site.2]: <http://www.castorama.fr/store/doc/Faire-du-mortier-et-du-beton-300264.html>

[Site.3] : [http://www.deco.fr/bricolage-travaux/glossaire/mortier\\_colle](http://www.deco.fr/bricolage-travaux/glossaire/mortier_colle)

[Site 4] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi\\_de\\_Weibull](https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Weibull)

[site 5] : <https://www.elcometer.com/fr/inspection-beton/sclromtre-beton>

[Site 6] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Dureté>

[Site 7] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Adhérence>