

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



## Mémoire de Mastère

Présenté à l'Université du 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénierie

Département de : "Génie Civil"

Domaine: "Sciences et Technologie"

Spécialité : "Génie Civil ", " Option : Structures "

Présenté par: **BOUAZIZ SAAD et KHAROUBI ABDELRAHMEN**

---

---

**Thème : Diagnostic non destructif des réparations des  
ouvrages en béton**

---

---

**Sous la direction de: Pr. BENOUIS ABDELHALIM**

---

**Juin 2014**

---

## REMERCEMENTS

*Toute notre gratitude et remerciements avant tout vont à Allah  
qui nous a donné la santé, la force, la patience, le courage et la  
volonté de finir ce travail.*

*Nos vifs remerciements vont à notre encadreur le Pr .BENOUIS  
ABDELHALIM pour son encadrement et ses conseils scientifiques  
tout le long de ce travail.*

*Aussi*

*Nos remerciements vont aux membres du jury d'avoir honoré notre  
soutenance et pour l'effort fourni afin de juger ce modeste travail.*

*Nos remerciements vont également à tous nos enseignants qui ont,  
contribués à notre formation.*

*Est on compte aussi :*

*-Bouaziz Farès-*

*- Rouaissia Yamina-*

*-Benzaid Mehdai-*

*-Mehamdia Ali-*

*Pour leurs efforts et aide qui ont fait pour nou*

# *DEDICACES*

*Je dédie ce modeste travail :*

*à ma très chère mère, mon très cher père,*

*à mon frère, et mes sœurs,*

*à toute ma famille,*

*à l'ensemble de mes amis.*

*Bouaziz Saad*

# DEDICACE

*Je dédie le présent travail :*

*A la personne la plus chère et importante dans ma vie,*

*la bougie qui allume mon chemin ma très chère **mère**,*

*à l'âme de mon très cher père,*

*à mes frères, et mes sœurs,*

*à Toute ma famille,*

*à l'ensemble de mes amis.*

*à ceux qui sont chère a moi*

*finalement à mon collègue dans ce travail*

*Kharoubi Abderrahmen*

## ملخص

قد تتطلب هياكل الهندسة المدنية عمليات الإصلاح ، وذلك بسبب العوامل المختلفة التي تؤثر تأثيرا مباشرا على خصائصها. تنفيذ عملية الإصلاح ينبغي أن يتم بشكل جيد لتحقيق النتائج المرجوة، وبالتالي فإن تشخيص عملية الإصلاح مهم جدا. الطريقة العامة المستخدمة لقياس الالتحام بين مواد الإصلاح و الخرسانة الأصلية هي طريقة تهديمية والتي تتمثل في قياس القوة المطلوبة لإزالة مواد التعزيز المركبة من الخرسانة الأصلية. إن هذه التقنية طويلة مكلفة و صعبة الإنجاز لذلك فإن الهدف من هذا العمل المتواضع هو إستخدام طريقة غير تهديمية تتمثل في استخدام الموجات فوق الصوتية السطحية لتحل محل هذه الطريقة التهديمية.

لقد أردنا من خلال هذا العمل المتواضع معرفة إمكانية استخدام تقنية الموجات فوق الصوتية من أجل تقييم الإصلاحات الخاصة بالإنشاءات الخرسانية من أجل هذا قمنا بدراسة أدبية حول نظرية الموجات فوق صوتية (مختلف أنواع الموجات، إنتشارها، خمودها) مع مثال عن استخدام هذا الأسلوب على إصلاحات رقيقة، وأخرى تطبيقية تعتمد أساسا على الارتباطات بين تقنيتنا التقييم (تهديمية بواسطة طريقة الشد و أخرى غير تهديمية بواسطة الموجات فوق الصوتية) . تم إجراء اختبارات على حزم  $15 \times 15 \times 100$  سم<sup>3</sup> بنوعين من المواد المركبة (صفائح ألياف الكربون و النسيج المعزز بألياف الكربون) و شمل التفقيش بالموجات فوق الصوتية الطريقة النصف مباشرة و الطريقة السطحية لإنتشار الموجات. سرعات الموجات فوق صوتية المتحصل عليها تم مقارنتها مع قوى الشد من التجربة التهديمية.

**كلمات المفتاح:** الخرسانة, مواد مركبة, إصلاح, قوة الشد, الموجات فوق الصوتية.

# Résumé

Les ouvrages en génie civil nécessitent parfois des opérations de réparation, à cause des différents facteurs qui nuisent directement aux propriétés de ces ouvrages. L'exécution de l'opération de réparation devrait être bien réussie pour aboutir aux résultats escomptés, donc le diagnostic de l'opération de réparation est très important. La méthode standard utilisée pour tester l'adhérence entre le matériau de réparation et le béton d'origine est une méthode destructive qui consiste à mesurer la force nécessaire pour retirer le matériau composite de réparation du substrat en béton. Cette méthode est longue et coûteuse, et difficile à réaliser. L'objectif de ce travail est l'utilisation d'une méthode non destructive par l'utilisation des ondes ultrasoniques pour se substituer à la méthode destructive.

Nous avons voulu dans ce travail connaître la possibilité d'utiliser la technique ultrasonique pour évaluer les réparations des ouvrages en béton, pour cela on a fait une étude bibliographique sur la théorie des ultrasons (différents types d'onde, propagation, atténuation...) avec un exemple d'utilisation de cette méthode sur les réparations minces et une autre expérimentale basée sur les corrélations entre les deux techniques d'évaluation (destructif par essai d'arrachement et non destructif par essais ultrasoniques). Les essais ont été réalisés sur des poutrelles  $100 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  avec deux types de matériaux composites (Lamelles de Fibres de Carbone LFC et Tissus de Fibres de Carbone TFC). L'auscultation ultrasonique a concerné les propagations en modes semi-directe et de surface (indirecte). Les vitesses ultrasoniques déterminées ont été corrélées aux forces d'arrachement déduites des essais destructifs.

**Mots clés:** béton, composites, réparation, arrachement, ultrasons.

# Abstract

Civil engineering structures may require repair operations, due to diverse factors that directly harm their proprieties. The execution of the procedures of reparation should be well done to achieve the desired results. So the diagnostic of those procedures is very crucial. The standard method used for testing the adhesion between the reparation material and the original concrete is a destructive method which consists of measuring the force required to pull out the composite reparation material from the concrete substrate. This method is time consuming and expensive, and difficult to achieve. The aim of this work is the use of a non-destructive method by the use of ultrasonic waves to substitute the destructive method.

In this study we wanted to know the possibility of using the ultrasonic pulse wave method to evaluate the reparation of concrete construction, for that we made a literature review on the theory of ultrasounds (different types of waves, propagation, attenuation...) with an example of using this method on a thin reparation, and another experimental one based on the correlation between the two assessment methods (the destructive with the pull-out test and the non destructive with the ultrasonic pulse wave). The tests were made on 100x10x10 cm<sup>3</sup> beams with two types of composite materials (plates of carbon fibers and cloths of carbon fiber). The ultrasonic inspection concerns the semi-direct and the surface (indirect) propagation mode. The Ultrasonic velocities determined were correlated with the pull-out test forces deducted from destructive tests.

**Keywords:** concrete, composites, reparation, pull-out, ultrasounds

# Objectif

Le diagnostic des réparations est une étape très importante dans le domaine de la réparation des ouvrages, à cause de l'information donnée sur la qualité de cette réparation.

L'objectif de ce travail est l'utilisation de la technique ultrasonore pour qualifier les réparations. Cette méthode peut s'avérer adéquate aussi bien en terme de temps d'intervention que d'économie des essais. La réflexion et la vitesse des ultrasons peuvent être utilisées pour qualifier la réparation et donner un diagnostic sur les réparations minces des bétons.

## **Présentation de l'étude:**

Ce mémoire se compose de deux parties en plus du résumé, de l'objectif et de l'introduction:

**LA PREMIERE PARTIE** est une étude bibliographique qui se compose de six chapitres :

Chapitre I: Généralités sur le béton,

Chapitre II: Endommagement des structures en béton,

Chapitre III: Evaluation des dommages des structures en béton,

Chapitre IV: Méthodes de renforcement et de réparation des structures en Béton,

Chapitre V: Diagnostic des réparations et des renforcements,

Chapitre VI: Le contrôle non destructif par les ultrasons.

**LA DEUXIEME PARTIE** est une étude expérimentale, elle est scindée en trois chapitres :

Chapitre I: Caractéristiques des matériaux utilisés,

Chapitre II: Méthodologie expérimentale,

Chapitre III: Interprétation et exploitation des résultats des essais.

# Sommaire

Résumé

Objectif

Introduction générale

## Partie I: Etude Bibliographique

### Chapitre I: Généralités sur le béton

I-1 Introduction.....	01
I-2 Rôle des différents éléments constituant le béton.....	01
I-3 Composition de béton.....	01
I-3-1 Le ciment portland.....	01
I-3-2 Les granulats.....	02
I-3-3 L'eau de gâchage.....	02
I-3-4 Les adjuvants.....	03
I-4 Les propriétés du béton.....	04
I-4-1 Propriétés du béton à l'état frais.....	04
I-4-1-1 L'ouvrabilité.....	04
I-4-1-2 Masse Volumique et teneur en air.....	04
I-4-2 Propriétés du béton à l'état durci.....	05
I-4-2-1 Résistance à la compression.....	05
I-4-2-2 Retrait.....	05
I-4-2-3 La perméabilité des bétons.....	06
I-4-3 Propriétés mécaniques du béton.....	07

I-4 Conclusion.....	07
---------------------	----

## **Chapitre II: Endommagement des structures en béton**

II-1 Introduction.....	08
------------------------	----

II-2 Les types d'endommagements affectant les ouvrages en béton.....	08
---	----

II-2-1 Les dégradations d'ordre chimique.....	08
---	----

II-2-1-1 Attaques par les eaux douces.....	09
--	----

II-2-1-2 Attaque par les sulfates.....	10
--	----

II-2-1-3 Attaque par les chlorures.....	11
---	----

II-2-1-4 Attaque par alcali-réaction.....	11
---	----

II-2-2 Les dégradations d'ordre physique.....	12
---	----

II-2-2-1 La fissuration précoce.....	12
--------------------------------------	----

II-2-2-2 Attaque physique.....	13
--------------------------------	----

II-2-2-3 Dégradation mécanique.....	14
-------------------------------------	----

II-2-3 La carbonatation.....	14
------------------------------	----

II-3 Les conséquences des différentes dégradations .....	16
--	----

II-4 Conclusion.....	18
----------------------	----

## **Chapitre III: Evaluation des dommages des structures en béton**

III-1 Introduction.....	19
-------------------------	----

III-2 Campagne d'évaluation.....	19
----------------------------------	----

III-2-1 Dossier de documentation sur l'ouvrage.....	20
---	----

III-2-2 Analyse des conditions de service.....	20
--	----

III-2-3 Visite du site.....	21
-----------------------------	----

III-2-4 Évaluation détaillée.....	22
-----------------------------------	----

III-2-5 Évaluation des données recueillies.....	22
III-3 Méthodes d'évaluation.....	22
III-3-1 Échantillonnage du béton.....	25
III-3-2 Évaluations en laboratoire.....	25
III-4 Conclusion.....	26

**Chapitre IV: Méthodes de renforcement et de réparation des structures en béton**

IV-1 Introduction.....	27
IV-2 Méthodes de renfort.....	27
IV-3 Techniques de renfort des structures en béton armé.....	29
IV-3-1 Amélioration des éléments structuraux à l'aide de chemisage en béton armé.....	29
IV-3-1-1 Les avantages et les inconvénients de la technique.....	29
IV-3-2 Amélioration des éléments structuraux à l'aide de chemises en acier.....	30
IV-3-2-1 Technique d'amélioration.....	31
IV-3-2-2 Chemisage en acier des poteaux.....	33
IV-3-2-3 Assemblages poteau-poutre.....	36
IV-3-2-4 Avantages et inconvénients du chemisage en acier.....	36
IV-3-3 Amélioration des éléments structuraux à l'aide des tôles collées.....	37
IV-3-3-1 Développement de la technique des plats collés.....	37
IV-3-3-2 Problèmes rencontrés lors de son utilisation.....	38
IV-3-3-3 Conditions d'emploi et domaine d'application.....	38
IV-3-3-4 Avantages et Inconvénients des tôles collées.....	38

IV-3-4 Renforcement et réparation par matériaux composite.....	39
IV-3-4-1 Techniques de renforcement.....	41
IV-3-4-2 Quelques applications des matériaux composites « PRF » en génie civil.....	42
a) Les poutres.....	43
b) Les poteaux.....	45
c) Les dalles.....	46
IV-3-4-3 Assemblages poteau-poutre.....	47
IV-4 Conclusion.....	48

## **Chapitre V: Diagnostic des réparations et des renforcements**

V-1 Introduction.....	49
V-2 Caractérisation de l'adhérence.....	49
V-2-1 Modes de rupture.....	49
V-2-2 Modes de sollicitation.....	50
V-2-2-1 Essais de cisaillement.....	51
a) L'essai de cisaillement direct.....	51
b) L'essai de cisaillement oblique en compression.....	51
V-2-2-2 Essai de traction directe (essai d'arrachement).....	52
V-2-2-3 Les essais de mécanique de rupture.....	53
a) Le blister test.....	53
b) Essai de fendage par coin [Wedge Splitting Test (WST)].....	54
c) Les essais de pelage.....	54
d) Le Wedge test.....	55
V-2-3 Les contrôles non destructifs.....	56

V-2-3-1 Vitesses ultrasonores UPV.....	56
V-2-3-2 Contrôle par thermographie infrarouge (Thermal infrared testing).....	57
V-2-3-3 Contrôle radiographique.....	58
V-3 Conclusion.....	59

## **Chapitre VI: Le contrôle non destructif par les ultrasons**

VI-1 Introduction.....	60
VI-2 Théorie des ultrasons.....	60
VI-2-1 Définition.....	60
VI-2-2 Les différents types d'ondes ultrasonores.....	61
VI-2-2-1 Les ondes longitudinales.....	61
VI-2-2-2 Les ondes transversales.....	62
VI-2-2-3 Ondes de surfaces (Combinaison des deux types d'ondes).....	63
VI-2-3 Paramètres de l'onde ultrasonore.....	63
VI-2-3-1 L'impédance acoustique.....	63
VI-2-3-2 La longueur de l'onde.....	64
VI-2-3-3 La pression et l'intensité.....	64
VI-2-4 Émission et réception de l'onde ultrasonore.....	64
VI-2-4-1 Description du faisceau ultrasonore émis.....	64
VI-2-4-1-1 Zone initiale.....	65
VI-2-4-1-2 Zone distale.....	65
VI-2-5 Propagation des ondes ultrasonores.....	67
VI-2-5-1 Propagations d'ondes en milieu hétérogène.....	67
VI-2-5-1-1 Diffraction des ondes par l'hétérogénéité.....	67
VI-2-5-2 L'atténuation.....	68

VI-2-5-2-1 La diffusion.....	69
VI-2-5-2-2 La dispersion.....	69
VI-2-5-2-3 La dissipation.....	69
VI-2-5-3 Influence du milieu sur la propagation des ondes.....	71
VI-2-5-3-1 Microfissures.....	71
VI-2-5-3-2 Taux de saturation.....	71
VI-2-5-3-3 Influence des granulats.....	72
a) Sables.....	72
b) Gros granulats.....	72
VI-2-5-3-4 Influence du ferrailage.....	73
VI-3 Les ondes ultrasoniques de surfaces.....	73
VI-3-1 Mesure de la vitesse ultrasonore de l'onde de surface.....	73
VI-3-2 Évaluation de l'épaisseur d'une bicouche.....	75
VI-3-2-1 Principe.....	75
VI-3-2-2 Dépouillement et interprétation.....	75
VI-3-3 Caractérisation des fissures.....	76
VI-3-3-1 Principe.....	77
VI-4 Position des transducteurs (utilisation d'un sabot).....	78
VI-5 Applications au diagnostic des réparations minces par les ultrasons (exemple de système béton-résine).....	78
VI-5-1 Procédure de contrôle par ultrasons.....	78
VI-5-2 Matériaux et systèmes de planchers testés.....	80
VI-5-3 Évaluation par ultrasons de l'adhésion à des conditions aux Limites.....	81
VI-6 Conclusion.....	83

## **Partie II: Etude Expérimentale**

### **Chapitre I: Caractéristiques mécaniques et physiques des matériaux utilisés**

I-1. Les matériaux utilisés.....	84
I-2. Caractéristiques physiques du sable et du gravier.....	85
I-3. Analyse granulométrique.....	86
I-4. Caractéristiques physiques des matériaux de réparation.....	87
I-4-1. Lamelles composées de fibres de carbone.....	87
I-4-2. Tissus de fibres de carbone.....	88
I-4-3. Colle époxydique thixotrope à deux composants sans solvant.....	88
I-5. La composition d'un béton.....	89

### **Chapitre II: Méthodologie expérimentale**

II-1. Introduction.....	90
II-2. Principes de base et techniques des mesures ultrasoniques....	90
II-3. Principe de l'essai d'arrachement.....	92
II-4. Protocol expérimental.....	93

### **Chapitre III: Interprétation et exploitation des résultats**

III-1. Essais non destructifs.....	97
III-1-1. Transmission surfacique.....	97
III-1-1-1. Poutrelles réparées avec lamelles de fibres de carbone LFC.....	97

III-1-1-2. Poutrelles réparées par tissus de fibres de carbone TFC....	102
III-1-2. Transmission semi-directe.....	106
III-1-2-1. Poutrelles réparées avec lamelles de fibres de carbone LFC.....	106
III-1-2-2. Poutrelles réparées par tissus de fibres de carbone TFC...	107
III-2. Essais destructifs.....	108
III-2-1. Les Poutrelles réparées avec lamelles de fibres de carbone LFC.....	109
III-2-2. Les Poutrelles réparées par tissus de fibres de carbone TFC.....	109
III-3. Corrélacion entre les vitesses en transmission semi- directe « $V_d$ » et la transmission surfacique « $V_s$ » .....	110
III-3-1. Poutrelle réparées avec LFC.....	110
III-3-2. Poutrelle réparées avec TFC.....	111
III-4. Corrélacions entre les vitesses en transmission semi- directe « $V_d$ » et les forces d'arrachement « $F$ » .....	112
III-4-1. Poutrelle réparées avec LFC.....	112
III-4-2. Poutrelle réparées avec TFC.....	114
III-4-3. Evolution de la relation vitesse des ultrasons « $V_d$ » -force aux d'arrachement « $F$ » différentes positions des poutrelles.....	116
III-5. Conclusion.....	120
Conclusion générale	
Référence bibliographiques	
Référence normatives	

# Liste des figures

Figure	Page
<b>Partie I: Etude bibliographique</b>	
Figure I.1: Aéromètre.....	05
Figure I.2: Principe de la perméabilité.....	06
Figure II.1 : Exemple de stalactites blanchâtres en surface du béton.....	10
Figure II.2 : Exemple de faïençage lié à une attaque sulfatique.....	10
Figure II.3 : Conséquences de l'alcali-réaction. a) Echelle macroscopique, b) Echelle microscopique.....	11
Figure II.4 : Exemple de variation de volume créant un gonflement.....	13
Figure II.5 : Exemple de corrosion ayant entraîné décollements du béton.....	15
Figure III.1: Liste des principaux paramètres décrivant les conditions service des structures de béton.....	21
Figure III.2: Principales techniques d'évaluation du béton et des structures.....	23
Figure IV.1: Les différentes techniques de renfort.....	28
Figure IV.2: Chemisage en béton armé d'un poteau.....	29
Figure IV.3: Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier.....	32
Figure IV.4: Barre de recouvrement d'une base de poteau rectangulaire renforcé avec une chemise en acier.....	32
Figure IV.5: Chemisage en acier pour poteaux de section rectangulaire.....	33

<b>Figure IV.6:</b> Géométrie et renforcement d'un poteau circulaire utilisé pour le renforcement de flexion et le renforcement des barres de recouvrement, à l'aide de chemises circulaires en acier.....	<b>35</b>
<b>Figure IV.7:</b> Section rectangulaire enveloppée par une chemise Rectangulaire.....	<b>35</b>
<b>Figure IV.8:</b> Dimensions des spécimens d'essai.....	<b>36</b>
<b>Figure IV.9:</b> Application de plats métalliques.....	<b>37</b>
<b>Figure IV.10:</b> Tôles colées (difficulté de manutention).....	<b>39</b>
<b>Figure IV.11:</b> Les différents éléments de système de renfort par «PRF».....	<b>41</b>
<b>Figure IV.12 :</b> Systèmes de renforcement Sika ® CarboDur ®.....	<b>42</b>
<b>Figure IV.13:</b> Une poutre en béton armé renforcée par une lamelle en «PRF».....	<b>43</b>
<b>Figure IV.14 :</b> Trois types d'ancrages utilisés.....	<b>44</b>
<b>Figure IV.15:</b> Courbe typiques de charge-déflexion des poutres en béton renforcées et non renforcées avec des matériaux composites «PRF».....	<b>45</b>
<b>Figure IV.16:</b> Frettage de poteaux par composites.....	<b>45</b>
<b>Figure IV.17:</b> Renforcement d'une dalle travaillant dans les deux sens par des lamelles en «PRF»: (a) dans les deux directions, (b) concentrées en petites régions ciblées.....	<b>46</b>
<b>Figure IV.18:</b> Plan du renforcement du composite.....	<b>47</b>
<b>Figure V.1 :</b> Modes de rupture des joints collés.....	<b>50</b>
<b>Figure V.2 :</b> L'essai de cisaillement direct.....	<b>51</b>
<b>Figure V.3 :</b> Essai d'adhérence en cisaillement par compression.....	<b>52</b>
<b>Figure V.4 :</b> Le principe de l'essai d'arrachement.....	<b>52</b>

<b>Figure V.5</b> : la courbe pression - hauteur.....	<b>53</b>
<b>Figure V.6</b> : Essai WST, Wedge Splitting Test.....	<b>54</b>
<b>Figure V.7</b> : Les essais de pelage.....	<b>55</b>
<b>Figure V.8</b> : Le Wedge test.....	<b>55</b>
<b>Figure V.9</b> : Différents types de configuration de mesures avec la méthode UPV.....	<b>57</b>
<b>Figure V-10</b> : contrôle par thermographie infrarouge d'une réparation par lamelle en carbone.....	<b>58</b>
<b>Figure V.11</b> : principe de la radiographie.....	<b>59</b>
<b>Figure VI.1</b> : Les trois catégories d'onde acoustique.....	<b>60</b>
<b>Figure VI.2</b> : Oscillations de la pression de l'air générant des ultrasons.....	<b>61</b>
<b>Figure VI.3</b> : Ondes ultrasonores longitudinales.....	<b>62</b>
<b>Figure VI.4</b> : Ondes ultrasonores transversales (cisaillement).....	<b>62</b>
<b>Figure VI.5</b> : Ondes de surface.....	<b>63</b>
<b>Figure VI.6</b> :(a) : Géométrie d'un faisceau d'ondes ultrasonores (b) : représentation du champ de Fresnel et du champ de Fraunhofer pour un élément Piézo-électrique de diamètre D...	<b>66</b>
<b>Figure VI.7</b> : Diffraction par une hétérogénéité.....	<b>68</b>
<b>Figure VI.8</b> : Multidiffusion dans le béton.....	<b>68</b>
<b>Figure VI.9</b> : Décroissance exponentielle des échos en négligeant la diffraction.....	<b>69</b>
<b>Figure VI.10</b> : Mesure en surface.....	<b>74</b>
<b>Figure VI.11</b> : Estimation de la vitesse des ondes de surface.....	<b>74</b>
<b>Figure VI.12</b> : principe de détermination de l'épaisseur d'une bicouche.....	<b>75</b>
<b>Figure VI.13</b> : Exemple de Dépouillement d'une mesure en surface.....	<b>76</b>

<b>Figure IV.14 :</b> Exemple de dépouillement d'une mesure de l'épaisseur de fissure.....	77
<b>Figure IV.15 :</b> Influence d'utilisation d'un sabot (coin) sur les types d'ondes et mode de propagation des ultrasons dans un solide.....	78
<b>Figure VI.16 :</b> Reçu impulsion ultrasonique pour (a) une bonne adhérence et(b) une mauvaise adhérence dans le système B-R.....	79
<b>Figure VI.17 :</b> Schéma de la procédure à ultrasons pour l'évaluation de l'adhérence entre les composites polymères et support en béton.....	80
<b>Figure VI.18 :</b> Schéma de l'évaluation de l'adhérence à ultrasons pendant deux conditions: (a)l'adhérence maximale et (b) zéro -adhérence.....	82

## **Partie I: Etude expérimentale**

<b>Figure I.1 :</b> Données techniques pour lamelle de fibre de carbone pour le renforcement structural.....	87
<b>Figure I.2:</b> Données techniques pour le tissu de fibre de carbone pour le renforcement structural.....	88
<b>Figure II.1:</b> Figure du dispositif ultrasonique ; a-Appareillage ultrasonique utilisé ; b- Transducteurs utilisés.....	91
<b>Figure II.2:</b> positionnement de L'émetteur et du récepteur ; (a) transmission surfacique ; (b) transmission semi-directe.....	91
<b>Figure II.3:</b> Configuration d'un essai classique d'arrachement.....	92
<b>Figure II.4:</b> Photo du dynamomètre de traction utilisé.....	93
<b>Figure II.5:</b> Poutrelles destinées aux essais.....	93
<b>Figure II.6:</b> Photo de l'opération des essais ultrasoniques avant rupture ; (a) : transmission surfacique ;(b) : transmission semi-direct.....	94

<b>Figure II.7:</b> Configuration d'essai de flexion par quatre points.....	<b>94</b>
<b>Figure II.8:</b> photo de l'essai en flexion quatre points.....	<b>95</b>
<b>Figure II.9:</b> Photo de l'opération des essais ultrasoniques après rupture ; (a) : transmission surfacique ;(b) : transmission semi-direct.....	<b>95</b>
<b>Figure II.10:</b> Photo de l'opération d'essais d'arrachement.....	<b>96</b>
<b>Figure II.11:</b> Photos des ruptures lors des essais destructifs (arrachement).....	<b>96</b>
<b>Figure III.1:</b> Estimation de la vitesse sur la poutrelle (13) réparée par des lamelles de fibres de carbone avant rupture.....	<b>98</b>
<b>Figure III.2:</b> Estimation de la vitesse sur la poutrelle (14) réparée par des lamelles de fibres de carbone avant rupture.....	<b>98</b>
<b>Figure III.3:</b> Estimation de la vitesse sur la poutrelle (15) réparée par des lamelles de fibres de carbone avant rupture.....	<b>99</b>
<b>Figure III.4:</b> Estimation de la vitesse sur la poutrelle (13) réparée par des lamelles de fibres de carbone après rupture.....	<b>100</b>
<b>Figure III.5:</b> Estimation de la vitesse sur la poutrelle (14) réparée par des lamelles de fibres de carbone après rupture.....	<b>101</b>
<b>Figure III.6:</b> Estimation de la vitesse sur la poutrelle (15) réparée par des lamelles de fibres de carbone après rupture.....	<b>101</b>
<b>Figure III.7:</b> Estimation de la vitesse sur la poutrelle (10) réparée par TFC avant rupture.....	<b>102</b>
<b>Figure III.8:</b> Estimation de la vitesse sur la poutrelle (11) réparée TFC avant rupture.....	<b>103</b>
<b>Figure III.9:</b> Estimation de la vitesse sur la poutrelle (12) réparée par TFC avant rupture.....	<b>103</b>
<b>Figure III.10:</b> Estimation de la vitesse sur la poutrelle (10) réparée par TFC après rupture.....	<b>104</b>

<b>Figure III.11:</b> Estimation de la vitesse sur la poutrelle (11) réparée par TFC après rupture.....	<b>105</b>
<b>Figure III.12:</b> Estimation de la vitesse sur poutrelle (12) réparée par TFC après rupture.....	<b>105</b>
<b>Figure III.13:</b> Relation entre la vitesse de propagation de l'ultrason $V_{d moy}$ et la force d'arrachement $F_{moy}$ pour les poutrelles répare par LFC.....	<b>113</b>
<b>Figure III.14:</b> Relation entre la vitesse $V_{d moy}$ et la force d'arrachement $F_{moy}$ pour les poutrelles répare par LFC pour les positions 1 ; 2 ; 3 ; 4 et 5.....	<b>114</b>
<b>Figure III.15:</b> Relation entre la vitesse de propagation de l'ultrason $V_{d moy}$ et la force d'arrachement $F_{moy}$ pour les poutrelles répare par TFC.....	<b>115</b>
<b>Figure III.16:</b> Relation entre la vitesse $V_{d moy}$ et la force d'arrachement $F_{moy}$ pour les poutrelles répare par TFC pour les positions 1 ; 3 ; 4 ; 5 et 7.....	<b>115</b>
<b>Figure III.17:</b> Evolution de la relation $V_d$ -F de la poutrelle $P_{10}$ .....	<b>116</b>
<b>Figure III.18:</b> Evolution de la relation $V_d$ -F de la poutrelle $P_{11}$ .....	<b>117</b>
<b>Figure III.19:</b> Evolution de la relation $V_d$ -F de la poutrelle $P_{12}$ .....	<b>117</b>
<b>Figure III.20:</b> Evolution de la relation $V_d$ -F de la poutrelle $P_{13}$ .....	<b>118</b>
<b>Figure III.21:</b> Evolution de la relation $V_d$ -F de la poutrelle $P_{14}$ .....	<b>118</b>
<b>Figure III.22:</b> Evolution de la relation $V_d$ -F de la poutrelle 15.....	<b>119</b>
<b>Figure III.23:</b> Les différentes lignes de rupteur dans les poutrelles.....	<b>119</b>

# Liste des tableaux

Tableau Page

## Partie I: Etude bibliographique

Tableau I-1 : Propriétés mécaniques du béton.....	07
Tableau II-1 : Dégradation par attaque chimique et conséquences.....	16
Tableau II-2 : Dégradation par attaque physique et conséquences.....	17
Tableau III-1 : Principales normes applicables aux techniques d'évaluation du béton et des structures.....	24
Tableau VI.1 : Composition chimique et force de revêtements testés polymères (à partir de feuilles de données techniques de production).....	81
Tableau VI-2 : le rapport des analyses réalisées par la force d'arrachement et l'ultrason.....	83

## Partie II: Etude expérimentale

Tableau I-1: Caractéristiques physiques du sable utilisé (0/5).....	85
Tableau I-2: Caractéristiques physiques du gravier utilisé (5/15).....	85
Tableau I-3: Analyse granulométrique du sable (0/5).....	86
Tableau I-4: Analyse granulométrique du gravier (5/15).....	86
Tableau I-5: Compositions des bétons.....	89
Tableau III-1: Mesure de temps de propagation de l'onde de surface sur les poutrelles réparées avec lamelles de fibre de carbone LFC avant rupture.....	97

<b>Tableau III-2:</b> Mesure de temps de propagation de l'onde de surface sur les poutrelles réparées avec lamelles de fibre de carbone après rupture.....	<b>100</b>
<b>Tableau III-3:</b> Mesures des temps de propagation de l'onde de surface sur les poutrelles réparées TFC avant rupture.....	<b>102</b>
<b>Tableau III-4:</b> Mesure de temps de propagation de l'onde de surface sur les poutrelles réparée par TFC après rupture.....	<b>104</b>
<b>Tableau III-5:</b> Vitesses aux différentes positions dans les poutrelles réparées par LFC.....	<b>106</b>
<b>Tableau III-6:</b> Vitesses aux différentes positions dans les poutrelles réparées par TFC.....	<b>107</b>
<b>Tableau III-7:</b> Force d'arrachement des poutrelles réparées par LFC.....	<b>109</b>
<b>Tableau III-8:</b> Force d'arrachement des poutrelles réparées par TFC.....	<b>109</b>
<b>Tableau III-9:</b> Vitesses moyennes en transmissions surfacique et semi-directe dans les poutrelles réparées par LFC.....	<b>110</b>
<b>Tableau III-10:</b> Vitesses moyennes calculées par les transmissions surfacique et semi-directe pour les poutrelles réparées par TFC.....	<b>111</b>
<b>Tableau III-11:</b> Vitesses des ultrasons et forces d'arrachement des poutrelles réparées avec LFC après rupture.....	<b>112</b>
<b>Tableau III-12:</b> Vitesses des ultrasons et forces d'arrachement des poutrelles réparées avec TFC après rupture.....	<b>114</b>

# Liste des notations

$Q$ : Débit volumique d'un fluide.

$k$ : La perméabilité d'un matériau poreux.

$\mu$ : La viscosité de fluide.

$dp$ : La différence de pression.

$dx$ : L'épaisseur de matériau.

$A$ : La section apparente du matériau.

$P$ : La pression.

$R_c$ : Résistance du béton à la compression.

$R_t$ : Résistance de béton à la traction.

$E_b$ : Module d'Young du béton.

$\nu_b$ : Coefficient de Poisson du béton.

$\rho$ : La masse volumique du béton.

$C$   $C_1$   $C_2$   $C_3$ : Constantes.

$E_f$ : Module d'Young du film

$\nu_f$ : Coefficient de Poisson du film

$\sigma_i$ : Contrainte interne dans le film.

$a$ : Rayon de la coque.

$t$ : épaisseur du film.

$G_e$ : énergie d'adhérence film-substrat.

$G_f$ : énergie de fracture.

$\beta$ : l'angle de pelage.

**F** : La force de pelage.

**b** : La largeur de substrat.

**I** : L'intensité du photon transmis.

**I<sub>0</sub>** : L'intensité du photon incident.

**μ** : Le coefficient d'atténuation.

**X** : L'épaisseur de l'objet.

**U<sub>1</sub>** : Le champ de déplacement suivant x.

**U<sub>2</sub>** : Le champ de déplacement suivant y.

**U<sub>3</sub>** : Le champ de déplacement suivant z.

**Z** : L'impédance acoustique.

**C** : La vitesse du son.

**ρ** : La densité du milieu.

**f** : La fréquence d'émission.

**P** : La pression d'onde acoustique.

**I** : L'intensité ultrasonore.

**d** : Le diamètre de la zone.

**l** : La longueur de la zone.

**D** : Le diamètre de la source.

**λ** : La longueur de l'onde ultrasonore.

**r<sup>2</sup>/λ** : Distance de la zone supérieure.

**r** : Le rayon de la source.

**θ** : L'angle de divergence.

**α** : L'atténuation.

**α<sub>absorp</sub>, α<sub>iverg</sub>, α<sub>diffus</sub>** : Les composantes de l'atténuation.

$d$  : La taille des diffuseurs.

$a_1$  : Le coefficient dissipation.

$a$  : Le coefficient de dispersion.

$D$  : Le diamètre moyen des granulats.

$A_x$  : L'amplitude à une distance  $x$ .

$A_0$  : L'amplitude initiale.

$V_R$  : La vitesse des ondes de surface.

$d$  : La pente de la droite qui donne la variation du temps.

$e$  : L'épaisseur de la couche de béton altérée.

$V_1$  : La vitesse dans le béton altéré.

$V_2$  : La vitesse dans le béton sain.

$d$  : La distance du point de rupture de la pente.

$h$  : La profondeur de fissure.

$V$  : La vitesse.

$\Delta t$  : l'écart entre le deux points.

$MS$  : Le moment définie dans le domaine temporel.

$A_i$  : L'amplitude du  $i^{\text{ème}}$  point.

$n_0$  : Le nombre de points avec la première amplitude différente de zéro.

## **Introduction générale :**

Les ouvrages de génie civil, bâtiments, ouvrages d'arts, réseaux, galeries, routes,... sont destinés à assurer un certain nombre de fonctions, certaines pour une durée limitée, d'autres pour de beaucoup plus longues durées, parfois plusieurs siècles.

Et tout le long de vie de ces ouvrages ils subissent des dégradations physico-chimique, biologiques ou structurales, au niveau du béton et des armatures (silico-alkalin, retrait, corrosion,...) qui causent des fissurations excessives qui peuvent affecter leur apparence, leur durabilité et même leur performance.

L'identification des origines et les causes de ces dégradations est une des étapes les plus importantes et les plus difficiles de tout le processus de réparation des structures endommagées. Il faut donc prévoir une campagne d'évaluation détaillée de l'état de la structure où elle varie d'une simple évaluation visuelle jusqu'à être beaucoup plus détaillée et comporte toute une série de prélèvements ou d'analyses in situ ou en laboratoire, son but sera d'obtenir des informations sur l'étendue des dommages et d'établir les causes des dégradations.

Donc les ouvrages en béton nécessitent des opérations de réparation ou de renforcement pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités. Ces derniers qui varient l'un de l'autre par la nature de matériau utilisé et la technique de réalisation, ce qui nous donne des types de réparations différents, traditionnelles comme le chemisage soit en acier ou en béton et d'autre nouvelles comme les réparations par matériaux composites qui se distingue par : une forte résistance mécanique, un poids léger, et une facilité de mise on œuvre.

Il est donc important de pouvoir mesurer la qualité de cette réparation par des mesures basées sur la qualité de l'adhérence entre le produit de réparation et le béton d'origine par des moyens destructif qui ont pour but d'évaluer les

conditions de rupture des adhésifs soit par la simulation des sollicitation (cisaillement, traction, flexion), soit par l'observation de l'initiation et la propagation d'un délaminage (les essais de mécanique de rupture), ou non destructif qui permet de caractériser la réparation sans démolition par des auscultation sonore, thermique et radiographique.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre projet dans les principaux objectifs sont l'utilisation des ondes ultrasoniques pour évaluer la qualité de la réparation.

**Partie I:**

**Etude**

**bibliographique**

**CHAPITRE I:**

**Généralités sur  
le béton**

## I-1 Introduction

Le béton est un matériau hétérogène formé par mélange de ciment, de sable, de gravillons et d'eau, et éventuellement d'adjuvants et d'additions. Chacun de ces constituants joue un rôle différent dans le comportement du béton frais, pendant la prise et le durcissement. Le béton fabriqué doit avoir à l'état frais une consistance adaptée et à l'état durci une résistance garantie et une durabilité assurée.

## I-2 Rôle des différents éléments constituant le béton

- ✓ Ciment: c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients.
- ✓ L'eau: c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.
- ✓ Les granulats: ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va "coller" les granulats.

## I-3 Composition de béton

### I-3-1 Le ciment portland

Le ciment est un liant qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant présence d'eau. Le ciment portland un mélange de clinker et de gypse finement broyés. Le clinker est obtenu dans les fours à ciment par cuisson à haute température de calcaire ( $\text{CaCO}_3$ , environ 80%) et d'argile ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , le tout à environ 20%), donnant lieu à des nodules dures. C'est en broyant très finement ceux-ci (diamètre des grains inférieur à  $100\mu\text{m}$ ) additionnés d'un peu de gypse que l'on produit le ciment portland largement utilisé. Faisant prise, le ciment forme une pâte qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

Depuis les années 1980 le béton de pur ciment portland est devenue très rare. Les formulations courantes contiennent désormais des ciments avec ajouts, ainsi que des adjuvants ou des charges ultrafines telles que la fumée de silice. Tous les ciments courants peuvent être classés en cinq types en fonction de leur composition, puis par classe en fonction de leur résistance. Les fumées de silice sont plus en plus employées grâce au développement des bétons à Très Haute Performance (BTHP) possédant un faible rapport E/C. [LAB.11]

### I-3-2 Les granulats

Les granulats proviennent dans la plupart des cas des roches naturelles. Leur utilisation pour la confection d'un béton est motivée par le faible coût volumique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment-eau [NEV.92]. La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influent d'une manière considérable sur le comportement du béton à l'état frais.

La dimension de ces granulats varie d'un dixième à plusieurs dizaines de millimètres. La norme française [N-1] donne une définition des principales divisions granulométriques des granulats :

- Sable 0/D avec  $1 \text{ mm} < D \leq 6,3 \text{ mm}$ ,
- Gravieron d/D avec  $d \geq 1 \text{ mm}$  et  $D \leq 125 \text{ mm}$ ,
- Gravier 0/D avec  $D > 6,3 \text{ mm}$ .

### I-3-3 L'eau de gâchage

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton. En effet, l'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide (l'eau de gâchage), et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation et donc la résistance mécanique (l'eau de prise).

L'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer

de l'eau de mer qui contient du chlorure de sodium car les sels dissous dans l'eau peuvent intervenir dans la rhéologie du béton, la prise de la pâte de ciment et la durabilité du matériau durci (attaque des aciers d'armatures par les chlorures). Selon la norme française [N-2] la quantité de sels dissous ne dépasse pas 2000mg/L. [LAB.11]

### I-3-4 Les adjuvants

Les adjuvants des produits chimiques incorporés au béton en faibles quantités afin d'en améliorer certaines propriétés. Les adjuvants les plus courants peuvent être organiques ou inorganiques et sont habituellement classés selon leur fonction :

- ❖ **Les réducteurs d'eau** qui ont pour fonction de diminuer le rapport E/C du béton tout en conservant la maniabilité désirée.
- ❖ **Les retardateurs** qui permettent de ralentir le durcissement de la pâte.
- ❖ **Les accélérateurs** qui permettent d'accélérer le développement de la résistance au jeune âge du béton et d'accélérer sa prise.
- ❖ **Les superplastifiants** qui sont des polymères organiques solubles dans l'eau et dont la synthèse conduit à de longues chaînes de molécules de masses moléculaires élevées. Leur principale action est s'enrouler autour des grains de ciment de sorte qu'ils se repoussent les uns les autres, entraînant une dispersion des grains.
- ❖ **Les agents entraîneurs d'air** qui confèrent au béton durci la capacité de résister aux effets de gels et dégel successifs en favorisant la formation de microbulles d'air réparties de façon homogène.

## I-4 Les propriétés du béton

Le béton peut répondre à un grand nombre de spécifications: isolation thermique et phonique, aspect, durabilité, sécurité incendie... Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés:

- \* à l'état frais lorsqu'il est plastique et qu'on peut le travailler.
- \* à l'état durci quand sa forme ne peut plus être modifiée, ses caractéristiques continuent à évoluer.

### I-4-1 Propriétés du béton à l'état frais

#### I-4-1-1 L'ouvrabilité

La caractéristique essentielle du béton frais est l'ouvrabilité (maniabilité), qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci. Un béton frais doit être facilement maniable et facile à mettre en place. Il doit être aussi homogène et cohésif. Pour remplir toutes ses qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés.

Il existe un très grand nombre d'appareils de mesure de l'ouvrabilité du béton reposant sur des principes différents. Certains mesurent une compacité, d'autres un temps d'écoulement etc.

#### I-4-1-2 Masse Volumique et teneur en air

La masse volumique est la masse par unité de volume d'un béton. L'essai est effectué conformément à la norme [N-3].

L'appareillage utilisé est un aéromètre (voir figure I.1). Le béton est placé en 3 couches consolidées avec 25 coups de pilon. La surface supérieure du béton est ensuite arasée à l'aide de la règle.

La masse du contenant rempli de béton - la tare divisée par le volume du contenant donne la masse volumique du béton. À l'aide de l'air mètre-t-on mesure le volume d'air occlus ou entraîné du béton.

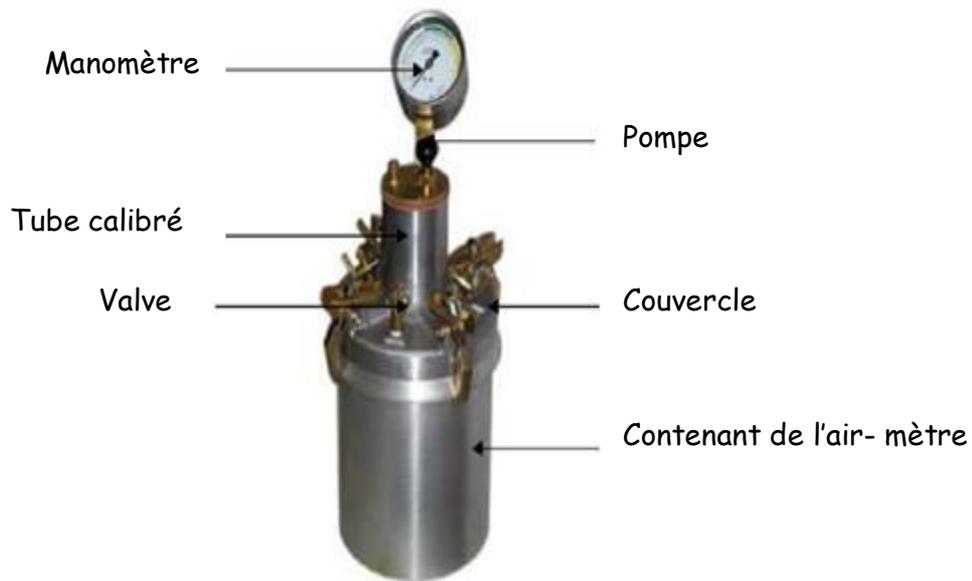


Figure I.1: Aéromètre.

## I-4-2 Propriétés du béton à l'état durci

### I-4-2-1 Résistance à la compression

La connaissance des propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages. Assez souvent, beaucoup de professionnels du béton considèrent que la caractéristique essentielle du béton durci est sa résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours). Sa résistance à la traction ainsi que celle en flexion sont beaucoup plus faibles que sa résistance à la compression.

### I-4-2-2 Retrait

C'est la diminution de longueur d'un élément de béton dû essentiellement au mouvement d'eau dans la matrice cimentaire. On distingue 4 types de retrait:

- **retrait plastique** dû à la dessiccation de la pâte de ciment en début de prise.
- **retrait par auto-dessiccation** (endogène) au cours de l'hydratation
- **retrait thermique** causé par les différences de température au

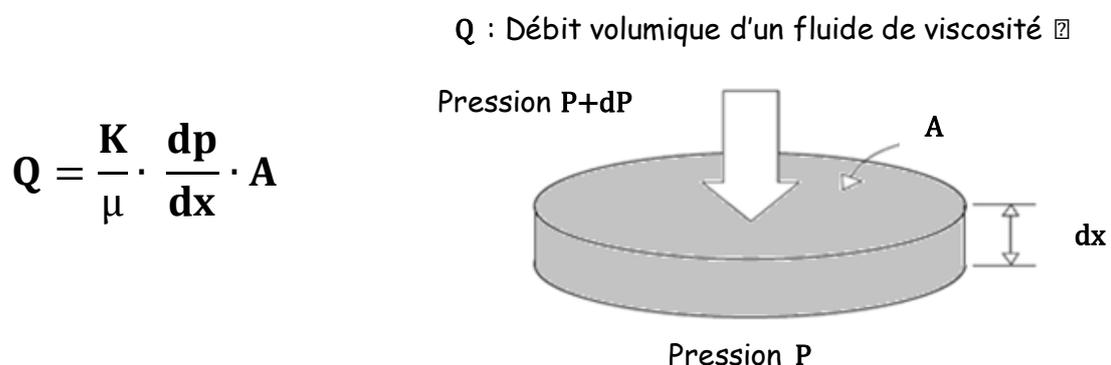
cours de l'hydratation.

- **retrait à long terme** causé (séchage) par l'évaporation de l'eau contenue dans le béton.

### I-4-2-3 La perméabilité des bétons

La perméabilité d'un matériau est définie comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide sous un gradient de pression. Il s'agit donc d'une propriété macroscopique des matériaux poreux ayant une porosité ouverte interconnectée.

Les bétons durables sont, en général, des bétons de faible perméabilité dans la mesure où la faible perméabilité limite la pénétration des agents agressifs au sein du béton. Cette condition n'est pas toujours suffisante, car les phases solides du béton peuvent être plus ou moins réactives vis-à-vis des agents agressifs. Si la perméabilité est une condition générale de durabilité, il conviendra de considérer les conditions particulières spécifiques à chaque type d'agression. La perméabilité  $k$  d'un matériau poreux est définie par la relation de Darcy qui exprime le débit volumique  $Q$  d'un fluide de viscosité  $\mu$  qui traverse une épaisseur  $dx$  de matériau de section apparente  $A$  sous la différence de pression  $dp$ .



**Figure I.2:** Principe de la perméabilité.

### I-4-3 Propriétés mécaniques du béton

Les propriétés mécaniques finales d'un béton solide dépendent directement du choix de la formulation. Ainsi, il existe de très nombreux bétons, dont les caractéristiques mécaniques sont définies dans le cahier des charges par l'usage qu'il en sera fait.

Historiquement, les caractéristiques retenues pour désigner un béton sont ses résistances mécaniques en compression et en traction. Des normes ont également été édictées au regard du classement des bétons. **La norme actuelle [N-4]** retient cinq critères pour définir un béton : la classe d'exposition, la classe de résistance, la classe de consistance, la dimension maximale des granulats et les classes de chlorures. Seules ces grandeurs ont longtemps intéressé les professionnels du bâtiment. [QUI.12]

On cherchait alors uniquement à connaître le comportement du matériau pour une situation donnée, et non à le rattacher à des paramètres plus classiques comme les modules d'Young ou Coefficient de Poisson. Il existe néanmoins des méthodes de détermination de ces derniers paramètres, présentés tableau I. 1.

**Tableau I-1:** Propriétés mécaniques du béton.

$R_c$ (MPa)	$R_t$ (MPa)	$E$ (MPa)	$\nu$	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )
12-60	1-5	20-43	0.15-0.20	2200-2400

### I-5 Conclusion :

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé du temps moderne, la disponibilité des ses composants, ses caractéristique à l'état frais et à l'état durci avec son cout modéré le rendent dans le domaine de la construction pour plusieurs décennies encore interchangeable.

**CHAPITRE II:**  
**Endommagement**  
**des ouvrages en**  
**béton**

## II-1 Introduction

Tous les ouvrages de béton vont éventuellement souffrir de dégradations qui peuvent affecter leur apparence, leur durabilité et même leur performance. Les causes de ces détériorations sont d'origines physiques, chimiques, biologiques ou structurales.

Au niveau de la structure du béton, ces endommagements se traduisent dans un premier temps par le développement de microfissures. Celles-ci viennent s'ajouter à celles initialement induites par le mécanisme de prise. Par la suite, pour un niveau de sollicitation plus élevé, l'endommagement se traduit par la génération de macro fissures qui, à terme, peuvent conduire à la rupture.

## II-2 Les types d'endommagements affectant les ouvrages en béton

Les différents types d'endommagements, ainsi que leurs conséquences respectives sur le béton sont donc présentés :

### II-2-1 Les dégradations d'ordre chimique

La dégradation du béton peut résulter de diverses réactions chimiques qui ont pour support commun l'eau et proviennent de l'environnement (nature, concentration, renouvellement ou non des agents agressif). Les ouvrages sont en effet exposés à la pluie, à la neige, au gel dégel, à l'eau de mer,... La solution interstitielle du béton, située dans sa porosité, présente un pH basique (environ 12,5) dû à la nature de pate de ciment :

- 15 à 20 % d'une base forte la portlandite.
- 70 % de C-S-H silicates de calcium hydratés considérés comme des sels d'acide faible (silicique) et de base forte.
- 10 à 15 % d'aluminates et sulfoaluminates de calcium hydratés.
- des alcalins dans la solution interstitielle dans les pores et les capillaires

Or le pH de l'environnement extérieur est bien inférieur à cette valeur. Il un

déséquilibre chimique entre le béton et le milieu extérieur, ce qui conduit à la production de sels solubles ou insolubles. Ce type de dégradation est classé en deuxième position derrière la corrosion.

Les agents chimiques agressifs sont variés :

- Les gaz : d'origine naturelle ou résultant de pollution atmosphérique et de fermentation comme le dioxyde de carbone, de soufre et d'azote, les vapeurs chlorées...
- Les liquides : organiques ou non, acides ou basiques, dont les ions sont agressifs.
- Les solides : des déchets d'origine divers ou issus de sols.
- Les milieux biologiques : essentiellement des bactéries, champignons, organismes présents dans l'eau de mer...

Les mécanismes fondamentaux d'altération du béton se présentent sous trois formes :

- Hydrolyse (dissolution issue des ions réagissant avec l'eau) des hydrates de la pâte de ciment durcie.
- Réaction d'échange entre le milieu agressif et les composés hydratés
- Réaction (cristallisation) entraînant la formation de produit expansif. **[FNI.06]**

Ils existent aussi plusieurs autres types d'attaques chimiques.

#### **II-2-1-1 Attaques par les eaux douces**

L'attaque du béton par les eaux douces agressives dépend de la teneur en dioxyde de carbone agressif, des possibilités de renouvellement de l'eau, de la compacité du béton et du type de ciment. Le résultat peut conduire à une dissolution de la chaux très soluble dans l'eau, phénomène de lixiviation. Si le béton contient beaucoup de chaux, cette attaque devient importante. Ces eaux sont principalement issues du ruissellement de l'eau de pluie pure. Les conséquences sont une réduction des propriétés mécaniques du béton associée à une augmentation de la porosité interne qui se manifeste parfois par l'apparition

d'efflorescences ou de petites stalactites blanchâtres en surface du béton.

[FNI.06]



**Figure II.1:** Exemple de stalactites blanchâtres en surface du béton.

#### II-2-1-2 Attaque par les sulfates

Les sulfates se trouvent naturellement dans les sols, ils peuvent être d'origine naturelle, biologique, ou provenir de pollution domestiques ou industrielles, ils constituent un élément nutritif pour les plantes à des concentrations faibles. Par contre l'utilisation des engrais chimiques conduit à la production de sulfate d'ammonium très agressif, qui se retrouve dans les eaux souterraines, le béton au contact des eaux souterraines, de l'eau de mer, des pluies acides...réagit chimiquement avec les ions sulfates, ce qui conduit à de la cristallisation sous forme d'aiguilles, le développement de ces cristaux engendre des contraintes internes importantes. [FNI.06]



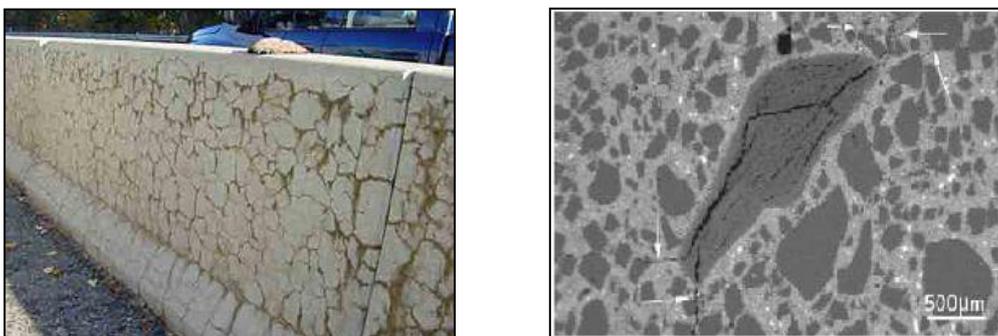
**Figure II.2:** Exemple de faïençage lié à une attaque sulfatique.

### II-2-1-3 Attaque par les chlorures

L'eau de mer renferme des ions variés et les ouvrages en milieu marin peuvent être continuellement immergés ou continuellement émergés ou alternativement immergés ou émergés. En dehors de l'environnement marin, en hiver, certains ouvrages sont soumis aux sels de déverglaçage. L'attaque du béton par les ions chlorures s'effectue donc en présence d'eau de mer, d'embruns ou de sels de déverglaçage. Les chlorures pénètrent dans les pores par diffusion ou le long d'une fissure. Ils n'agressent pas la pâte de ciment mais, s'ils atteignent les armatures, ils entraînent leur corrosion. [FNI.06]

### II-2-1-4 Attaque par alcali-réaction

Cette attaque est favorisée par un milieu humide (80 à 85 % d'humidité au minimum) et conditionnée par la teneur en alcalins du béton. Certains types de granulats contiennent des formes de silices réactives (silice amorphe) et réagissent alors avec la phase liquide interstitielle du béton contenant des alcalins comme le sodium et le potassium. Ceci s'accompagne de formation de gel de type silico-alcalin capable d'absorber une grande quantité d'eau et donc de gonfler. Ce gonflement des gels peut entraîner une expansion du béton d'où fissuration et création de pores dans le béton. Cette fissuration est présente généralement sous forme de réseaux de maille étroite avec des fissures de faible profondeur appelée faïençages (figure II.3). [FNI.06]



**Figure II.3:** Conséquences de l'alcali-réaction. a) Echelle macroscopique, b) Echelle microscopique.

## II-2-2 Les dégradations d'ordre physique

### II-2-2-1 La fissuration précoce

Pour réaliser un béton résistant à l'action des agents agressifs, il est nécessaire de diminuer le risque de fissuration et donc d'interconnexion de la porosité. Les fissures précoces sont plus particulièrement préjudiciables et proviennent de quatre phénomènes physiques :

- ✓ le ressuage (avant la prise) : apparition d'une pellicule d'eau à la surface horizontale du béton frais sous l'effet de la pesanteur et tassement important des granulats peuvent s'accompagner de la création de fissures ouvertes au droit des obstacles s'opposant au mouvement du béton ; les fissures se situent en face supérieure au dessus des armatures qui gênent le tassement.
- ✓ le retrait plastique (avant et pendant la prise) : retrait de dessiccation du béton frais ou en cours de prise, il est contrôlé par la vitesse d'évaporation de l'eau ; les fissures se présentent sous forme d'un maillage.
- ✓ la contraction thermique (après la prise) : phase de durcissement s'accompagnant d'une élévation de température d'où une expansion puis une contraction du béton ; les fissures se situent en surface et sont peu profondes à proximité des jonctions de pièces en béton.
- ✓ le retrait par auto-dessiccation : retrait de la pâte de ciment au cours de son hydratation : les fissures sont plus importantes en présence d'un gradient important de retrait de l'ouvrage. **[FNI.06]**

Cette fissuration précoce est la plus pénalisante pour la durabilité du béton car elle crée des fissures ouvertes.

### II-2-2-2 Attaque physique

Les attaques physiques sont essentiellement dues à l'environnement et au climat extérieur : gel-dégel, érosion, abrasions...

Les cycles de gel-dégel créent des dégradations dans les zones de l'ouvrage non protégées par un revêtement étanche. Cela se traduit par des variations de volume et plus particulièrement des gonflements qui créent des écaillages de surface (gonflement partiel) ou de la fissuration en réseau (gonflement important). Les variations de température importantes et les gradients d'humidité affectent aussi les performances mécaniques de l'ouvrage par des variations de volume d'où la création de fissures dans certaines zones de l'ouvrage. [FNI.06]



Figure II.4: Exemple de variation de volume créant un gonflement.

### II-2-2-3 Dégradation mécanique

La dégradation mécanique a essentiellement pour origine les charges appliquées à l'ouvrage. Son chargement favorise internes en particulier les chargements cycliques ou les surcharges permanente. Une crée une déformation importante de la structure appelée fluage. Ce fluage dépend de plusieurs facteurs :

- La température,
- L'âge du béton,
- Le degré d'humidité,
- Le rapport entre la contrainte de service et celle de rupture.

Ce fluage entraîne par la suite une diminution de la précontrainte et/ou de la résistance mécanique et la formation de fissures évolutives dans les structures hyperstatiques précontraintes. **[FNI.06]**

L'action du courant ou les chocs de corps flottants créent sur les piles de pont de l'abrasion mais aussi la fissuration qui peut ensuite continuer à s'ouvrir.

### **II-2-3 La carbonatation**

L'air contient du dioxyde de carbone qui réagit avec les différents hydrates et principalement la portlandite pour donner du carbonate de calcium.

La carbonatation a aussi lieu avec le dioxyde de carbone dissous dans l'eau qui réagit avec la chaux passée en solution. La vitesse du processus de carbonatation dépend de la facilité de pénétration du dioxyde de carbone à l'intérieur des pores du béton. Cette vitesse est liée à l'humidité relative. En effet, le coefficient de diffusion du dioxyde de carbone dans l'air est dix mille fois plus élevé que dans l'eau. La pénétration du dioxyde de carbone dans les pores est par contre très faible quand les pores sont saturés d'eau. En milieu humide et avec apport d'oxygène, la couche passive est détruite et la corrosion se développe car le PH du béton carbonaté diminue et la protection de l'acier disparaît. Cette corrosion entraîne par la suite une réduction de la section des armatures et diminue la capacité portante des ouvrages. De plus l'augmentation du volume de rouille par rapport au métal d'origine entraîne des contraintes dans le béton d'enrobage qui créent des fissures.

Ces fissures apparaissent dès que la couche d'oxyde atteint une épaisseur de 0.1 mm. Si les fissures restent normales aux armatures, la corrosion reste localisée dans des zones étroites entraînant simplement une altération de l'aspect extérieur de l'ouvrage. Si les fissures se développent parallèlement aux armatures (cas le plus fréquent), la corrosion s'accroît fortement jusqu'à créer des décollements du béton d'enrobage, diminuer l'étanchéité et les performances mécaniques de l'ouvrage. **[FNI.06]**



**Figure II.5:** Exemple de corrosion ayant entraîné décollements du béton.

## II-3 Les conséquences des différentes dégradations

Les tableaux suivants résument les différents types de dégradation chimiques et physiques, et leur conséquence.

**Tableau II-1: Dégradation par attaque chimique et conséquences. [FNI.06]**

Origine	Conséquence sur le matériau béton	pathologie	Fonction altérée		
			Stabilité	Etanchéité	Durée de vie
Réaction alcali-granulat	Formation d'un gel expansif	Fissuration Gonflement	X	X	X
Attaque par les sulfates ou sulfures	-Cristallisation de sels dans les pores du béton -Formation d'efflorescences en surface	Erosion Désintégration et perte de ciment	X		X
Lixiviation	Lessivage de la chaux	Augmentation de la porosité	X		X
Attaque par les chlorures (milieu marin ou sels de déverglaçage)	-Dépassivation des aciers -Possibilité de démarrage de réactions sulfatique	Corrosion des aciers Fissuration Déamination	X	X	X
Carbonatation	-Dépassivation des aciers	Corrosion des aciers Fissuration Déamination	X	X	X

**Tableau II-2: Dégradation par attaque physique et conséquences. [FNI.06]**

Origine	Conséquence sur le matériau béton	pathologie	Fonction altérée		
			Stabilité	Etanchéité	Durée de vie
Retrait	Contraintes internes	Fissuration	X	X	
Fluage (pression, précontrainte) Sollicitation Mécanique (chargement, flexion...)	Diminution des performances mécaniques, déformation excessive	Fissuration	X		
Variations d'humidité	Variation de volume	Fissuration	X	X	X
Cycles de gel/dégel	Variation de volume : gonflement depuis la surface jusqu'au volume entier, les cavités remplies d'eau augmentent jusqu'à +9%	Fragmentation écaillage de surface, éclatement	X		X
Cycles thermique (dilatation, contraction)	Baisse des caractéristiques mécaniques	Eclatements, Fissures	X		X
Action du courant sur des ouvrages immergés Chocs	Abrasion, érosion, cavitation	Perte de matière usure de surface			X
Fatigue, vibration	Déformation excessive	Micro fissures près des agrégats et des barres, décollement aux interfaces fissuration	X		

**II-4 Conclusion :**

La vie des structures en béton armé est mise en danger de plusieurs façons, depuis les dégradations d'ordre chimique avec ses différentes attaques critiques qui proviennent généralement de l'environnement extérieur vers les dégradations d'ordre physique avec ces impacts de fissuration et de changement de l'aspect esthétiques des ouvrages en béton. On retrouve aussi des dégradations d'ordre mécanique qui mettent la résistance et la stabilité des ouvrages en jeu. On a aussi la corrosion d'armatures qui est l'effet le plus courant, le plus important et le plus dévastateur dans le domaine de construction des structures en béton armé.

**CHAPITRE III:**  
**Evaluation des**  
**dommages des**  
**ouvrages**

### **III-1 Introduction**

L'identification des origines et les causes des dégradations est une des étapes les plus importantes et les plus difficiles de tout le processus de réparation des structures endommagées. Il faut donc prévoir une campagne d'évaluation détaillée de l'état de la structure, son but sera d'obtenir des informations sur l'étendue des dommages et d'établir les causes des dégradations.

Elle fait partie d'un processus, constitué de plusieurs étapes, qui permettra de choisir la ou les méthodes de réparation les plus appropriées en fonction du type de dégradation.

### **III-2 Campagne d'évaluation**

Elle est généralement nécessaire pour évaluer la performance et l'intégrité structurale des d'ouvrages détériorés ou très âgés, elle varie d'une simple évaluation visuelle jusqu'à être beaucoup plus détaillée et comporter toute une série de prélèvements ou d'analyses in situ ou en laboratoire. Elle a pour but d'aider à établir les causes des dégradations et à choisir les techniques de réparations appropriées.

La campagne d'évaluation peut comporter 5 grandes étapes :

- Dossier de documentation sur l'ouvrage,
- Analyse des conditions de service,
- Visite du site,
- Évaluation détaillée,
- Évaluation des données recueillies. [EMM.94]

#### **III-2-1 Dossier de documentation sur l'ouvrage**

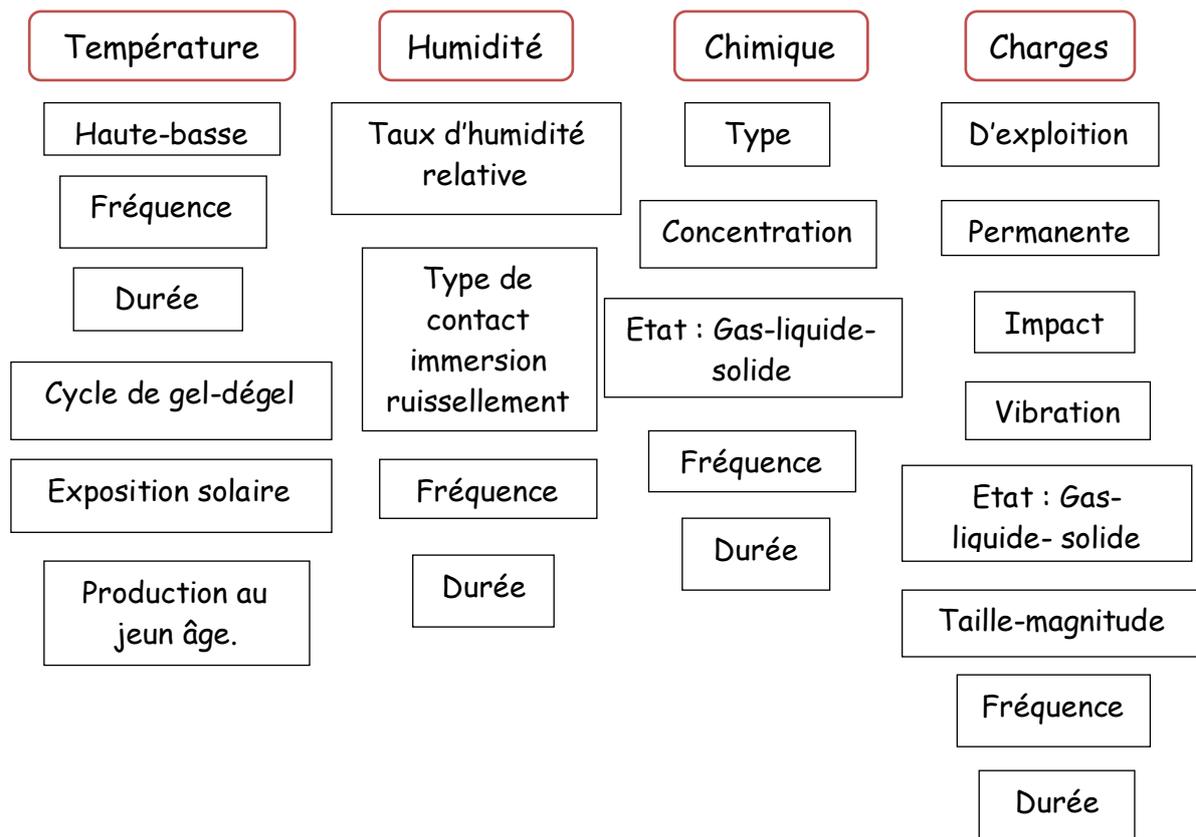
Cette étape consiste à rassembler toutes les informations disponibles concernant la conception, la construction, l'utilisation et l'entretien de la structure :

- Spécifications d'origine,
- Plans, photos,
- Dossier de construction, de surveillance,
- Rapports d'essais sur les matériaux,
- Changements effectués durant la construction,
- Réparations antérieures. [EMM.94]

### III-2-2 Analyse des conditions de service

L'analyse des conditions de service est une des étapes les plus importantes de la campagne d'évaluation. Très souvent, les principales causes des dégradations sont directement liés aux conditions de service, elle consiste d'abord à évaluer dans quelle mesure la fonction actuelle de la structure (conditions de service) correspondent aux spécifications d'origines (elle devrait être effectuée avant la première visite sur le site). Sur la quelle on peut identifier les points suivants:

- Les zones les plus sollicitées ;
- Les parties exposées aux cycles de gel-dégel, aux cycles thermiques et aux variations d'humidité, etc. [EMM.94]



**Figure III.1:** Liste des principaux paramètres décrivant les conditions de service des structures de béton. [EMM.94]

### III-2-3 Visite du site

La visite sur le site peut permettre à l'ingénieur de déterminer dans quelle mesure il est nécessaire d'entreprendre un programme d'investigation plus détaillé. Il est généralement conseillé de prévoir des schémas ou des plans simplifiés qui pourront être utilisés pour localiser les principaux problèmes observés lors de la visite du site, les activités suivantes peuvent être effectuées sur le site :

- Observations visuelles,
- Prise de photos,
- Identification et localisation des zones fortement sollicitées,
- Observation des zones critiques (joints, appuis, système de drainage, etc.),

- Localisation des fissures, des Délamination et des autres types de dégradations,
- Mesures des ouvertures et des longueurs des fissures. [EMM.94]

### III-2-4 Évaluation détaillée

L'évaluation détaillée peut comporter les activités suivantes :

- **Essais non destructifs,**
- Campagne de carottage,
- Cartographie des fissures,
- Instrumentation (déplacements, efforts, température, humidité, écoulements),
- Programme des essais à effectuer sur les échantillons prélevés par carottage,
- Programme d'essais in situ. [EMM.94]

### III-2-5 Évaluation des données recueillies

Cette étape consiste à évaluer et analyser l'ensemble des données (techniques, visuelles, historiques, climatiques) obtenues sur le site et au laboratoire.

### III-3 Méthodes d'évaluation

Il existe de très nombreuses méthodes ou techniques d'évaluation qui peuvent aider à diagnostiquer les principales causes des dégradations (figure III.2), c'est surtout l'expérience de l'ingénieur spécialiste en réparations qui permettra de choisir la meilleure méthode d'évaluation parmi l'ensemble des méthodes disponibles. Les différentes entre ces derniers permettent de caractériser les propriétés mécaniques et les caractéristiques chimiques et physiques du béton et de caractériser le comportement de l'environnement général de la structure.

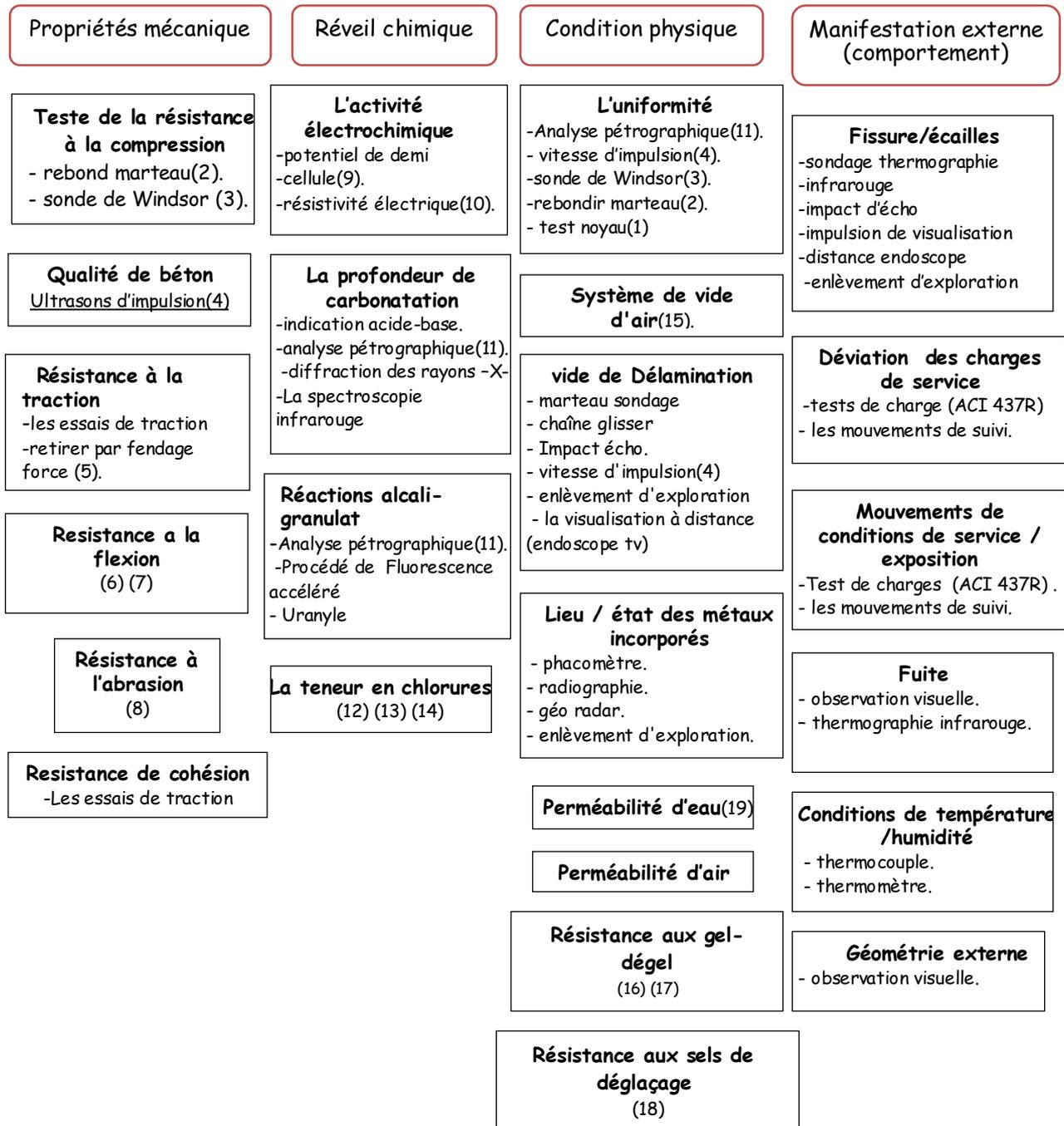


Figure III.2: Principales techniques d'évaluation du béton et des structures.

[EMM.94]

**Tableau III-1:** Principales normes applicables aux techniques d'évaluation du béton et des structures. [EMM.94]

N°	Désignation	Titre
1	ASTM C 42	obtenir et analyser les carottes prélevées et enregistrées poutres en béton
2	ASTM C 805	rebondir nombre de béton durci
3	ASTM C 803	résistance à la pénétration
4	ASTM C 597	vitesse d'impulsion à travers le béton
5	ASTM C 496	force de traction : fractionnement d'échantillons cylindriques en béton
6	ASTM C 78	résistance à la flexion du béton en utilisant un faisceau simple avec troisième point de chargement
7	ASTM C 293	résistance à la flexion du béton en utilisant un faisceau simple avec béton points de chargement
8	ASTM C 418	résistance à l'abrasion du béton par sablage
9	ASTM C 876	le potentiel de demi-cellule de non revêtue de l'acier d'armature dans le béton
10	ASTM D 3633	résistivité électrique des systèmes membrane-chaussée
11	ASTM C 856	pratique courante de l'examen pétrographique de béton durci
12	AASHTO T 259	résistance du béton à la pénétration des ions chlorure
13	AASHTO T 260	échantillonnage et d'essai de l'ion chlorure total dans les matières premières en béton et béton
14	AASHTO T 277	La détermination rapide de la perméabilité en chlorure dans le béton
15	ASTM C 457	détermination microscopique des paramètres du système de vides d'air dans le béton durci
16	ASTM C 666	résistance du béton à la congélation et la décongélation rapide
17	ASTM C 671	dilatation critique de spécimens en béton soumis au gel
18	ASTM C 672	résistance à l'effritement de la surface du béton exposé à des produits chimiques de dégivrage
19	ASTM C 642	absorption et vides de densité dans le béton durci

### III-3-1 Échantillonnage du béton

L'échantillonnage du béton (carottage, sciage) constitue une étape importante du processus d'évaluation in situ de la structure et son importance se résume dans les étapes suivantes :

- Il est important de retenir que les échantillons doivent être représentatifs des éléments structuraux analysés,
- La dimension (diamètre) des carottes est généralement en fonction de la dimension maximale des granulats,
- Il est important de bien identifier les carottes pour pouvoir retrouver leur localisation dans l'ouvrage,
- Il est généralement utile de prélever des carottes non seulement dans les parties les plus détériorées mais aussi dans les parties saines. L'analyse comparative des résultats d'essais facilite souvent l'identification des causes des dégradations. [EMM.94]

### III-3-2 Évaluations en laboratoire

L'évaluation en laboratoire commence généralement par une description des échantillons (types, dimension, provenance, etc.).

Elle peut comporter les analyses suivantes :

- Analyse pétrographique,
- Caractéristiques des vides d'air,
- Essais mécaniques (compression, traction, flexion),
- Densité, absorption,
- Teneur en ions chlore,
- État des aciers d'armature,
- Mesures soniques,
- Dosages en ciment et en granulats,
- Analyse chimique de la pâte. [EMM.94]

**III-4 Conclusion :**

On constate à travers cette partie, que les pathologies sont d'origines diverses et qui il est nécessaire de recourir à plusieurs analyses pour avoir la cause de ces endommagements et pathologies.

**CHAPITRE IV:**  
**Méthodes de**  
**renforcement**  
**et de**  
**réparation**

## IV-1 Introduction

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, des matériaux utilisés, de sa réalisation ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance. Le béton résiste au temps qu'il fait et au temps qui passe. Mais les ouvrages en béton peuvent nécessiter des opérations de réparation ou de renforcement pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités.

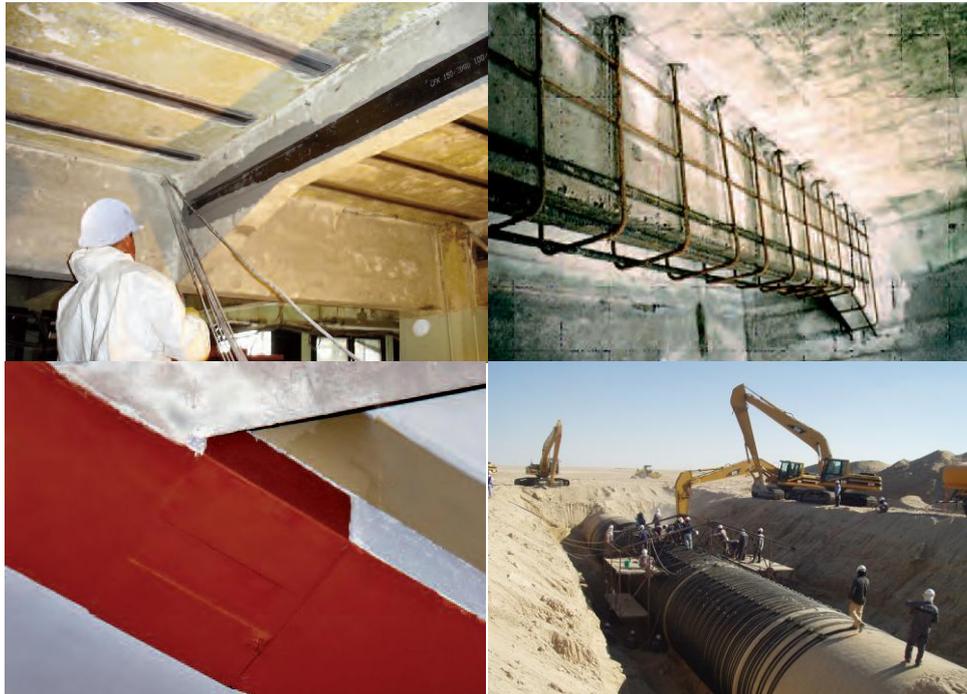
De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité et répondent à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés sur les matériaux ou sur les structures. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter, après un diagnostic complet et précis des désordres, de leurs causes et de leurs évolutions.

## IV-2 Méthodes de renfort

Le but d'un renforcement ou de réparation est de donner ou d'augmenter la capacité portante nécessaire à la structure concernée. Dans le domaine de la construction, il existe de nombreuses procédures de renforcement des structures [VIZ.00], [FOO.01], les plus courantes sont :

1. Incorporation de profils en acier : il s'agit de construire une structure parallèle à celle déjà existante qui supporte les charges. Ce type de structure demande beaucoup d'espace, il est seulement viable pour de grands renforcements.
2. Collage d'éléments préfabriqués : cette méthode nécessite des ouvrages spéciaux associés.
3. Addition d'armatures en acier sans augmentation de la section en béton : cette technique est normalement employée pour le remplacement d'une ancienne armature, en cas de corrosion.

4. Augmentation de la section en béton avec ou sans addition d'armature en acier. Le béton peut être coulé ou projeté.
5. Adjonction de platines en acier. L'acier collé au béton augmente la section structurelle résistante. On l'utilise dans les poutres, dalles, murs, piliers.
6. Adjonction de lamelles, bandes ou tissus de matériaux composites. Le concept est le même que dans le cas précédent, à la différence que l'élément résistant incorporé est fait de matériaux composites (habituellement, de résine époxy et de fibres de carbone, verre ou d'aramide).
7. Amélioration des structures par précontrainte extérieure.
8. Amélioration de la structure des bâtiments à l'aide de dispositifs amortisseur. [BEN.10]



**Figure IV.1:** Les différentes techniques de renfort.

## IV-3 Techniques de renfort des structures en béton armé

### IV-3-1 Amélioration des éléments structuraux à l'aide de chemisage en béton armé

Le chemisage en béton armé consiste en une augmentation considérable des sections (Figure IV.2) par la mise en œuvre d'un ferrailage additionnel à l'ancien élément et d'un nouveau béton d'enrobage pour favoriser l'accrochage, ce dernier sera mis en œuvre après la confection du coffrage. [FUK.00] ; [MON.03].

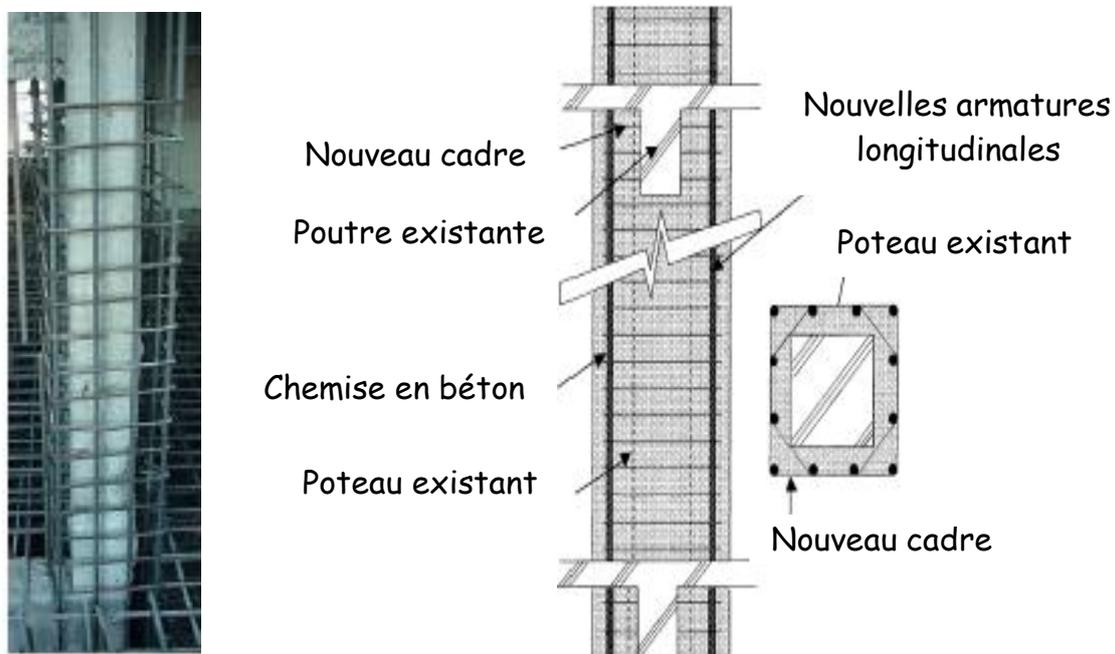


Figure IV.2: Chemisage en béton armé d'un poteau. [FUK.00]

#### IV-3-1-1 Les avantages et les inconvénients de la technique

- ✓ Les avantages :
  - Technique peu coûteuse du fait des matériaux utilisés,
  - Main d'œuvre peu qualifiée.
- ✓ Les inconvénients :
  - Augmentation considérable des sections donc du poids de la structure,
  - Les éléments sont plus encombrants et moins esthétiques,

- Nécessité de mettre hors service l'ouvrage à renforcer pendant la durée des travaux qui est généralement longue,
- Transport des matériaux,
- Nécessité de coffrages.

### **IV-3-2 Amélioration des éléments structuraux à l'aide de chemises en acier**

Le renforcement des poteaux de sections circulaires ou rectangulaires avec des chemises en acier permet d'améliorer considérablement la résistance sismique des poteaux. L'efficacité des chemises en acier a été clairement démontrée, à la fois par les recherches expérimentales et par des observations sur le terrain effectuées durant le séisme de Northridge en 1994. Plusieurs ponts dont les piles étaient renforcées avec des chemises en acier se trouvaient dans des régions ayant subi des secousses intenses qui ont atteint une accélération maximale de 0,25 g. Aucun de ces piles ne semble avoir subi de dommages

Importants. [CHA.96]

Toutefois, cette technique est coûteuse et exigeante en main-d'œuvre. Compte tenu de la grande efficacité de cette technique et de son coût. Les chemises en acier pourraient éventuellement être utilisées dans les installations industrielles possédant un nombre restreint de poteaux nécessitant un renforcement. Cependant, dans le cas des bâtiments types où plusieurs poteaux doivent être renforcés, cette technique s'avère trop onéreuse.

Les chemises en acier rectangulaires destinées au renforcement des poteaux rectangulaires améliorent aussi la résistance et la ductilité des poteaux.

Peu de recherches ont été effectuées sur le renforcement des assemblages poteau-poutre des bâtiments plus anciens. Les systèmes de dalles employés dans les structures de bâtiments ordinaires rendraient difficiles les opérations de renforcement des assemblages poteau-poutre. [BEN.10]

### IV-3-2-1 Technique d'amélioration

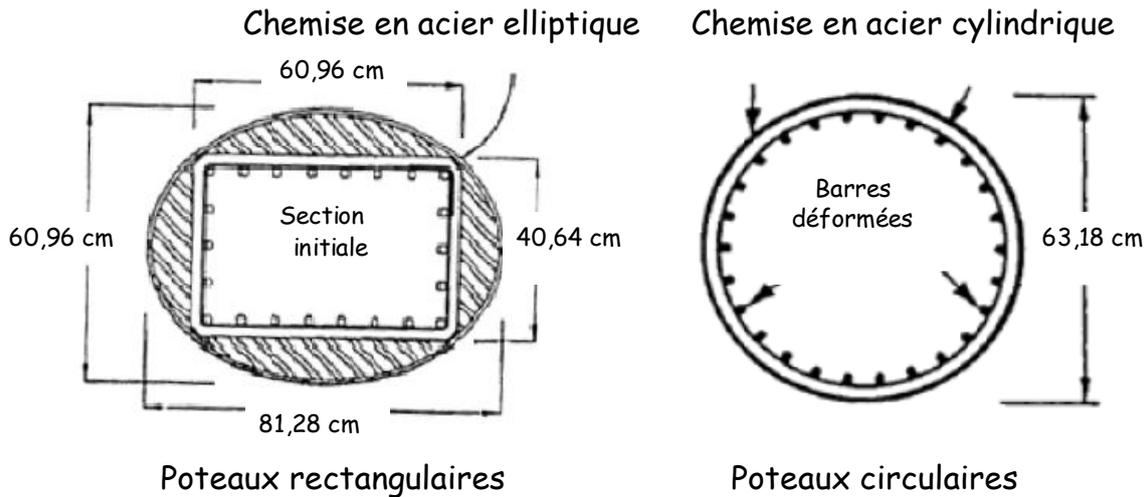
Les chemises en acier sont largement utilisées pour accroître la résistance des poteaux aux séismes ou pour les réparer. Les caractéristiques des différentes chemises en acier (telles que la géométrie des chemises et les propriétés du coulis) peuvent varier, bien que la procédure et le fondement de la plupart des systèmes de gainage d'acier soient plus ou moins similaires.

Un poteau circulaire déficient est enveloppé de couches (ou chemises) d'acier préfabriquées soudées ou jointes mécaniquement. Le mince espace entre la chemise et le poteau, généralement inférieur à 10 mm, est rempli de coulis de ciment afin d'assurer la continuité entre la chemise et le poteau. La nouvelle section de poteau, qui se compose de la section de poteau existante et de la nouvelle couche d'acier externe, est aussi plus solide (possède une résistance à la charge plus élevée) et plus rigide.

Pour les poteaux circulaires, les chemises prennent la forme de deux demi-couches légèrement surdimensionnées pour faciliter leur installation, soudées sur place aux jointures verticales. Pour les poteaux rectangulaires, la chemise est habituellement roulée en forme elliptique et les espaces les plus larges entre le tubage et le poteau sont remplis de béton plutôt que de coulis de ciment (Figure IV.3).

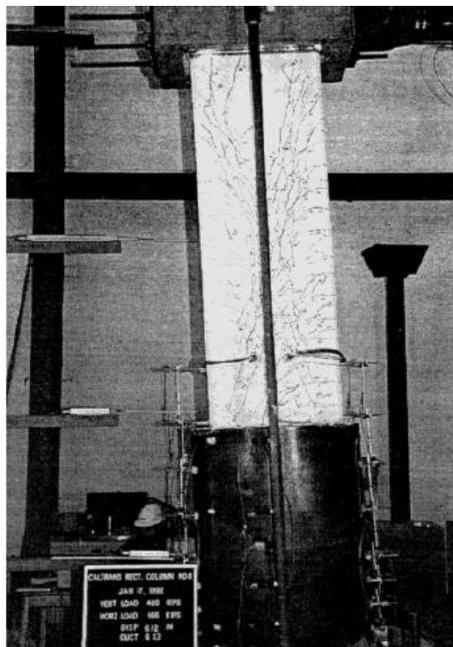
Un espace vertical d'environ 25 mm est généralement prévu entre la chemise et la semelle. La Figure IV.4 montre un poteau rectangulaire renforcé avec une chemise en acier elliptique à la base de la barre de recouvrement appropriée.

**[PRI.96] ; [BEN.10]**

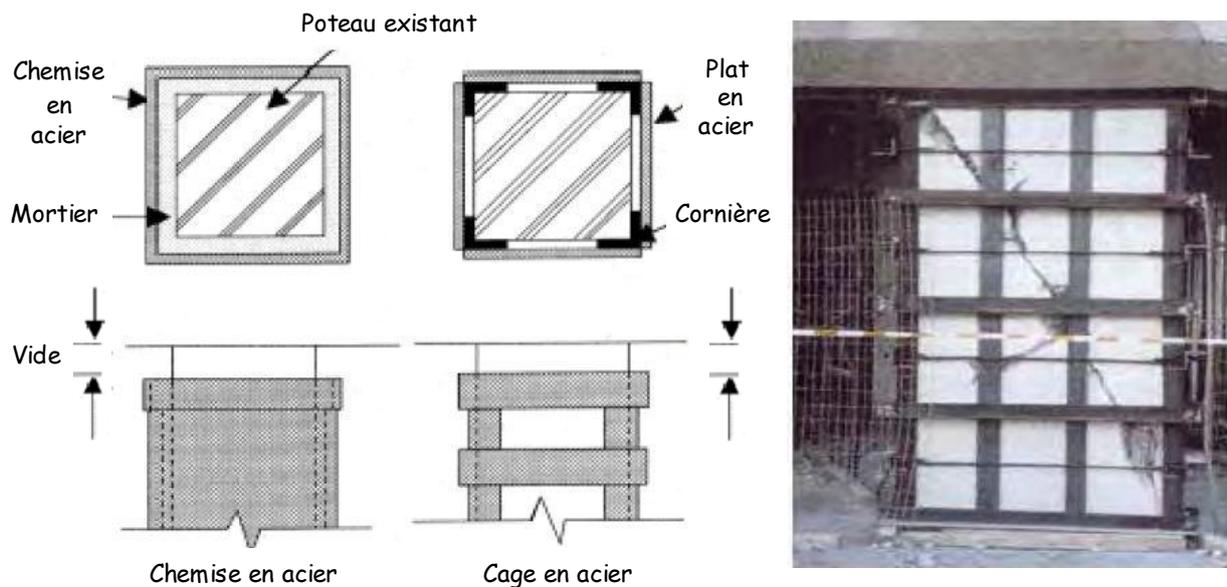


**Figure IV.3:** Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier. [PRI.94a] [PRI.94b]

Les chercheurs ont décrit une autre manière de chemisage en acier qui consiste à souder des cornières longitudinales avec des aciers plats transversaux autour des poteaux rectangulaires, avec la possibilité de précontrainte (Figure IV.5). [BEN.10]



**Figure IV.4:** Barre de recouvrement d'une base de poteau rectangulaire renforcé avec une chemise en acier. [PRI.96]



**Figure IV.5:** Chemisage en acier pour poteaux de section rectangulaire.

#### IV-3-2-2 Chemisage en acier des poteaux

L'efficacité du gainage d'acier pour le renforcement de poteaux en béton armé a été étudiée par plusieurs chercheurs. En 1987, l'université de Californie à San Diego a entrepris un important programme de recherche consistant à examiner diverses techniques de renforcement pour les poteaux de ponts en vue d'améliorer la performance sismique des ponts existants. L'université de Californie a effectué des essais sur plusieurs poteaux enveloppés d'acier afin d'examiner la possibilité d'utiliser les chemises en acier pour renforcer la résistance à la flexion et la résistance au cisaillement des poteaux et pour prévenir le décollage des barres de recouvrement dans les poteaux des ponts plus anciens.

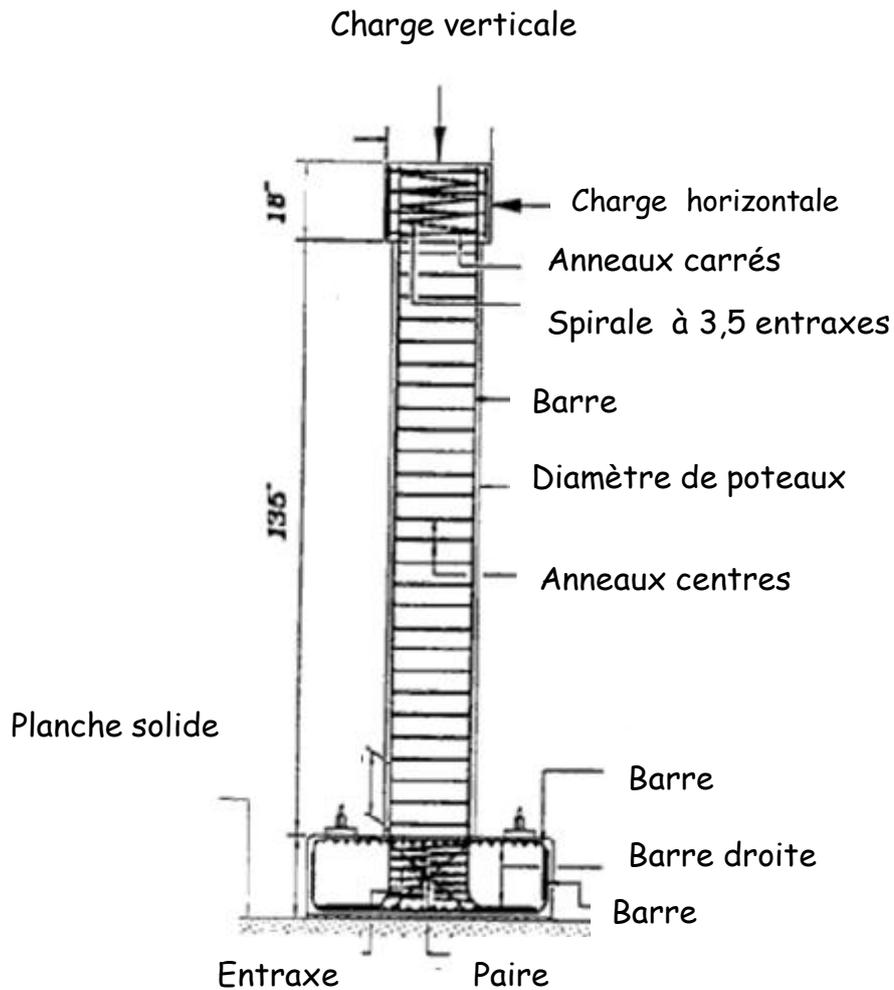
✓ Flexion: [CHA.96] ont effectué des vérifications expérimentales de la performance des poteaux circulaires renforcés avec des chemises en acier. Un groupe d'essais portait particulièrement sur l'amélioration de la résistance à la flexion des poteaux. La figure IV.6 présente la géométrie et le renforcement des poteaux utilisés pour les essais sur la flexion. La longueur de la chemise employée pour renforcer le poteau était de 1,2 m, de façon à ce que le moment

situé juste au-dessus de la chemise ne soit pas supérieur à 75% de la résistance à la flexion.

✓ Cisaillement: **[PRI.94a]** et **[PRI.94b]** ont étudié l'efficacité des chemises en acier pour les poteaux renforcés, aux tensions de cisaillement insuffisantes. Les essais ont été effectués à la fois sur des poteaux circulaires et rectangulaires (figure IV.3), à l'aide de chemises en acier appliquées sur toute la longueur. Des chemises circulaires ont été utilisées pour renforcer les poteaux circulaires et des chemises elliptiques ont servi au renforcement des poteaux rectangulaires.

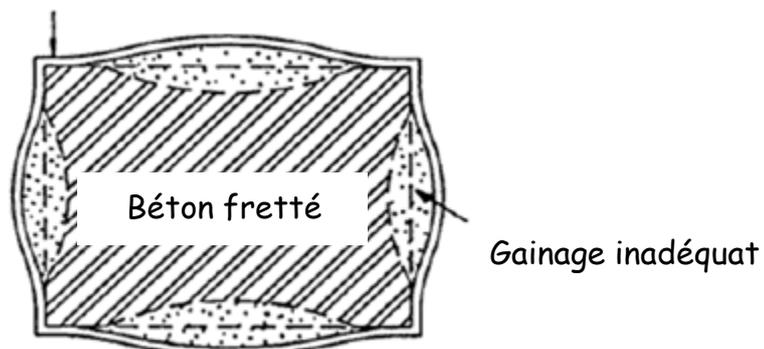
✓ Décollage des barres de recouvrement: **[CHA.96]** ont également étudié l'efficacité des chemises en acier circulaires sur le plan de l'amélioration de la performance des poteaux circulaires ayant des barres de recouvrement inadéquates. Les poteaux construits possédaient des barres de recouvrement 20 fois plus grandes que le diamètre de la barre longitudinale située dans la région de la rotule plastique (c'est-à-dire juste au-dessus de la semelle), ce qui était une pratique courante dans l'industrie de la construction avant les années 70. La longueur de la chemise était de 1,20m, tel que l'indique la Figure IV.6.

✓ Chemises en acier rectangulaires: Les recherches menées sur le renforcement des poteaux en béton armé réalisées à l'université de Californie à San Diego sont principalement associées à l'usage de chemises en acier circulaires et elliptiques. Les recherches sur les poteaux rectangulaires sont très limitées. **[PRI.94a]** ont mentionné que «...les essais antérieurs réalisés principalement au Japon et en Nouvelle-Zélande ont montré que le gonflement des chemises rectangulaires tendait à survenir dans la région des rotules lorsque les poteaux subissaient des décalages latéraux cycliques importants, même lorsque de larges chemises étaient utilisées. Par conséquent, les chemises rectangulaires n'ont pas provoqué un confinement adéquat du béton, ni un renforcement de la compression dans la région de la rotule plastique...». Cela est présenté sur la Figure IV.7.



**Figure IV.6:** Géométrie et renforcement d'un poteau circulaire utilisé pour le renforcement de flexion et le renforcement des barres de recouvrement, à l'aide de chemises circulaires en acier. [CHA.96]

#### Chemise rectangulaire



**Figure IV.7:** Section rectangulaire enveloppée par une chemise rectangulaire. [PRI.94a]

### IV-3-2-3 Assemblages poteau-poutre

Au cours des dernières décennies, plusieurs études expérimentales portant sur la réaction des assemblages intérieurs et extérieurs types auxquels étaient appliquées des charges cycliques ont été effectuées. Toutefois, très peu de recherches et d'études expérimentales ont été effectuées sur les techniques de renforcement des assemblages.

Des études ont été entreprises pour une application particulière, c'est à dire pour des joints de cadres brutes (sans dalle), soutenant les larges conduits en béton des centrales nucléaires.

La méthode sous-entend l'usage du système des chemises en acier ondulées, tel que cela est indiqué sur la figure II.8. [BEN.10]

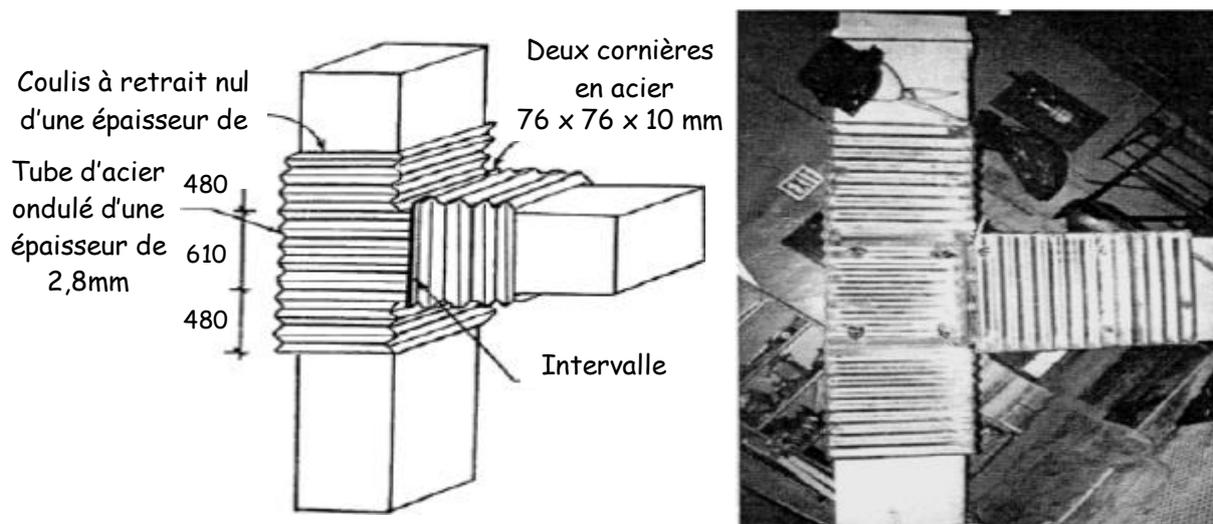


Figure IV.8: Dimensions des spécimens d'essai. [GHA.96]

### IV-3-2-4 Avantages et inconvénients du chemisage en acier

✓ Les Avantages :

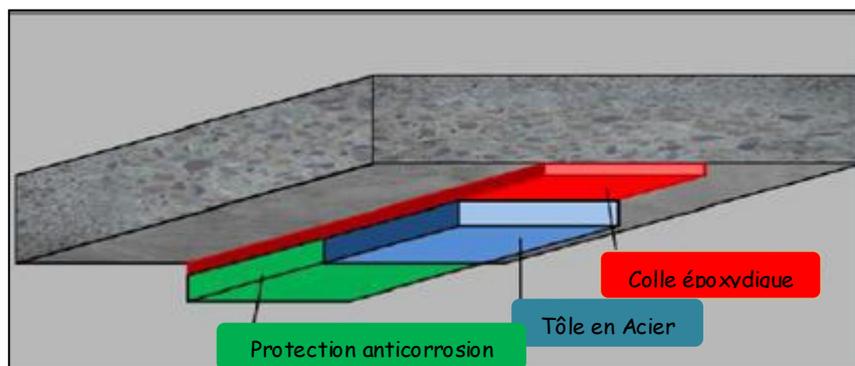
- Courte durée de réalisation par rapport au chemisage en béton,
- Bonne performances des éléments renforcés (bonne ductilité),
- Faible augmentation des sections.

## ✓ Les Inconvénients :

- Coûts relativement élevés,
- Nécessité de soudure donc une main-d'œuvre qualifiée,
- Problème de corrosion ce qui nécessite un entretien régulier,
- Poids des chemises et difficulté de découpage.

**IV-3-3 Amélioration des éléments structuraux à l'aide des tôles****Collées****IV-3-3-1 Développement de la technique des plats collés**

On s'est intéressé, dès le début des années soixante, à l'utilisation de ces composés adhésifs polymérisant à froid pour associer du béton à des composants d'acier disposés extérieurement (Figure IV.9). D'abord utilisée dans le « béton plaqué » (collage de béton sur des tôles d'acier jouant à la fois le rôle de coffrage et d'armatures externes), cette technique fut étendue, au renforcement et à la réparation des structures en béton armé. Ce type de renforcement consiste à pallier les insuffisances locales ou globales des structures en béton par des tôles d'acier collées en surface du béton. Il fut appliqué très rapidement pour des renforcements de poutres de pont-roulant, puis pour le renforcement d'ouvrages d'art dont le niveau de service n'était plus suffisant compte tenu de l'évolution du trafic supporté [THE.97]. [BEN.10]



**Figure IV.9:** Application de plats métalliques.

### **IV-3-3-2 Problèmes rencontrés lors de son utilisation**

Le succès rencontré par cette technique conduisant à cette époque à envisager son utilisation pour la réparation d'ouvrages d'art en béton précontraint. Ce fut en particulier le cas pour le viaduc d'accès au pont de Gennevilliers en 1978. Des insuffisances locales de précontraintes au droit des sections de couplage faisaient craindre une rupture par fatigue des câbles dans ces zones. Des tôles furent alors collées à cheval sur ces fissures afin de limiter les risques. Des mesures faites lors de la réception des travaux mirent en évidence une forte flexion locale des tôles aux droits des fissures. Des études plus approfondies, menées au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de ce type de réparation et de cerner, avec une plus grande précision, les domaines d'emploi de cette technique. [BEN.10]

### **IV-3-3-3 Conditions d'emploi et domaine d'application**

La technique des tôles collées, qui fut utilisée d'abord dans le domaine du bâtiment industriel [BRE.71], s'est très vite répandue dans le domaine des ouvrages d'art où dans bien des cas elle a permis soit d'accroître la capacité portante d'un ouvrage, soit de renforcer localement une structure présentant des insuffisances de résistance. [BEN.10]

### **IV-3-3-4 Avantages et Inconvénients des tôles collées [LUY.99]**

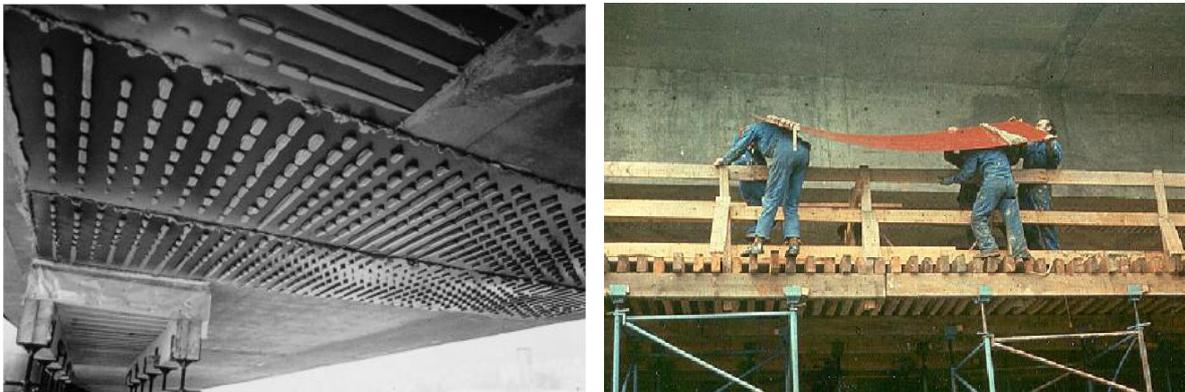
✓ Les Avantages :

- Il n'exige que des interventions mineures sur la structure,
- Il est d'un emploi souple,
- Les renforts sont peu encombrants.

✓ Les Inconvénients :

- Sensibilité de l'acier à l'oxydation (il demande donc une protection et un entretien soigné),
- Impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, même sous faible épaisseur (solicitation le long d'une face),

- Nécessité d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des tôles nécessite une surface parfaitement plane pour assurer l'uniformité de l'épaisseur de l'adhésif),
- Nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage,
- Impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masse manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités de réparation (Figure IV.10).



**Figure IV.10:** Tôles colées (difficulté de manutention).

#### **IV-3-4 Renforcement et réparation par matériaux composite**

La technologie du renforcement par les polymères renforcés de fibres est l'une des technologies les plus efficaces d'accroissement de la résistance des éléments structuraux porteurs. Son application est relativement simple, très peu dérangement pour les utilisateurs des ouvrages renforcés et peu exigeante en main-d'œuvre. Ainsi, elle représente l'une des solutions de rechange les plus souhaitables en matière d'accroissement de la résistance des ouvrages existants ou leurs réparation. Les caractéristiques non corrosives des fibres de carbone ou de verre et leurs résistances à la plupart des substances chimiques donnent à ce système une durée de vie bien plus longue que celle des matériaux conventionnels

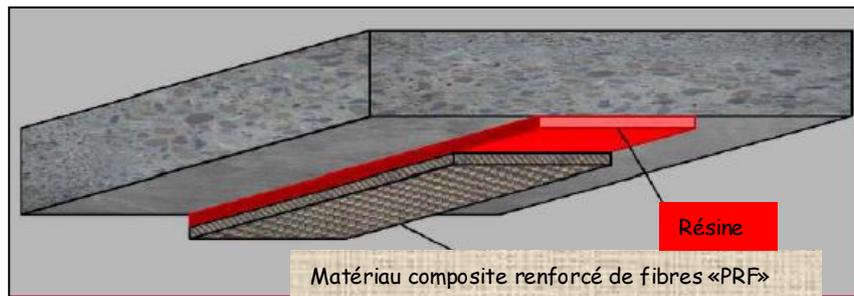
tels que l'acier, c'est à dire une valeur plus économique à long terme.

Les termes «matériau composite renforcé de fibres», «composite amélioré» ou «polymère renforcé de fibres : «PRF» » sont généralement employés pour désigner les matériaux en fibres synthétiques telles que la fibre de verre, la fibre de carbone et la fibre d'aramide enchâssée dans une matrice (résine époxy ou vinylester). Les composites de fibres possèdent habituellement un rapport résistance-poids plus élevé que celui des matériaux de construction conventionnels tels que l'acier, et une excellente résistance à la corrosion.

Ces matériaux ont initialement été développés pour les industries aérospatiales et de la défense. C'est la hausse de la demande des matériaux de construction efficaces et durables qui entraîne une plus grande utilisation de ces matériaux composites améliorés dans les constructions civiles ([FOO 01], [TEN.02]). De récentes recherches et tentatives de développement ont révélé que ces matériaux permettraient de renforcer plusieurs structures en béton armé existantes.

Les lamelles en polymère renforcé de fibres collées à l'extérieur, ont été introduites en Allemagne et en Suisse vers le milieu des années 80 comme solution de rechange au procédé consistant à renforcer les poutres en béton à l'aide de tôles d'acier [BUY.04].

Dans le secteur de la construction, les lamelles en composite sont désormais préférées aux tôles en acier car elles sont plus faciles à utiliser et offrent plus de possibilités. Tandis que les tôles sont des matériaux plus appropriés aux surfaces plates et aux poutres, les lamelles en composite sont plus efficaces sur les surfaces rondes, telles que les poteaux, ou les surfaces plus larges, telles que les murs, ([FOO 01], [TEN.02]). [BEN.10]



**Figure IV.11:** Les différents éléments de système de renfort par «PRF».

#### IV-3-4-1 Techniques de renforcement

Bien que l'installation du système de renforcement avec des matériaux composites varie d'un fabricant ou d'un installateur à l'autre, le processus passe généralement par les étapes suivantes [CAR.03] :

1<sup>er</sup> étape : Inspecter la surface de l'élément de structure à renforcer.

2<sup>ème</sup> étape : Réparer les fissures et les surfaces effritées avec une injection d'époxy et de mortier à base de résine époxy.

3<sup>ème</sup> étape : Préparer la surface de l'élément de structure (avec des meules et du sablage humide au besoin) en éliminant les saillies et en s'assurant que le profil est adéquat.

4<sup>ème</sup> étape : Appliquer une couche d'apprêt puis du mastic de vitrier afin d'assurer l'adhérence des tissus de fibres.

5<sup>ème</sup> étape : Appliquer une première couche d'agent d'imprégnation.

6<sup>ème</sup> étape : Appliquer les tissus de fibres sur la surface, comme s'il s'agissait de papier peint.

7<sup>ème</sup> étape : Appliquer une deuxième couche d'agent d'imprégnation, une fois que les tissus auront bien durci, généralement au bout d'une heure.

8<sup>ème</sup> étape : Répéter les étapes 6 et 7, jusqu'à ce que toutes les couches de fibres soient installées. [BEN.10]

### IV-3-4-2 Quelques applications des matériaux composites « PRF » en génie civil

Le génie civil est actuellement peu consommateur de matériaux composites comparativement à d'autres secteurs tels que l'industrie de l'automobile ou celle de l'aérospatiale. Cependant, il existe de réelles perspectives dans les prochaines années quant à leur utilisation structurelle pour la réhabilitation des constructions civiles et industrielles.

D'où l'intérêt et l'engouement apporté par les différents centres et laboratoires de recherche à travers le monde, pour étudier les différents aspects d'éléments structuraux en béton renforcés ou réparés par des «PRF».

D'une manière générale, les matériaux composites du type polymère renforcé de fibres «PRF» présentent des avantages considérables dès qu'il s'agit de la protection, la réparation et le renforcement d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrages en béton armé tels que poutre, poteau, dalle ou mur. [BEN.10]

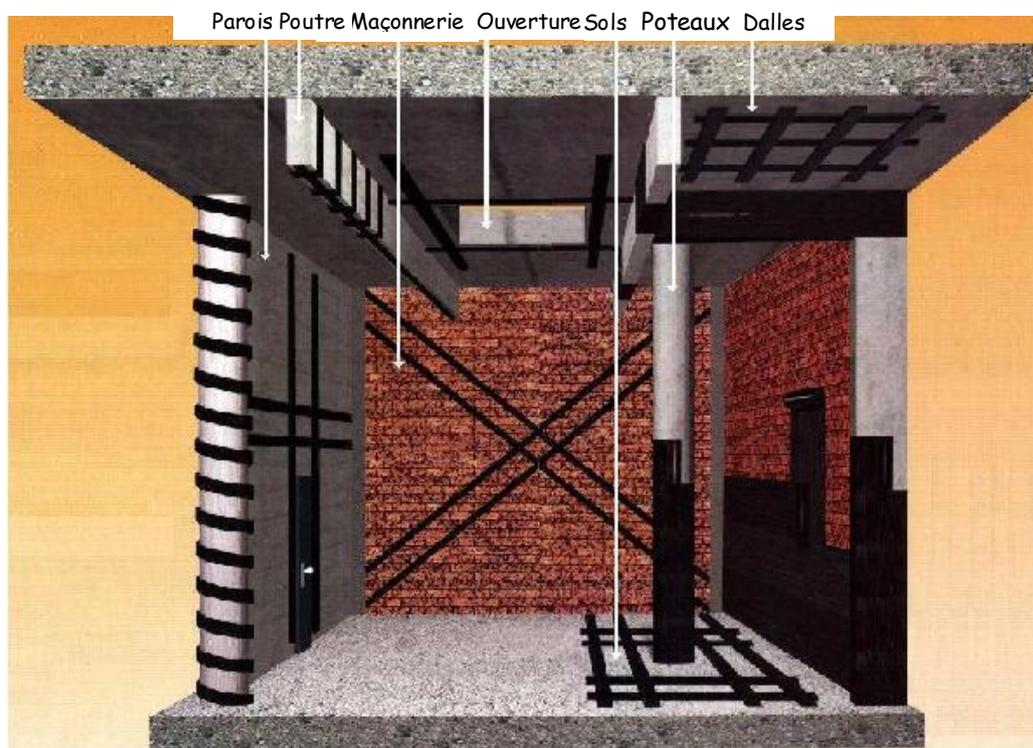
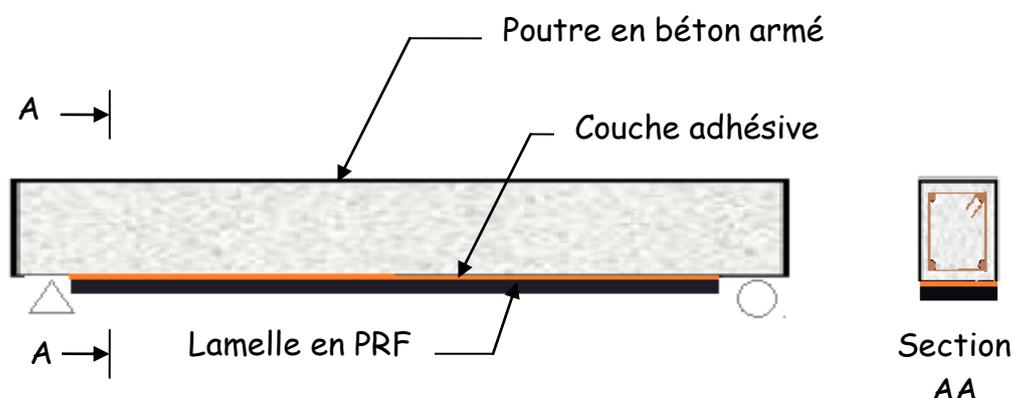


Figure IV.12 : Systèmes de renforcement Sika® CarboDur® [Site.1].

## a) Les poutres :

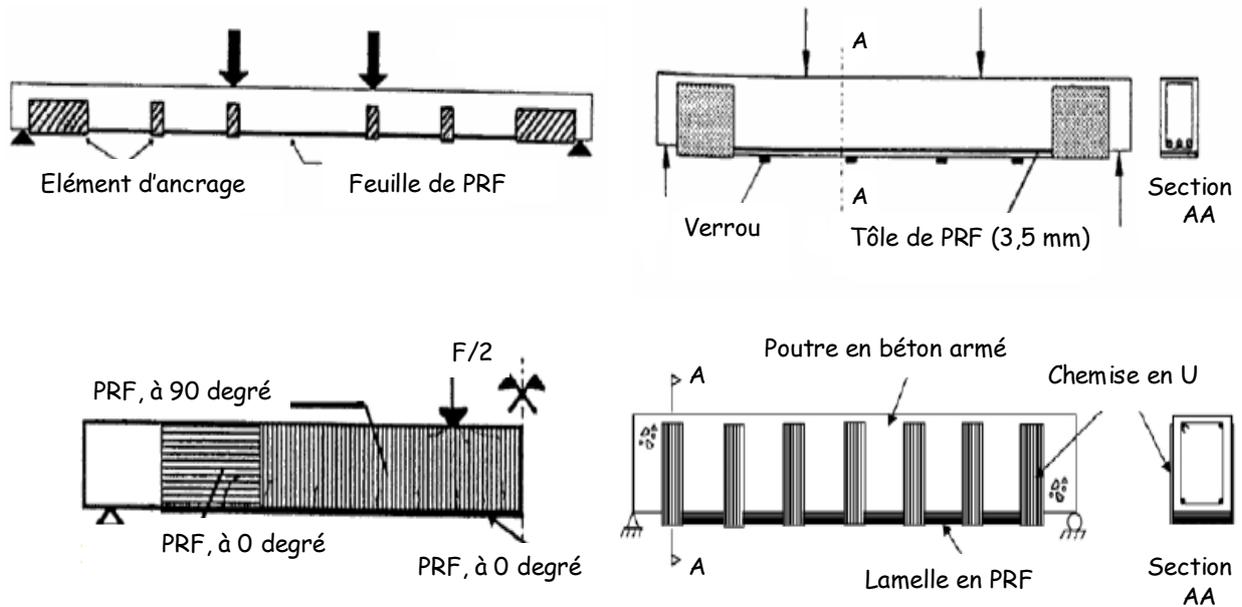
Le renforcement vis à vis la résistance à la flexion d'une poutre en béton armé simplement appuyée en utilisant les composites «PRF» est généralement réalisée en liant une lamelle «PRF» sur le support de la poutre concernée (Figure IV.13). Avant l'application de la plaque «PRF», le support doit être préparé. Le but de la préparation d'une surface adéquate est d'enlever la couche faible de la surface du béton et d'exposer la totalité du béton pour améliorer la liaison avec le «PRF», et de fournir une surface uniforme ([STE.96], [TEN.02]).



**Figure IV.13:** Une poutre en béton armé renforcée par une lamelle en «PRF».

[SMI.02]

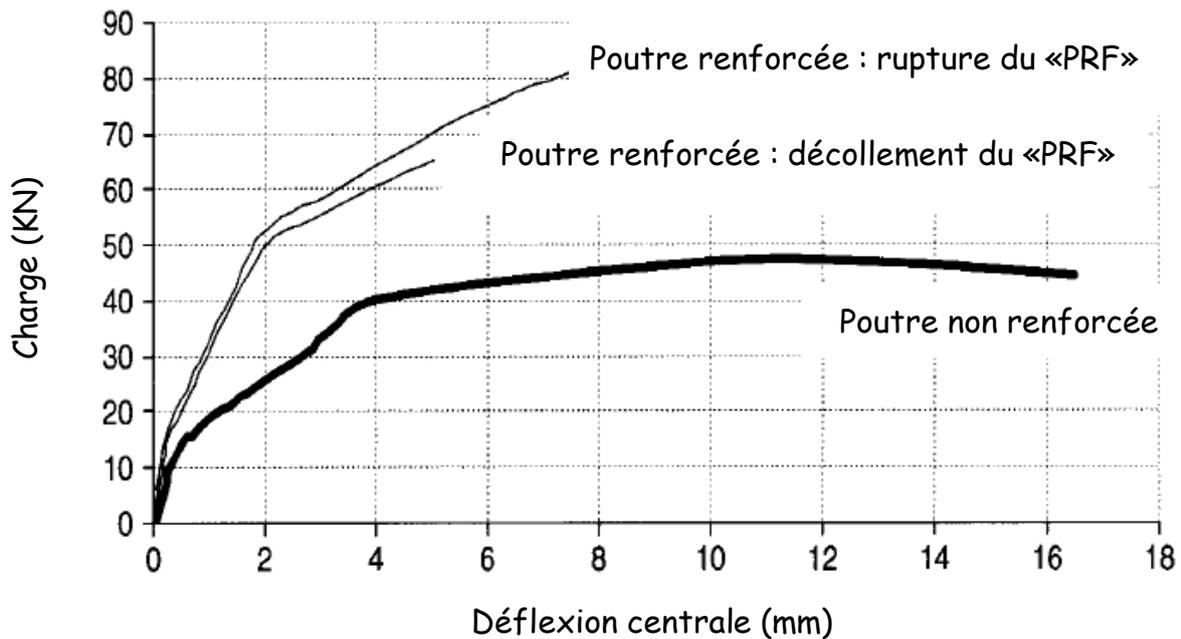
Les plaques «PRF» peuvent être préfabriquées, dans ce cas, quelques préparations de la surface de liaison de cette dernière peuvent être nécessaires. D'autre part, la plaque «PRF» peut être construite sur place par un procédé de stratification direct. Il y a plusieurs variations de la procédure de base. Ceux-ci incluent la précontrainte de la plaque, et la prévision d'ancrages tel que les bandes en U aux fins de la plaque pour réduire le risque des ruptures par décollement comme le montre la figure IV.14 ([ARD.97], [SPA.98], [MUK.98], [TEN.03]).



**Figure IV.14 :** Trois types d'ancrages utilisés.

- (a) : ancrage avec des chemises en U et des bandes en acier [SPA.98],  
 (b) : ancrage avec des chemises en U et des verrous en acier [MUK.98],  
 (c) : ancrage avec des tissus de «PRF» enroulés autour des trois côtés [ARD.97],  
 (d) : ancrage par des chemises de «PRF» en forme de U [TEN.03].

La figure IV.15 montre des courbes typiques de charge-déflexion à mi travée pour des poutres simplement appuyées renforcées par des lamelles «PRF» chargées par quatre points. Comparée à la poutre témoin, la poutre plaquée par «PRF» a enregistré un gain de force de 76%, mais avec une réduction de ductilité. Le gain de la capacité portante et la réduction de la ductilité sont les deux conséquences principales du renforcement des poutres par des plaques «PRF» [HAU.99]. [BEN.10]



**Figure IV.15:** Courbe typiques de charge-déflexion des poutres en béton armé renforcées et non renforcées avec des matériaux composites «PRF». [TEN.02]

b) Les poteaux : [Site.2]

Ce type de renforcement est applicable à des pièces comprimées, voire fléchies et comprimées telles qu'une pile ou un poteau en béton armé...

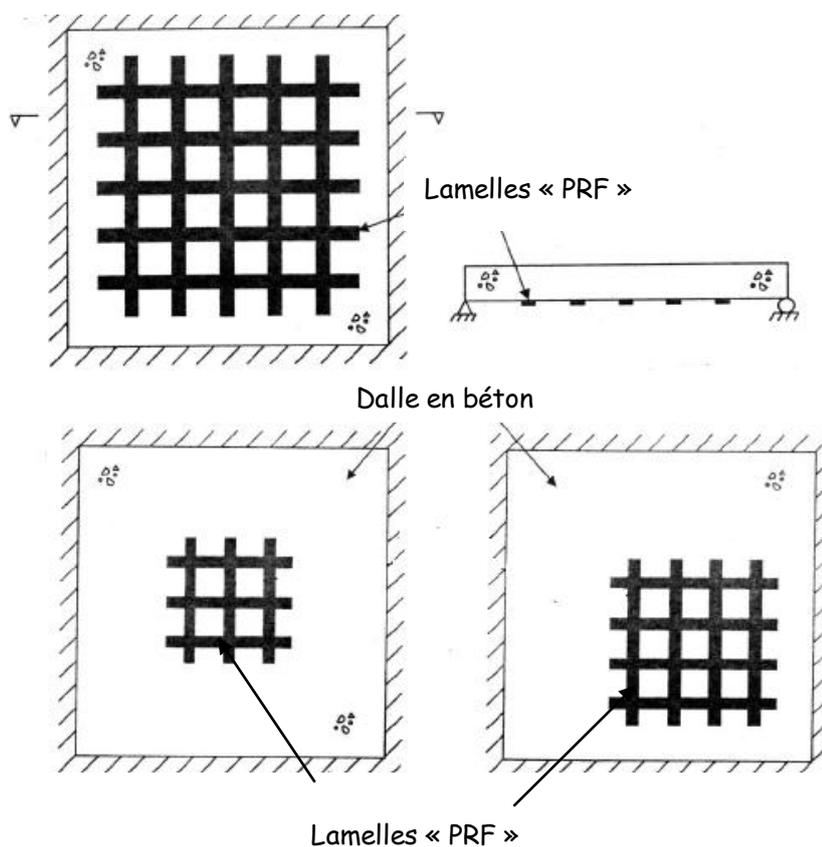
Ici, le mode de fonctionnement de l'armature qui entoure la pièce comprimée et y exerce un effort de freinage, change. Un tel renforcement est utilisé, par exemple, pour des poteaux et des piles non dimensionnés pour des séismes.



**Figure IV.16:** Freinage de poteaux par composites.

## c) Les dalles :

La procédure de base de renforcement des dalles simplement appuyées par «PRF» est de coller des bandes ou des lamelles «PRF» sur la face tendue de la dalle. Pour les dalles travaillant dans les deux sens on utilise des lamelles croisées (Figure IV.17a), ou bien des «PRF» avec des fibres dans les deux directions. D'autre part, le renforcement d'une dalle en béton armé travaillant dans les deux sens peut être concentré dans la région centrale ou dans la région des moments maximaux selon les besoins de renforcement mais dans ce cas les bandes/lamelles de «PRF» sont terminées loin des bords de la dalle (Figure IV.17b). [BEN.10]



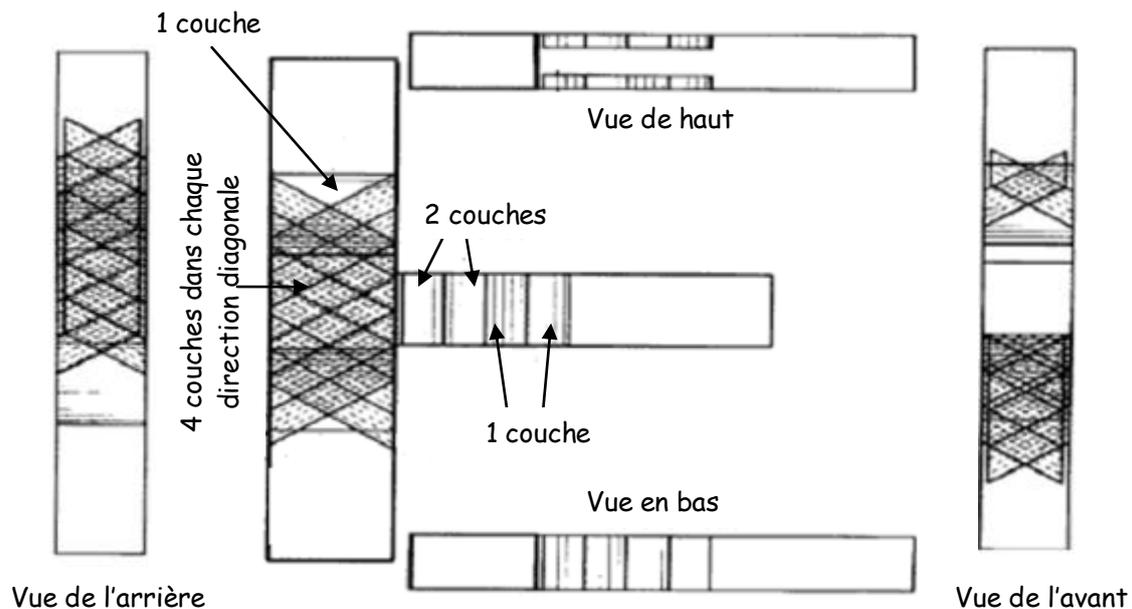
**Figure IV.17:** Renforcement d'une dalle travaillant dans les deux sens par des lamelles en «PRF»: (a) dans les deux directions, (b) concentrées en petites régions ciblées. [TEN.02]

### IV-3-4-3 Assemblages poteau-poutre

Les études sur le renforcement des assemblages poutre-poteau à l'aide de tissus de «PRF» sont très rares. [PAN.00] ont communiqué les résultats d'une étude expérimentale qu'ils ont effectuée à l'université d'Utah, Salt Lake City.

Des charges cycliques inversées ont été appliquées à deux spécimens de demi-grandeur, représentatifs des constructions des années 60, c'est-à-dire avec une résistance insuffisante. Des essais ont été effectués sur un spécimen non modifié et un spécimen renforcé avec un composite de «PRF» afin d'évaluer l'efficacité du polymère sur le plan du renforcement de la résistance au cisaillement. Il n'y a pas de renforcement transversal à la base de l'assemblage, et les barres longitudinales de la poutre ne sont pas proprement ancrées à la connexion.

Durant l'essai de chargement, le poteau était soumis à une charge longitudinale visant à simuler la charge produite par la gravité, tandis qu'une charge cyclique inversée était appliquée à l'extrémité libre de la poutre. Le deuxième spécimen a été renforcé à l'aide de tissus de «PRF» afin d'améliorer la résistance au cisaillement et la ductilité de l'assemblage (Figure IV.18). [BEN.10]



**Figure IV.18:** Plan du renforcement du composite. [PAN.00]

**IV-4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, on s'est intéressé aux méthodes de renforcement et de réparation des ouvrages de béton armé. Il ya les méthodes traditionnelles comme le chemisage en acier ou en béton qui sont assez populaires dans le domaine de réparation pour leur bonne performances et leur faible coût mais il ya aussi des inconvénients comme l'augmentation du poids de la structure et sans oublier le problème de corrosion d'acier. A cause de ces inconvénients les spécialistes dans le domaine ont inventé des nouvelles techniques comme le renforcement et la réparation par matériaux composites qui donnent à l'utilisateur la flexibilité et la facilité de mise en œuvre avec le poids faible de ses constituants par rapport aux solutions, ce qui fait de ces méthodes, les méthodes idéales pour la réparation d'ouvrages en béton armé.

# **CHAPITRE V:**

# **Diagnostic des réparations et des renforcements**

## V-1 Introduction

La réparation d'un élément en béton fait généralement intervenir deux matériaux différents. D'une part, il y a le substrat, qui date normalement de plusieurs années. D'autre part, il y a le matériau d'apport ou de réparation. Ses deux éléments sont liés par une colle. Du point de vue de l'ingénieur, le dimensionnement d'une structure collée nécessite la connaissance de caractéristiques mécaniques du collage en lien avec les sollicitations auquel il est soumis : traction, compression, cisaillement. Dans la pratique la résistance mécanique d'un collage est toujours évaluée dans un assemblage collé.

## V-2 Caractérisation de l'adhérence

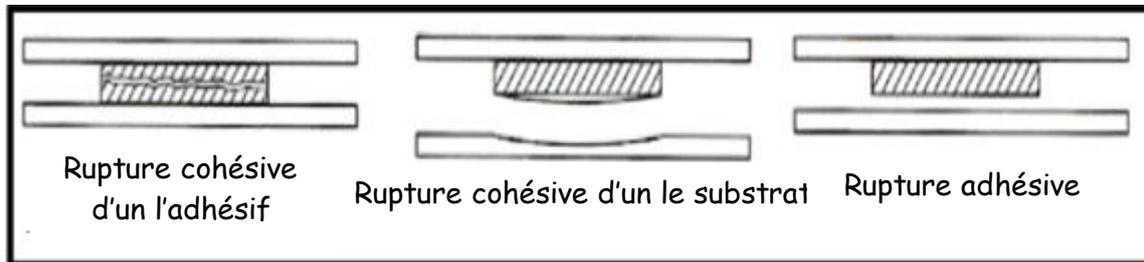
On peut définir l'adhérence comme la force qu'il faut fournir au système adhérent pour séparer deux constituants [LAN.94]. L'adhérence est le facteur le plus essentiel pour une réparation durable car elle assure un travail collectif du substrat et du matériau de réparation.

### V-2-1 Modes de rupture

Les essais mécaniques pratiqués sur les assemblages collés permettent de déterminer l'adhérence des matériaux joints. L'objectif de ces essais mécaniques est d'évaluer les conditions de rupture des adhésifs et d'en déterminer la durée de vie du joint. Au niveau de l'assemblage de deux matériaux A et B, on définit l'interface comme la zone en deux dimensions qui sert de frontière. L'interphase est la zone où les propriétés physico-chimiques et mécaniques sont différentes à la fois de A et de B. Lors d'un essai d'adhérence, on peut distinguer plusieurs cas de rupture (fig. V-1):

- Une rupture cohésive lorsqu'elle ne se produit pas à l'interface. Dans ce cas, la cohésion du matériau ou de l'interphase qui a cédé est plus faible que l'adhésion des deux partenaires. La rupture peut alors être cohésive dans le béton ou dans le polymère.

- Une rupture adhésive lorsqu'elle se produit à l'interface et la cohésion de chacun des matériaux est meilleure que leur adhésion.
- Une rupture mixte lorsqu'elle est à la fois cohésive par endroits et adhésive à d'autres.



**Figure V.1:** Modes de rupture des joints collés.

Les joints collés peuvent être sollicités de diverses manières: traction, cisaillement, flexion, fluage. L'adhérence et les autres propriétés mécaniques des adhésifs et des joints collés sont donc mesurées selon différentes techniques.

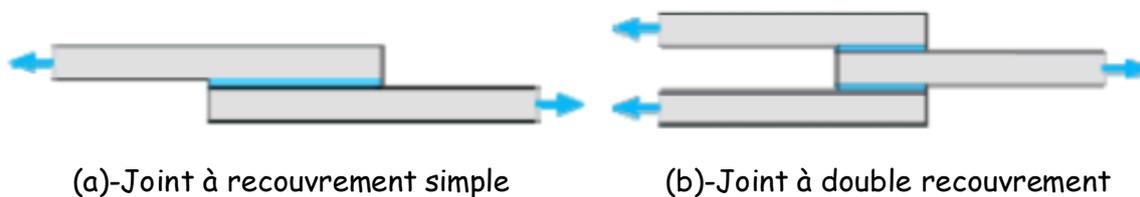
### V-2-2 Modes de sollicitation

Il y'a plusieurs essais pour la caractérisation mécanique des assemblages collés. Le comportement mécanique des matériaux polymères et cimentaires, on constate une forte différence de propriétés. En effet, la résistance en traction des résines époxydes est environ dix fois supérieure à celle du béton qui est un matériau fragile. Néanmoins, si l'on considère le module élastique le rapport de proportion est inversé. Pour choisir et interpréter correctement les essais qui sont menés pour caractériser l'adhérence d'un assemblage béton / résine il est important de prendre en considération le fait que le béton sera le facteur limitant à toute sollicitation mécanique. [LAB.11]

### V-2-2-1 Essais de cisaillement

Il y'a deux type de l'essai de cisaillement :

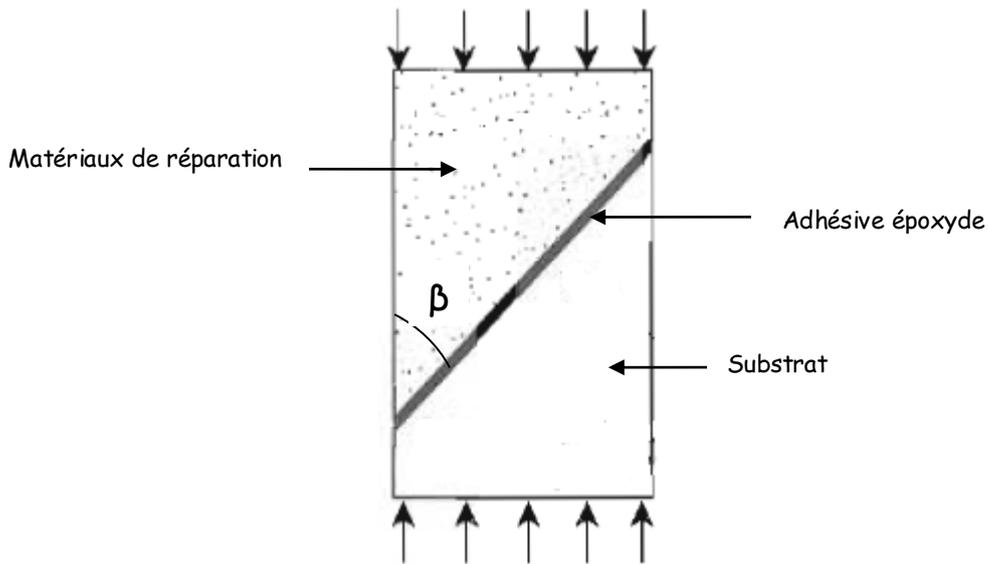
a) L'essai de cisaillement direct **[N-5]**: La résistance à la rupture en cisaillement des joints en recouvrement simple est la valeur la plus largement utilisée par les constructeurs, comme les fournisseurs, pour décrire les propriétés d'un collage. Le principe de l'essai consiste à mesurer la force nécessaire à la rupture en soumettant le joint à une force de vitesse constante. Cependant, la signification de la valeur mesurée est relative à la géométrie de l'essai et au procédé d'assemblage. Pour éviter la déformation créée par le désalignement du joint, des essais en double recouvrement ont été développés. Cependant, les substrats se déforment quand même pendant l'essai et les valeurs obtenues sont comparables à celles de l'essai en simple recouvrement **[COG.04]**. Des efforts de traction apparaissent dans le béton, créant une rupture cohésive. Il est, dans ce cas, impossible de conclure sur la résistance de l'interface puisque l'apparition de contraintes secondaires entraîne une rupture prématurée dans le substrat.



**Figure V.2:** L'essai de cisaillement direct.

b) L'essai de cisaillement oblique en compression : un des essais de cisaillement est l'essai de cisaillement par compression. Il est utilisé dans la norme **[N-6]** pour l'évaluation de l'adhérence des matériaux de réparation. Le paramètre influant sur l'essai est l'angle d'inclinaison ( $\beta$ ) de l'interface (fig. V.2) **[AUS. 99]**. La rupture n'est pas forcément localisée à l'interface et la rugosité du support influence le mode de rupture. Une couche peu rugueuse engendre une rupture adhésive suivant l'interface alors qu'une couche rugueuse peut engendrer une rupture cohésive comme pour l'essai de traction directe. La différence des

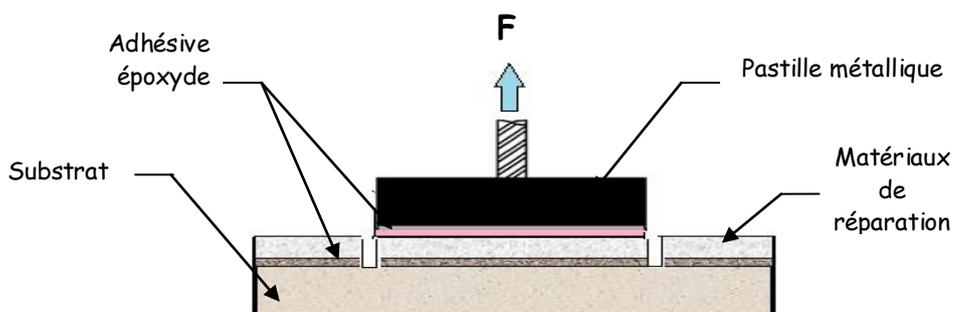
modules élastiques entre le support et la couche de réparation peut générer des concentrations de contraintes et perturber l'essai [AUS-99], [NIC-08].



**Figure V.3:** Essai d'adhérence en cisaillement par compression. [AUS-99]

#### V-2-2-2 Essai de traction directe (essai d'arrachement) [N-7]

L'essai d'arrachement, de par sa facilité d'utilisation sur site, est celui qui est généralement préconisé dans l'industrie du génie civil. Il consiste à appliquer un effort de traction sur le revêtement à tester. Il est cependant assez peu reproductible et ce principalement à cause de problèmes d'alignement du système d'ensemble. Les conditions de traction ne sont pas toujours symétriques durant la totalité de l'essai (variation d'épaisseur du revêtement, asymétrie des mors, mauvaise planéité du substrat...).



**Figure V.4:** Le principe de l'essai d'arrachement.

### V-2-2-3 Les essais de mécanique de rupture

L'objectif de ces essais est d'observer l'initiation et la propagation d'un délaminage.

a) Le blister test: appelé également test de cloquage, consiste à introduire un gaz ou un liquide sous pression à travers le substrat préalablement percé. Un défaut de collage au niveau du trou permet d'initier la fracture à l'interface. Lorsqu'on applique une pression il se forme une cloque dont la taille augmente progressivement, jusqu'à une pression critique qui provoque le décollement du revêtement. Cet essai est intéressant et permet d'obtenir de bons résultats, mais sa validité est limitée aux adhésions moyennes ou faibles. Lorsque l'adhérence est forte, le film éclate. L'analyse de la courbe pression - hauteur de la cloque permet d'évaluer le module élastique et les contraintes résiduelles (gonflement), ainsi que de calculer l'énergie d'adhérence film-substrat (décollement). [COG.04]

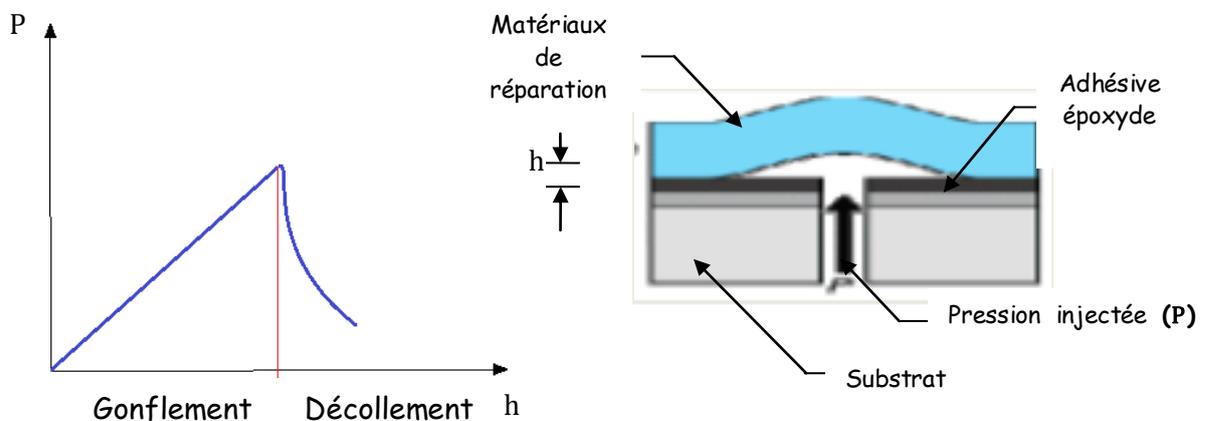


Figure V.5: La courbe pression - hauteur.

$$P = C_1 \sigma_i \frac{t}{a^2} h + C_2 \frac{E}{(1-\nu)} \frac{t}{a^3} h^3 + C_3 \frac{E}{(1-\nu^2)} \frac{t^3}{a^4} ; G_e = C_p h.$$

$C_1, C_2, C_3$ : Constantes,

$E, \nu$ : Module de Young et coefficient de Poisson,

$\sigma_i$ : Contrainte interne dans le film,

$a$ : Rayon de la cloque,

$t$ : épaisseur du film,

$G_e$ : énergie d'adhérence.

b) Essai de fendage par coin [Wedge Splitting Test (WST)] [N-8]: si un essai qui est utilisé pour caractériser l'adhérence des revêtements hydrauliques sur béton. L'ouverture de l'entaille est contrôlée par le déplacement vertical d'un coin placé entre deux rouleaux fixés sur des chapeaux. Le corps d'épreuve est généralement supporté par un appui linéique centré suivant l'axe de descente du coin. Cependant, selon [TRU.99], il est préférable de placer le spécimen sur deux volumes scindés une fois la fissuration totalement propagée. La géométrie de l'essai ne permet malheureusement pas d'être adapté au cas de caractérisation d'adhérence d'un revêtement mince sur un support épais.

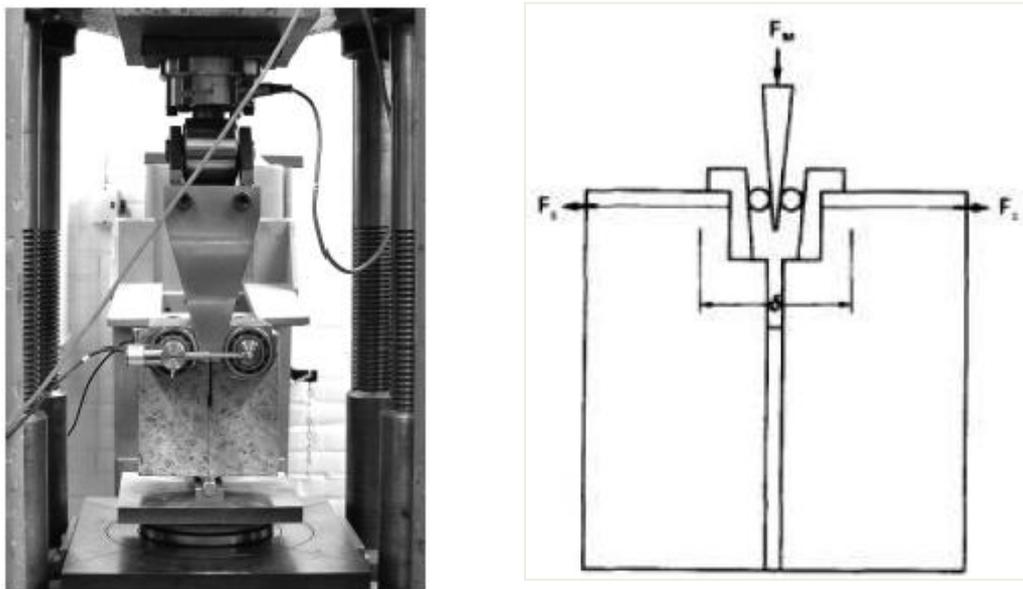


Figure V.6: Essai WST, Wedge Splitting Test.

c) Les essais de pelage [N-9] et [N-10]: les essais de pelage permettent de mesurer l'énergie de fracture ( $G_f$ ) d'un assemblage comportant un film mince élastique. Cependant, généralement l'extension du film et les mécanismes de dissipation par déformation plastique de l'adhésif interviennent. Les déformations du système peuvent alors devenir prédominantes. Pour obtenir une valeur significative de l'énergie de fracture il faut connaître le comportement des différents éléments pour en tenir compte dans les équations. De plus, il est

nécessaire de tester des revêtements souples pour pouvoir mettre en œuvre cet essai, ce qui n'est pas le cas des revêtements époxydes.

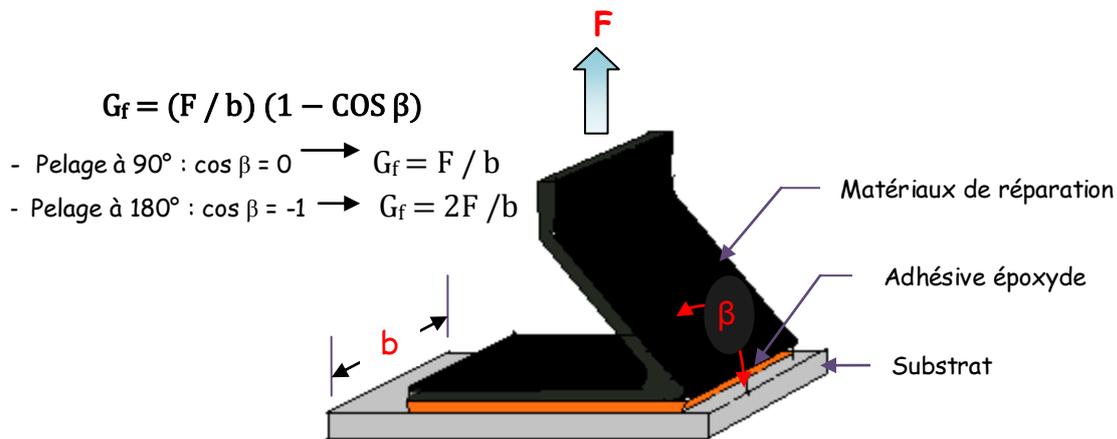


Figure V.7: Les essais de pelage.

d) Le Wedge test [N-11]: Le Wedge test consiste à cliver le joint collé en introduisant un coin entre les deux substrats. Lorsque le coin pénètre dans le joint, l'adhésif se casse très rapidement au début, puis la fracture s'arrête lorsque l'énergie élastique stockée dans la lame devient égale à l'énergie de fracture. Cet essai est utilisé pour caractériser l'assemblage de matières plastiques ou bien de matériaux métalliques. C'est le meilleur moyen de mesurer l'adhérence des collages forts.

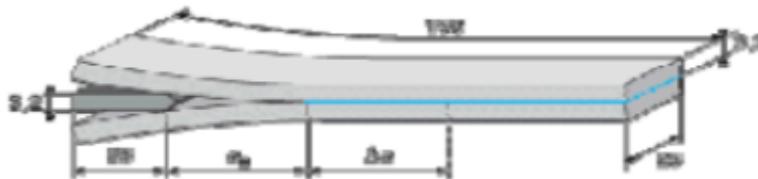


Figure V.8: Le Wedge test.

Les contraintes liées à la réalisation des essais ainsi qu'à la géométrie des éprouvettes, entraînent bien souvent des problèmes d'alignement et font apparaître des contraintes secondaires. Un revêtement appliqué sur une surface verticale est principalement soumis à des efforts de cisaillement. Cependant, la sollicitation appliquée est rarement pure et combine souvent des contraintes normales et tangentielles. Le faible comportement en traction du béton implique

systématiquement des ruptures cohésives dans le substrat. **L'essai le plus facile à mettre en œuvre étant l'essai d'arrachement, il a été décidé de l'utiliser pour la caractérisation destructive des réparations.**

### **V-2-3 Les contrôles non destructifs**

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader. Le CND assure désormais la surveillance des équipements au cours de la production, en cours d'utilisation ou encore dans le cadre d'opérations de maintenance et d'expertise. Le contrôle non destructif rassemble des méthodes et techniques variées de caractérisation et d'analyse des matériaux. Les plus courantes sont :

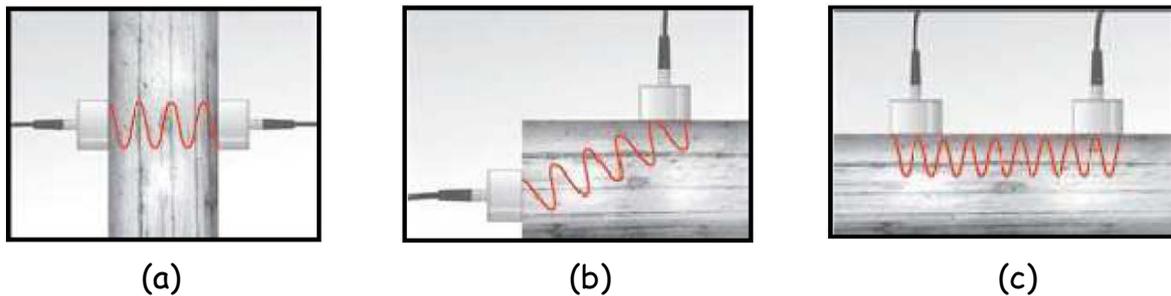
- Ultrasons,
- Thermographie infrarouge,
- Radiographique.

#### **V-2-3-1 Vitesses ultrasonores UPV [N-12] [MED.13]**

La méthode de mesure des vitesses ultrasonores ou UPV (ultrasonic pulse velocity) est une des techniques de contrôle non destructif fréquemment utilisée pour détecter à la fois plusieurs caractéristiques du béton durci, tels que : le degré de compacité, l'homogénéité, la résistance à la compression, le taux de fissuration, ...etc. **[TUR.04].**

L'UPV consiste à faire propager une impulsion ultrasonore, générée par un émetteur piézoélectrique (transducteur émetteur couplé à la surface de l'échantillon) vers un récepteur piézoélectrique (transducteur récepteur). Ces impulsions sont enregistrées par un dispositif qui indique le temps de propagation dans le matériau, de l'émetteur vers le récepteur. Connaissant la distance parcourue, la vitesse de propagation de l'onde dans le matériau peut alors être calculée **[ANU.01].**

La norme [N-12] définit les différents types de configuration de mesure par l'UPV, comme l'illustre la figure V-9.



**Figure V.9:** Différents types de configuration de mesures avec la méthode UPV.

(a) : Transmission directe, (b) : Transmission semi-directe,

(c) : Transmission indirecte ou de surface.

#### V-2-3-2 Contrôle par thermographie infrarouge (Thermal infrared testing)

Cette technologie est applicable pour le contrôle de défauts volumiques et de défauts de surface. Le contrôle par thermographie consiste à produire dans la structure à tester un échauffement local homogène et à observer l'évolution de la température après un certain temps de latence. Les défauts présents constituent des obstacles à la transmission de la chaleur dans le matériau et donnent naissance en surface à des anomalies thermiques pouvant être détectées par une caméra infrarouge. L'observation et la stimulation peuvent s'effectuer sur la même face (face avant) ou de part et d'autre de la pièce (face arrière). Cette technique est particulièrement bien adaptée à la détection de défauts dans les structures composites à matrice polymère (délaminages).

[LCPC.08]



**Figure V.10:** contrôle par thermographie infrarouge d'une réparation par tissu en fibre de carbone. [Site.1]

### V-2-3-3 Contrôle radiographique [BOU.12]

L'intensité d'un faisceau de rayons X ou gamma subit une perte d'intensité en passant à travers un matériau. Ce phénomène est dû à l'absorption ou la diffusion des rayons X ou gamma par l'objet exposé. La quantité de rayonnement perdu dépend de la qualité du rayonnement, la densité du matériau et l'épaisseur traversée. Le faisceau de rayonnement, qui se dégage du matériau, est généralement utilisé pour exposer un film de rayonnement sensible pour que les différentes intensités de rayonnement soient révélées en densités différentes sur le film.

La relation entre l'intensité des photons incidents et transmis est la suivante:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Où :

- I est l'intensité du photon transmis,
- $I_0$  est l'intensité du photon incident,
- $\mu$  est le coefficient d'atténuation,
- x est l'épaisseur de l'objet.

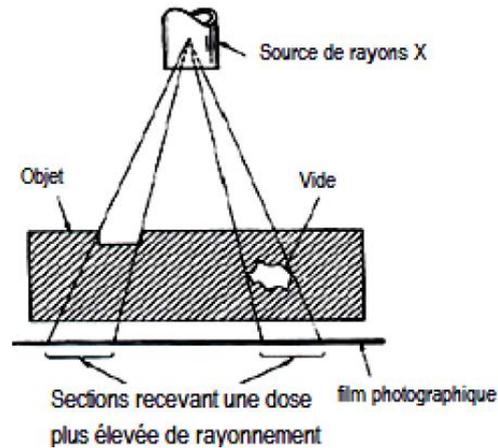


Figure V.11: principe de la radiographie.

### V-3 Conclusion :

A travers ce chapitre, on remarque que les joints collés peuvent être sollicités de diverses manières résultant à une rupture cohésive lorsqu'elle ne se produit pas à l'interface, une rupture adhésive lorsqu'elle se produit à l'interface ou encore à une rupture mixte lorsqu'elle est à la fois cohésive par endroits et adhésive à d'autres. L'adhérence et les autres propriétés mécaniques peuvent être mesurées selon différentes techniques. L'utilisation des essais non destructifs variés est aussi une autre manière de caractériser ces assemblages collés. La facilité d'utilisation et la disponibilité au niveau de notre laboratoire de génie civil a orienté notre choix pour les méthodes de caractérisation non destructive et destructive. La première méthode utilise les ultrasons, en mode surfacique, procuré par un appareil à ultrasons (laboratoire de recherche LGCH) et la seconde concerne l'essai d'arrachement par l'utilisation d'un dynamomètre spécifique disponible au niveau du laboratoire pédagogique.

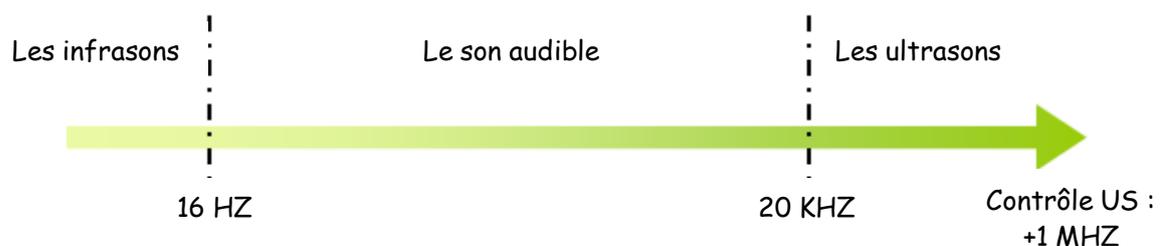
**CHAPITRE VI:**  
**Le contrôle non  
destructif par  
les ultrasons**

## VI-1 Introduction

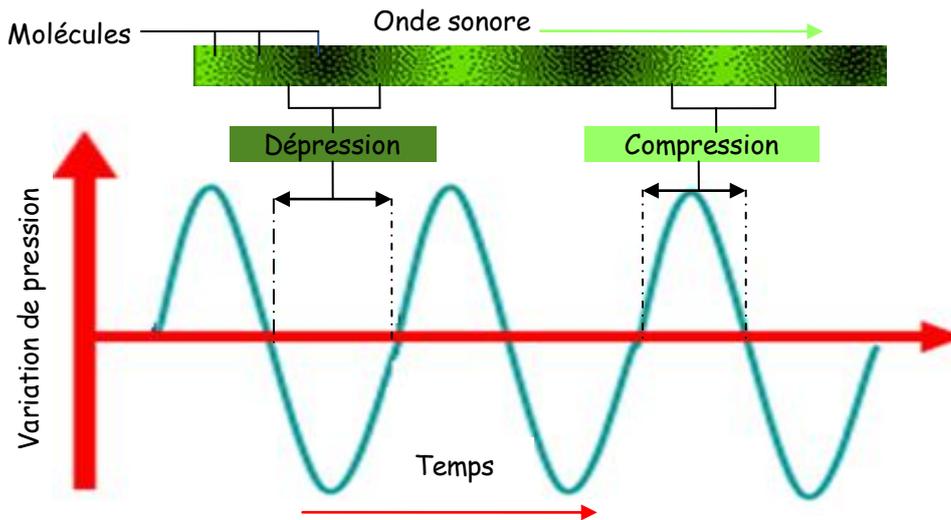
Les méthodes de contrôle non destructif sont nombreuses. Le contrôle par ultrasons est fréquemment utilisé car il présente de nombreux avantages : facilité de mise en œuvre, possibilité de travailler sur une seule face de la pièce à contrôler (pas besoin d'un accès à la deuxième face), et capacité à traverser d'importantes épaisseurs de matière en fonction de la fréquence. De plus, l'existence de relations entre la propagation des ultrasons et les caractéristiques du matériau permet sa caractérisation. L'utilisation des ultrasons offre donc la possibilité, sans aucune détérioration, d'une part de caractériser des matériaux afin d'en connaître les propriétés, et d'autre part de contrôler des pièces pour vérifier leur intégrité et repérer d'éventuels défauts d'élaboration (inclusions, défauts de collage...) ou d'endommagement dû aux sollicitations (fissures...).

## VI-2 Théorie des ultrasons

**VI-2-1 Définition:** Les ondes ultrasonores sont des vibrations acoustiques de hautes fréquences plus que 20 kHz (figure VI.1), qui servent de nombreuses applications dans les domaines de la médecine, de la défense et des industries. L'application qui intéresse les ingénieurs de génie civil est le contrôle non destructif, (CND), [LAM.97]. Les ultrasons sont générés par l'oscillation régulière de molécules de part et d'autre de leur position d'équilibre, ce qui se traduit par une alternance de dépression compression, comme représenté dans la Figure VI.2, [BAR.07].



**Figure VI.1:** Les trois catégories d'onde acoustique.



**Figure VI.2:** Oscillations de la pression de l'air générant des ultrasons.

## VI-2-2 Les différents types d'ondes ultrasonores

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.

### VI-2-2-1 Les ondes longitudinales

Les ondes longitudinales sont aussi appelées ondes de compression. Elles se caractérisent par un déplacement des particules parallèle à la direction de propagation. Le passage d'une onde longitudinale plane entraîne une variation de la distance entre les plans parallèles contenant les particules. Ceci entraîne une augmentation du volume occupé par les particules. [TOU.10]

Le champ de déplacement des ondes longitudinales se décrit comme :  $U_1 = U_1(x, t)$   
 $U_2 = 0, U_3 = 0.$

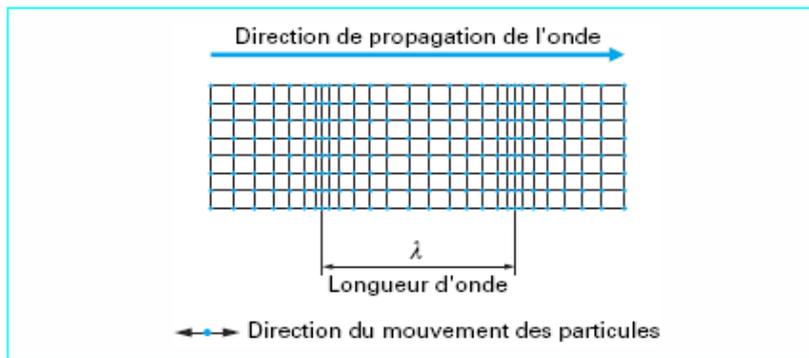


Figure VI.3: Ondes ultrasonores longitudinales.

### VI-2-2-2 Les ondes transversales

Les ondes transversales ou ondes de cisaillement, se propagent dans une direction perpendiculaire à celle de la vibration (au vecteur d'onde). Le glissement des plans parallèles ne donne lieu à aucune variation de volume. Ces ondes ne peuvent exister que dans les solides car leur existence est liée à une résistance au cisaillement que ne possèdent ni les liquides ni les gaz. [TOU.10]

Le champ de déplacement pour une onde transversale (cisaillement).

$$U_1 = 0 \quad , \quad U_2 = 0 \quad , \quad U_3 = U_3(x, t)$$

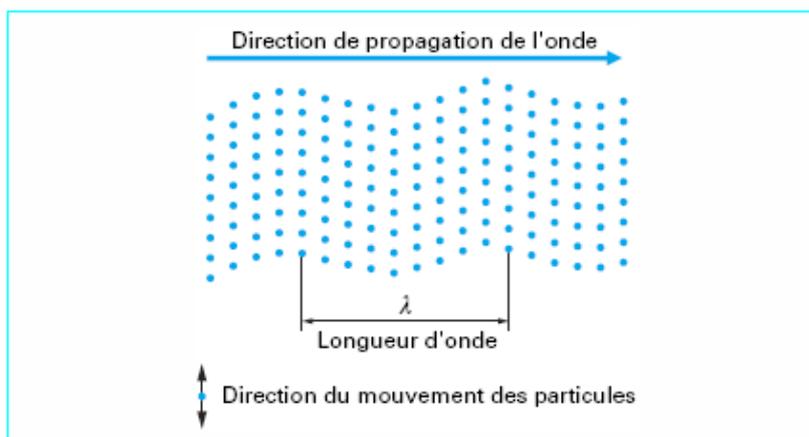


Figure VI.4: Ondes ultrasonores transversales (cisaillement).

#### REMARQUE:

\* Dans les solides élastiques on a les deux types d'ondes (longitudinales et transversales). Dans ce cas le mouvement des particules peut-être divisé en trois composantes perpendiculaires (une longitudinale et deux transversales pour une même direction de propagation).

### VI-2-2-3 Ondes de surfaces (Combinaison des deux types d'ondes)

Les ondes de surface sont une combinaison particulière des ondes de volume de compression et de cisaillement de même fréquence déphasée de  $\pi/2$ , qui se forme au voisinage des surfaces libres des matériaux. Le mouvement des particules est elliptique. Elles intéressent une faible épaisseur du matériau au voisinage de la surface libre, de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, et présentent une très grande sensibilité à toute discontinuité de surface, quelle que soit son orientation. Cela en fait un outil idéal pour l'étude des bétons d'enrobage. [TEM.10]

Le champ de déplacement pour une onde de Rayleigh peut être décrit par:

$$U_1 = U_1(x_1, t), U_2 = 0, U_3 = U_1(x_3, t).$$

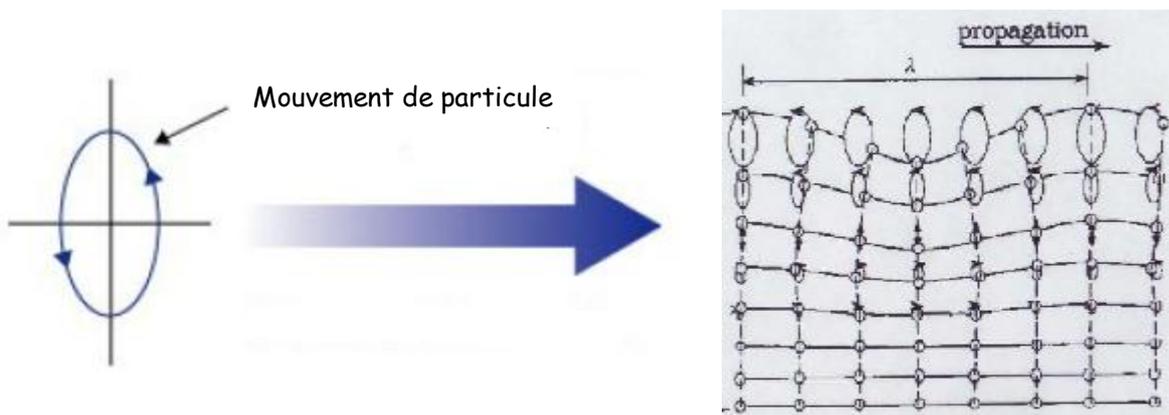


Figure VI.5: Ondes de surface.

### VI-2-3 Paramètres de l'onde ultrasonore [TOU.10]

#### VI-2-3-1 L'impédance acoustique

Le comportement du milieu vis-à-vis des ultrasons est exprimé par une constante appelée impédance acoustique  $Z$ . Elle caractérise la qualité du matériau à transmettre les ondes ultrasonores. Elle est définie comme le produit de la densité et de la vitesse du son du milieu et donnée par la relation suivante

$$Z = \rho c.$$

Où : -  $c$  : est la vitesse du son dans le milieu en  $m.s^{-1}$ ,

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

### VI-2-3-2 La longueur de l'onde

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

$$C = f \lambda .$$

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

- f : est la fréquence d'émission en Hz.

### VI-2-3-3 La pression et l'intensité

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

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

$$I = \frac{p^2}{2\rho c}$$

Ou : - c : est la vitesse du son dans le milieu en  $m.s^{-1}$ ,

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

- P : est appelée la pression d'onde acoustique exprimée en  $kg.m^{-1} s^{-2}$ ,

- I : est l'intensité ultrasonore en  $W.m^{-2}$ .

### VI-2-4 Émission et réception de l'onde ultrasonore

L'intensité d'une onde acoustique qui se propage dans les différents milieux s'atténue le long de son parcours plusieurs facteurs contribuent à cette atténuation telle que l'absorption, la réfraction, la réflexion et la diffusion.

#### VI-2-4-1 Description du faisceau ultrasonore émis

La théorie de la diffraction montre qu'un faisceau ultrasonore émis par une source plane circulaire de rayon r répondant à la condition  $r > \lambda$ , (r est le rayon de la source,  $\lambda$  est la longueur d'onde) comprend deux parties, une zone initiale cylindrique et une zone distale conique ou le faisceau diverge que l'on nomme

respectivement la zone de Fresnel et la zone de Fraunhofer.

#### VI-2-4-1-1 Zone initiale (zone de Fresnel)

C'est le champ initial ou zone de Fresnel qui définie comme une source circulaire toute l'énergie est concentrée dans une zone cylindrique dont le diamètre est égal à celui de la source sonore. On caractérise le faisceau sonore par la relation suivante (fig. VI.6 -a) :

$$d = D.$$

$$l = \frac{D^2}{4\lambda} \quad \text{Valable lorsque } D > \lambda$$

Ou :

$d$  : est le diamètre de la zone en m,

$l$  : est la longueur de la zone en m,

$D$  : est le diamètre de la source en m,

$\lambda$  : est la longueur de l'onde ultrasonore en m.

L'intensité sur l'axe de propagation dans ce cas passe par une succession de maxima et de minima dont les abscisses sont données par:

$$x(\text{max}) = \frac{r^2}{(2k+1)\lambda} ; \quad k=0, 1, 2...$$

$$x(\text{min}) = \frac{r^2}{2k\lambda} ; \quad k=1, 2...$$

Pour  $k=0$  on obtient la position du dernier maximum  $x(m) = r^2/\lambda$  qui représente la limite entre le champ initial et la zone distale, tel qu'illustrée a la figure VI.6(b).

#### VI-2-4-1-2 Zone distale (zone de Fraunhofer)

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

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

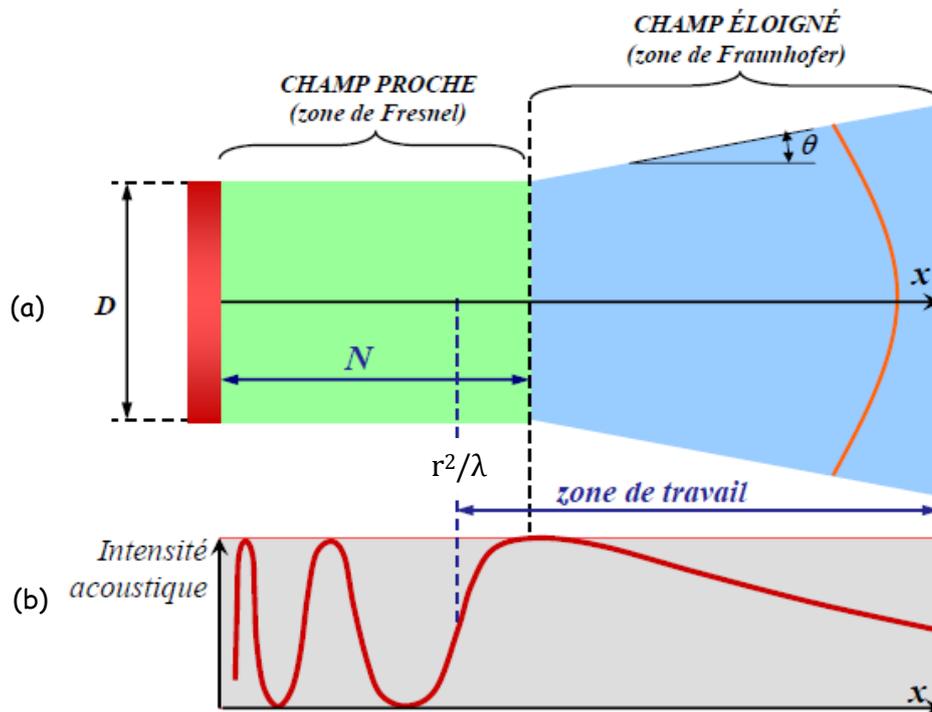
Ou :

$\theta$  : est l'angle de divergence en degrés,

$d$  : est le diamètre de la source en m,

$c$  : est la vitesse de son en  $m.s^{-1}$ ,

$f$  : est la fréquence en Hz.



**Figure VI.6:** (a) : Géométrie d'un faisceau d'ondes ultrasonores,  
 (b) : représentation du champ de Fresnel et du champ de Fraunhofer pour un  
 élément Piézo-électrique de diamètre  $D$ .

## **VI-2-5 Propagation des ondes ultrasonores**

La propagation des ondes ultrasonores est utilisée comme base de technique non destructive de contrôle des matériaux et de suivi de leur endommagement. Elle est directement liée aux propriétés mécaniques du matériau ( $E$ ,  $\nu$ ), permet d'apprécier l'homogénéité du milieu ausculté (en détectant les fissures, les vides, et délaminages), de caractériser un béton dont le rapport  $E/C$  est incorrect, ou ayant subi une modification structurelle (cas des bétons gelés ou incendiés).

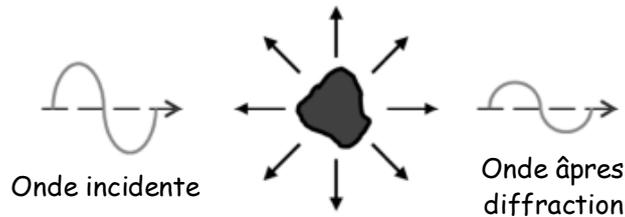
### **VI-2-5-1 Propagations d'ondes en milieu hétérogène**

La caractérisation non destructive des milieux hétérogène (cas de béton) joue un rôle primordial dans la pérennisation des structures du génie civil. L'estimation de leur potentiel de vie restant, permettrait d'améliorer la qualité et la sécurité et de prolonger leur conformité. Elle donnerait accès à des méthodes de prédiction des risques et donc à une meilleure gestion des investigations.

Les ondes ultrasonores qui se propagent dans le béton subissent une divergence géométrique due à la morphologie du faisceau, une dispersion due à l'ensemble des diffuseurs qu'elles rencontrent. Ce sont les granulats, les grains de sables, les fissures et les microfissures voire les barres de renfort. Les vitesses et atténuations évoluent alors et ceci notamment en fonction de la fréquence. L'endommagement ou l'évolution de certaines pathologies peuvent modifier la distribution, la forme et la densité de ces diffuseurs [TEM.10].

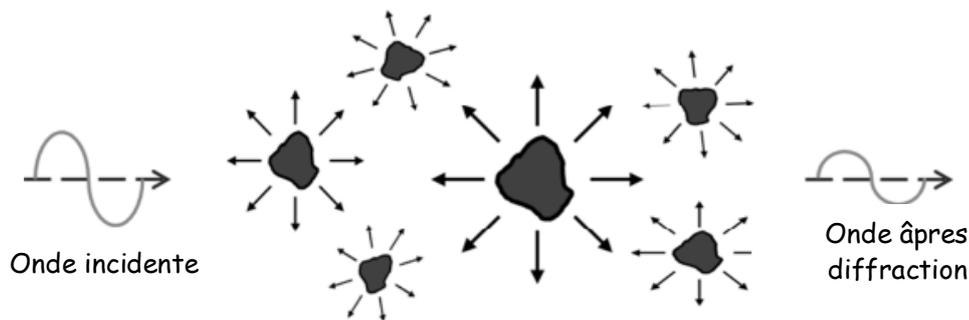
#### **VI-2-5-1-1 Diffraction des ondes par l'hétérogénéité [CHE.08]**

Lorsqu'une onde interagit avec une hétérogénéité du matériau, elle subit de la diffraction. Une partie de son énergie est déviée et redistribuée dans tout l'espace. L'onde qui se propage dans la même direction que l'onde incidente après diffraction par l'hétérogénéité a donc une amplitude plus faible. Cet effet de diffraction est plus ou moins marqué suivant la fréquence de l'onde et le contraste entre l'hétérogénéité et le milieu avoisinant. Il est maximal lorsque la longueur d'onde ( $\lambda$ ) devient comparable à la dimension caractéristique de l'hétérogénéité.



**Figure VI.7:** Diffraction par une hétérogénéité.

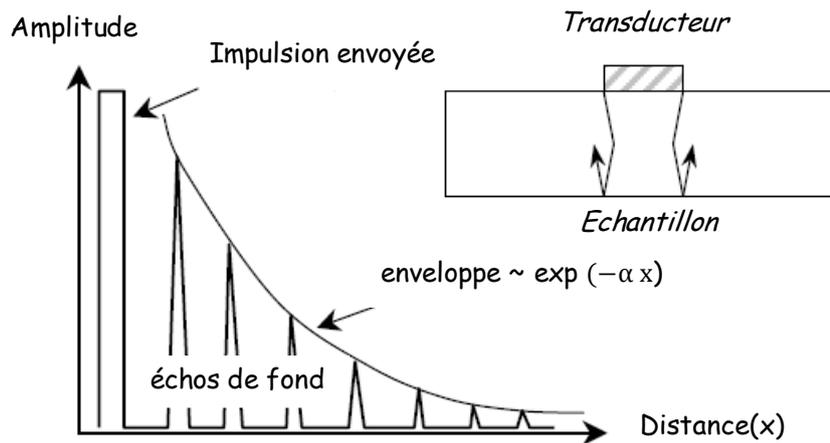
Dans le cas du béton, les hétérogénéités peuvent être la porosité de la pâte de ciment, ou les inclusions comme le sable et les granulats. Ces hétérogénéités sont très nombreuses, de natures différentes et de dimensions différentes. Elles influent sur la propagation à différentes échelles. On parle de diffraction multiple (Multidiffusion).



**Figure VI.8:** Multidiffusion dans le béton.

#### VI-2-5-2 L'atténuation: [BOD.11]

On appelle « atténuation », le phénomène d'affaiblissement de l'intensité du signal d'ondes se propageant dans un milieu atténuant. Cet affaiblissement se manifeste par une baisse d'énergie du signal le long de son trajet dans le milieu atténuant, ce qui entraîne une diminution de l'amplitude des ondes (Figure VI.9). [GOE. 80]



**Figure VI.9:** Décroissance exponentielle des échos en négligeant la diffraction  
[GOE. 80].

Elle peut être causée par trois phénomènes: la diffusion, la dispersion et la dissipation.

**VI-2-5-2-1 La diffusion:** La diffusion est un processus dans lequel un changement de direction ou d'énergie d'une particule incidente est provoqué par la collision de cette particule avec une autre particule ou un système de particule. Dans le cas du béton, elle est principalement attribuée aux multiples diffractions de l'onde sur les défauts (microstructure, répartition des granulats) et aussi à l'humidité.

**VI-2-5-2-2 La dispersion:** La dispersion correspond à la décomposition d'une onde de volume et de surface causée par la variation des propriétés physiques du milieu de propagation en fonction de la fréquence.

**VI-2-5-2-3 La dissipation:** La dissipation se traduit par la transformation d'énergie rayonnante en une autre forme d'énergie par interaction avec la matière. Elle est liée à deux propriétés intrinsèques du matériau.

L'atténuation est donc obtenue par la somme des différentes composantes d'atténuation. Elle est définie par la formule suivante :

$$\alpha = \alpha_{absorp} + \alpha_{iverg} + \alpha_{diffus}$$

Dans le cas du béton le phénomène de diffusion est le plus important et constitue la cause principale de l'atténuation de l'onde.

Suivant la longueur d'onde  $\lambda$  comparée à la taille des diffuseurs  $d$ , les interactions peuvent être classées en trois domaines qui sont dits de Rayleigh pour  $\lambda \gg d$ , stochastiques pour  $\lambda \approx d$  et géométrique pour  $\lambda \ll d$ . Le cas du béton avec des longueurs d'ondes utilisées de l'ordre de 100 mm à moins de 5 mm pour des fréquences de moins de l'ordre de 20 kHz à plus de 1 MHz se situe dans le domaine stochastique pour lequel les phénomènes de diffusion sont importants.

Plusieurs études ont été menées pour la détermination du coefficient d'atténuation de l'onde. Celles-ci ont permis d'obtenir différentes méthodes qui prennent en compte l'influence de paramètres comme la fréquence, diamètre des granulats...etc.

- D'après des chercheurs les matériaux peuvent être classés par ordre d'atténuation des ondes de volume pour des fréquences variant entre 0 et 18MHz. Le béton possède un coefficient d'atténuation de l'ordre de 2 %.
- Selon d'autres chercheurs, le coefficient d'atténuation total du signal, dans le béton, dépend principalement de la fréquence, et du diamètre des granulats.

Dans le cas où la longueur d'onde est supérieure au diamètre des plus gros granulats, l'expression du coefficient d'atténuation total  $\alpha$  en fonction de la fréquence est la suivante :

$$\alpha(f) = a_1 + aD^3 f^4$$

$a_1$  coefficient dissipation,

$a$  coefficient de dispersion,

$f$  fréquence (Hz),

$D$  diamètre moyen des granulats (m).

Si le diamètre des plus gros granulats est proche de la longueur d'onde, alors l'expression de  $\alpha$  change.

$$\alpha(f) = a_1 + aD^2 f^2$$

L'amplitude  $A_x$  à une distance  $x$  de la source pour une onde est donnée par :

$$A_x = A_0 e^{-\alpha x}$$

### **VI-2-5-3 Influence du milieu sur la propagation des ondes [CHE.08]**

Suivant le milieu dans lequel se trouvent les ondes, leur propagation sera différente. Dans le cas du génie civil, la porosité du béton est un paramètre déterminant sur la vitesse de propagation des ondes. La taille des granulats et les différentes interfaces entre la pâte de ciment et les granulats et l'armature ont également une influence.

#### **VI-2-5-3-1 Microfissures**

La présence de microfissures dans le mortier est étudiée par [AGG.07] en introduisant des petites plaquettes de vinyle de différentes dimensions et de différentes concentrations. Les résultats ont montré qu'une augmentation de la concentration d'inclusions augmente considérablement les valeurs de vitesses de phase et de l'atténuation pour des fréquences inférieures à 300 KHz. Les mesures de vitesses montrent que les ondes de Rayleigh sont beaucoup plus sensibles que les ondes de compression à ce type d'hétérogénéité.

#### **VI-2-5-3-2 Taux de saturation**

La teneur en eau du béton représente le taux volumique d'eau libre dans le matériau, elle peut être comprise entre 4 et 14 %. On peut également l'expliquer en terme de taux de saturation du béton, compris alors entre 0 (matériau sec) et 100% (complètement saturé), bien que ces valeurs extrêmes ne soient jamais atteintes en pratique. Ce taux de saturation influe sur la vitesse de propagation des ondes dans le béton. des études montrent que la variation des vitesses avec la teneur en eau est importante et ne varie pas linéairement avec le taux de saturation [OHD.00].

### VI-2-5-3-3 Influence des granulats

a) Sables :

[OWI.99] ont tenté de quantifier les effets de l'absorption et de la diffusion par les sables sur l'amortissement des ondes de Rayleigh (200-1200 KHz) dans du mortier, Leur conclusion est que dans le mortier, les pertes par diffraction sur les grains de sables ( $D=1$  à 3 mm) sont négligeables par rapport à l'amortissement intrinsèque, l'amortissement mesuré étant principalement linéaire avec la fréquence.

[CHA.06] étudie dans sa thèse l'influence du taux de sable et des dimensions des grains dans du ciment ( $D=1$  à 8 mm), dans la bande fréquentielle 250 - 1250 KHz. L'ajout de sable dans le ciment provoque une augmentation des valeurs de vitesse et d'atténuation mesurées pour les ondes. Entre les mortiers contenant différents taux et différentes dimensions de grains de sable, les différences ne sont visibles sur l'atténuation que pour les fréquences les plus élevées (supérieur à 800 KHz). Les valeurs de vitesses sont très sensibles au taux d'inclusion pour toutes les fréquences mais assez peu aux dimensions des inclusions.

b) Gros granulats :

Dans le cas de granulats de dimensions plus importantes, l'évaluation de l'atténuation devient plus délicate dans la même bande de fréquence. Dans les travaux menés par [LAN.95], les courbes d'atténuation des ondes pour du béton ( $D_{\max}=10\text{mm}$ ) semble relativement uniforme avec la fréquence, jusqu'à une fréquence limite qui diminue à mesure que  $D_{\max}$  augmente. Au-delà de cette fréquence limite, l'atténuation présente un saut important et à un comportement fréquentiel erratique (qui est irrégulier) : la dimension des hétérogénéités devient comparable à la longueur d'onde et les effets de la diffusion multiple deviennent alors très importants, le comportement des courbes d'amortissement reflète le caractère aléatoire de configuration d'hétérogénéité rencontrée au cours de la propagation.

Dans le cas de bétons ayant de granulats plus gros ( $D_{\max}=37\text{mm}$ ) la différence d'atténuation des ondes avec le mortier ( $D_{\max}=4,5\text{mm}$ ) est relativement faible pour des fréquences inférieurs à 100kHz et augmente progressivement avec la fréquence [PHI.05]. Cet écart est d'autant plus important et survient d'autant plus basse fréquence que le rapport E/C est élevé. Ces effets sont attribués à l'existence d'une zone interfaciale entre les granulats et la pâte de ciment.

La vitesse mesurée sur le béton est plus élevée que celle mesurée sur le mortier quelle que soit la fréquence considérée.

#### **VI-2-5-3-4 Influence du ferrailage**

Des chercheurs ont démontré influence du ferrailage sur les mesures de détection de fissures par ultrasons en effectuant une étude expérimentale réalisée avec un réseau des capteurs basse fréquence sur une maquette de béton ferrillée représentative des premières épaisseurs du béton d'enceinte. Cette étude démontre que malgré la présence du ferrailage, des défauts localisés jusqu'à des profondeurs de 500mm peuvent être détectés. Néanmoins, on observe qu'une nappe de ferrailage peut diminuer, l'amplitude de détection de défauts profonds selon l'orientation des défauts (perte de 3 dB à 400mm pour un défaut de 15°) [TEM.10].

### **VI-3 Les ondes ultrasoniques de surfaces**

Les ondes de surface se propagent le long de la ou des interfaces et elles restent bornées dans une direction perpendiculaire à ces interfaces.

#### **VI-3-1 Mesure de la vitesse ultrasonore de l'onde de surface**

La vitesse de l'onde de surface (onde de Rayleigh) est mesurée en utilisant un émetteur fixe et un récepteur qu'on déplace à pas constant suivant l'axe de l'émetteur (Figure VI.10).



Figure VI.10: Mesure en surface.

La vitesse des ondes de surface est estimée à partir de la pente de la courbe linéaire présentée sur la figure VI.11 qui donne la variation du temps (acquisition du signal) en fonction de la distance (entre l'émetteur et le récepteur) :

$$V_R = \frac{1}{d}$$

Où  $d$  est la pente de la droite qui donne la variation du temps (acquisition du signal) en fonction de la distance (entre l'émetteur et le récepteur). [RIN.09]

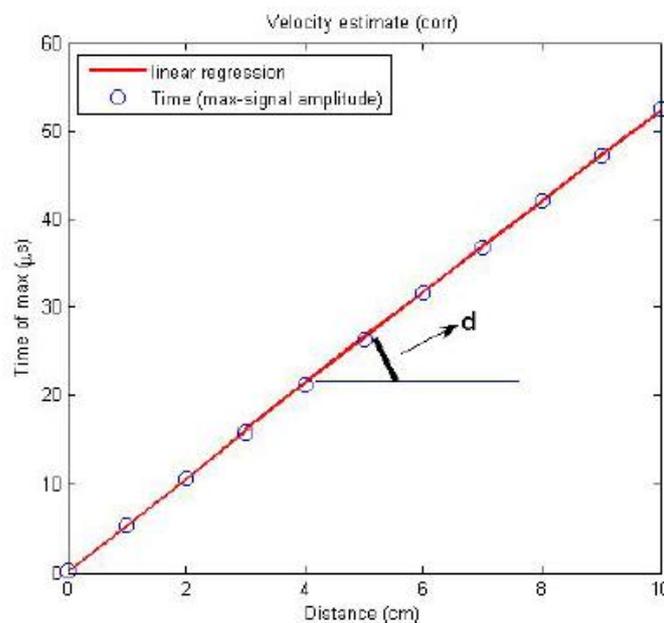


Figure VI.11: Estimation de la vitesse des ondes de surface.

### VI-3-2 Évaluation de l'épaisseur d'une bicouche

Une bicouche est la superposition de 2 couches d'un matériau de qualité différente.

#### VI-3-2-1 Principe :

Cette méthode consiste à faire des mesures ponctuelles à partir d'une seule face accessible sur laquelle sont positionnées l'émetteur et le récepteur. L'émetteur est fixe et le récepteur se déplace sur une ligne par rapport à l'émetteur pour la prise de mesures (figure VI.12).

Afin que les mesures soient répétitives, représentatives et correctes un certains nombre de précautions doivent être prises. [RIN.09]

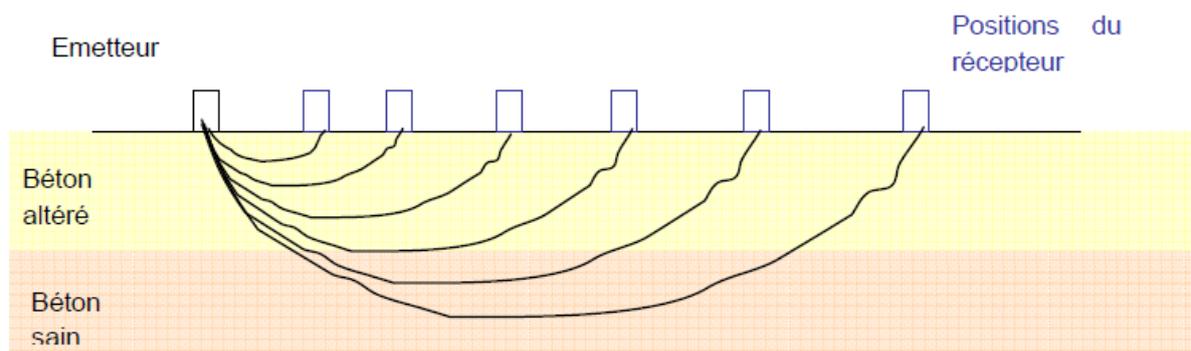


Figure VI.12: principe de détermination de l'épaisseur d'une bicouche.

#### VI-3-2-2 Dépouillement et interprétation

Il faut porter les différentes valeurs relevées dans un repère orthogonal ayant le temps en abscisse, exprimé en microsecondes et la distance en ordonnée exprimée en centimètres. Graphiquement on peut ainsi déterminer la distance à laquelle a lieu le point de rupture de la pente.

On effectue 2 régressions linéaires, la première pour toutes les mesures réalisées entre l'émetteur et la distance  $d_0$ , et la seconde pour toutes les mesures réalisées entre la distance  $d_0$  et la mesure la plus éloignée. On obtiendra ainsi les équations des 2 droites représentant les domaines de propagation du son dans le

béton altéré, puis dans le béton sain. Pour les 2 domaines on calcule la vitesse de propagation du son. [RIN.09]

On peut calculer l'épaisseur de la couche de béton altérée par la formule :

$$e = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

Avec : -  $V_1$  : La vitesse dans le béton altéré ;

-  $V_2$  : La vitesse dans le béton sain ;

-  $d$  : La distance du point de rupture de la pente.

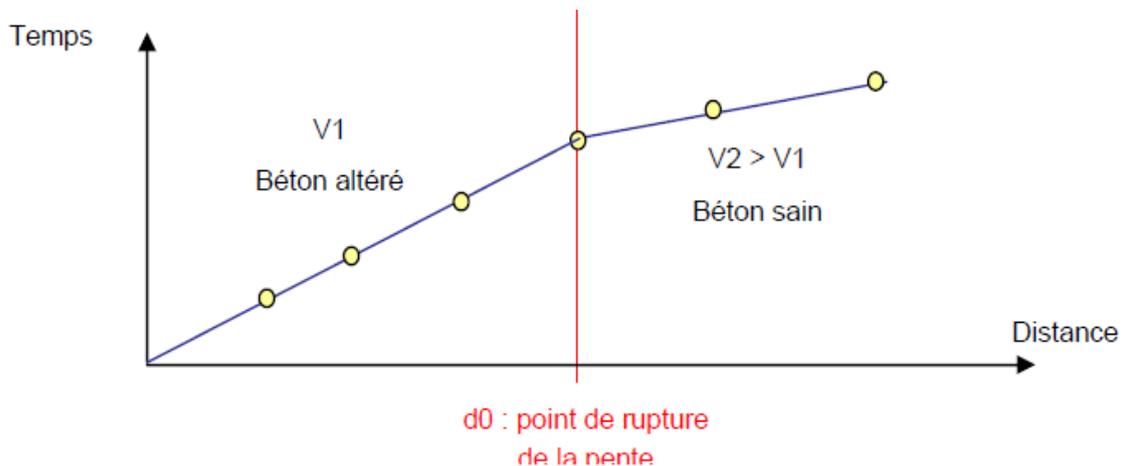


Figure VI.13: Exemple de Dépouillement d'une mesure en surface.

### VI-3-3 Caractérisation des fissures [RIN.09]

La fissuration est un problème majeur au regard de l'intégrité des ouvrages en béton du génie civil. En effet, ces derniers tiennent principalement leurs propriétés mécaniques des armatures d'acier qu'ils contiennent. Généralement se sont les fissures dans le béton d'enrobage qui sont mises en évidence, la première nappe de ferrailage ne se situe qu'à quelques centimètres de la surface, protégée par le béton d'enrobage. Le rôle de ce dernier est principalement d'assurer la protection des aciers contre les agents agressifs présents naturellement dans l'environnement d'un ouvrage.

**VI-3-3-1 Principe :**

Le principe général de mesure consiste à générer et recevoir des ondes aux  $N$  distances à l'aide d'une paire de transducteurs identiques, déplacés manuellement le long du profile de mesure.

L'onde générée par l'émetteur est reçue aux distances  $R_1, R_2, \dots, R_N$  espacées uniformément de  $\Delta x$ . Afin de limiter le nombre des récepteurs nécessaires, un seul récepteur est déplacé et les enregistrements sont effectués dans chaque point de mesure.

On étudie tout d'abord la régression correspondant au béton intact en éliminant les points correspondant à la fissure et ensuite l'écart  $\Delta t$  qui permet d'estimer la profondeur selon la relation :  $h = V \times \Delta t$ . [RIN.09]

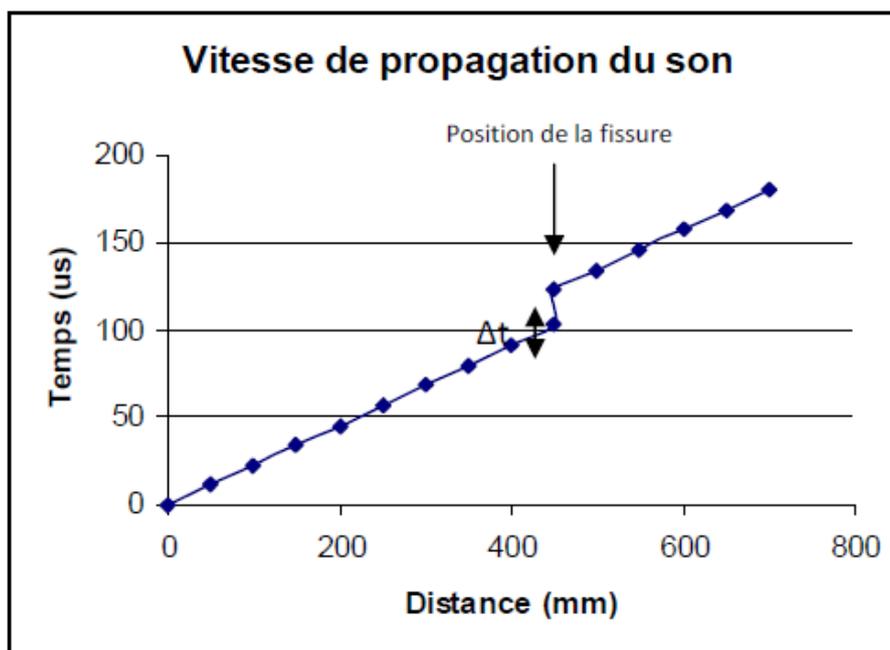
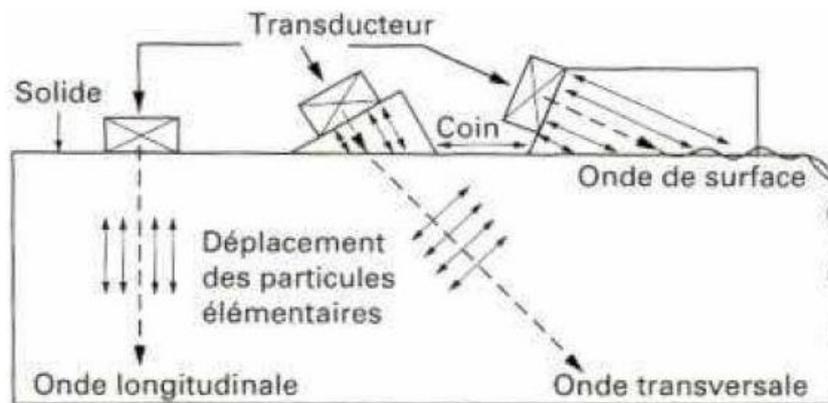


Figure IV.14: Exemple de dépouillement d'une mesure de l'épaisseur de fissure.

### VI-4 Position des transducteurs (utilisation d'un sabot) [GOU.04]

Les transducteurs peuvent être résonnants à une fréquence donnée, ou large bande autour d'une fréquence centrale, mais la largeur de bande utile n'est jamais très étendue (quelques centaines de KHz). Ils émettent généralement des ondes de compression, mais certains peuvent émettre des ondes de cisaillement [OUL.02]. L'utilisation de sabot fixe ou mobile au transducteur permet de favoriser la génération d'ondes de Rayleigh à la surface du béton [PIW.04]. Dans le domaine d'auscultation ultrasonique et pour les mesures précises de la vitesse de phase et l'atténuation c'est nécessaire d'avoir une source appropriée.



**Figure IV.15:** Influence d'utilisation d'un sabot (coin) sur les types d'ondes et mode de propagation des ultrasons dans un solide.

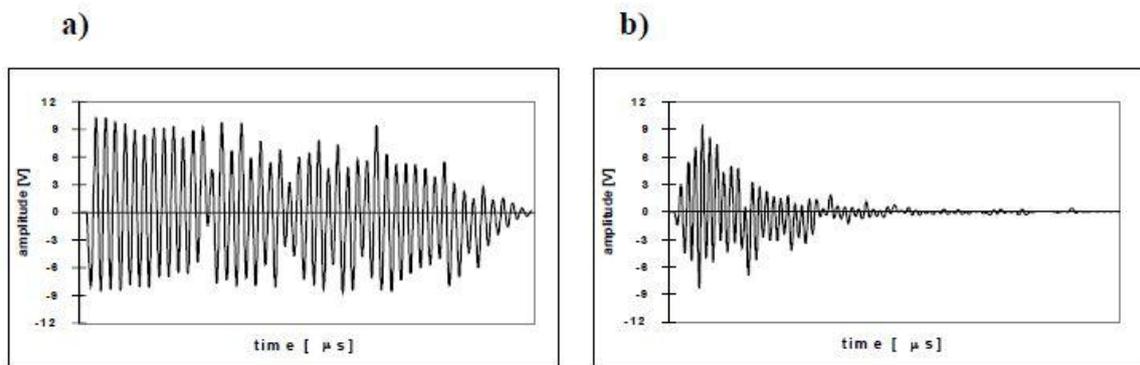
### VI-5 Applications au diagnostic des réparations minces par les ultrasons (exemple de système béton-résine)

Une étude sur le diagnostic de ces réparations minces a été menée par [AND.03]

#### VI-5-1 Procédure de contrôle par ultrasons

L'évaluation de l'adhérence à ultrasons dans le système béton-résine a été réalisée en utilisant le procédé de vitesse d'impulsions indirect. Les zones à faible adhérence influent sur les formes d'ondes enregistrées (figure VI.16) en atténuant les réflexions plus rapidement. En conséquence, les changements dans

les paramètres décrivant la forme d'onde ou été utilisés pour décrire l'adhérence du système B-R.



**Figure VI.16:** Reçu impulsion ultrasonique pour (a) une bonne adhérence et (b) une mauvaise adhérence dans le système B-R.

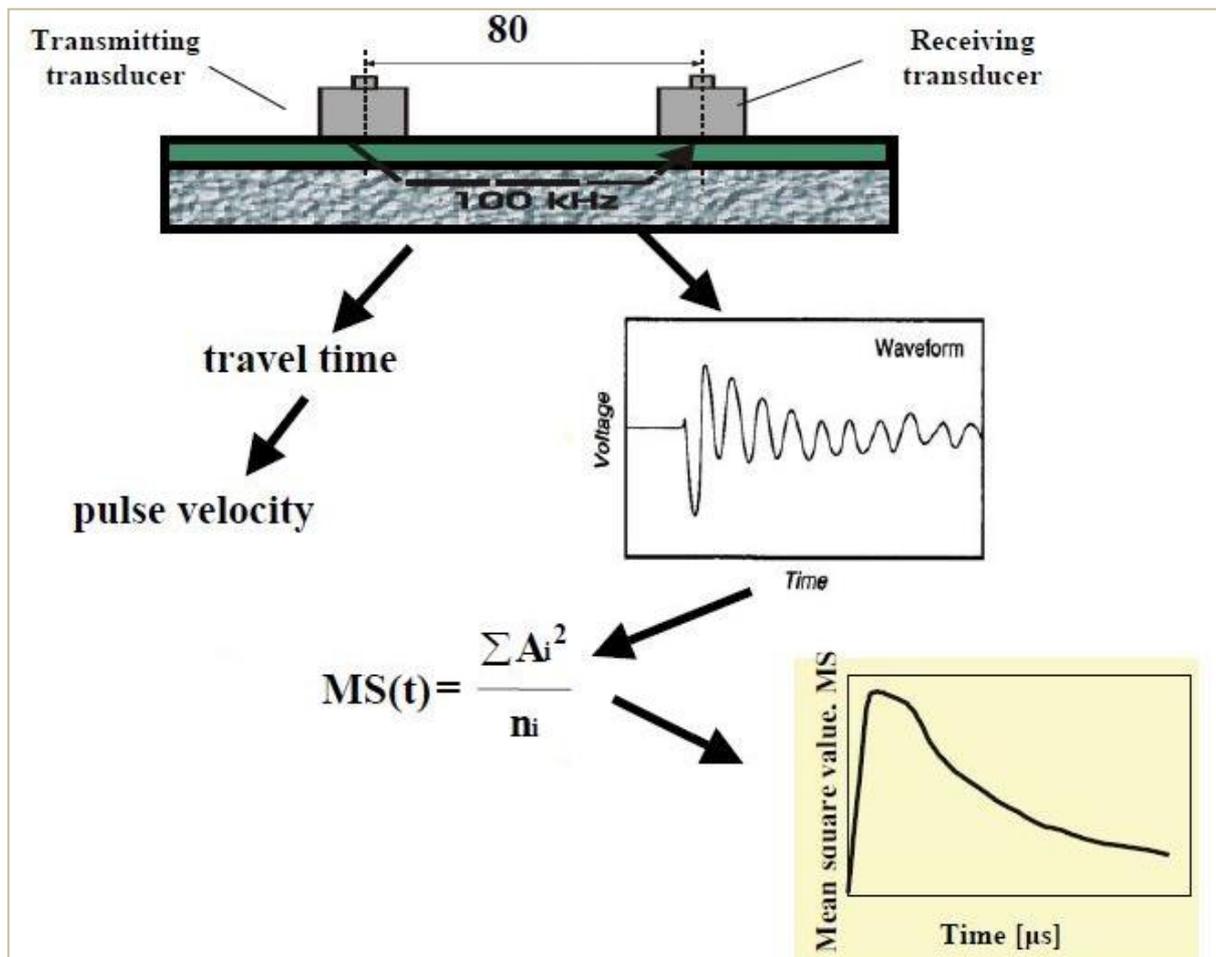
Les investigations ont été effectuées avec un appareil d'essai de béton du commerce avec des ensembles de paires de transducteurs associés (Figure VI.17). La fréquence des impulsions de la source de l'onde de compression est de 100 kHz. La distance entre les transducteurs est fixe et égal à 80 mm. Chaque impulsion ultrasonique a été enregistrée après stabilisation de testeur. Ces mesures non destructives ont été réalisées après 7 jours de durcissement de chaque type de revêtement.

La propagation des ondes ultrasonores à travers le système B-R a été caractérisée par la vitesse de propagation, calculée à partir du temps de passage, et par les variations d'un paramètre de valeur quadratique moyenne,  $MS(t)$ , définie dans le domaine temporel. La valeur  $MS$  à un moment donné a été calculée à partir de la formule:

$$MS(t) = \frac{\sum_{n_0}^{n_i-n_0} A_i A_i}{(n_i - n_0)}$$

Où  $A_i$  est l'amplitude de la  $i$ -ème point d'enregistré  $n_0$  est le nombre de points avec la première amplitude différente de zéro. Le tracé de la valeur  $MS$  décrit la variance d'amplitude dans le domaine temporel et est une représentation de

l'atténuation de l'impulsion d'onde. Dans ce travail, il a été supposé que pour une zone de mauvaise adhérence de l'échantillon, la valeur MS serait statistiquement diminuée plus vite que pour une zone de forte adhérence. Cette hypothèse est justifiée par des résultats comme ceux montrés dans la figure.



**Figure VI.17:** Schéma de la procédure à ultrasons pour l'évaluation de l'adhérence entre les composites polymères et support en béton.

### VI-5-2 Matériaux et systèmes de planchers testés

Les investigations ont été effectuées pour les systèmes de revêtements industriels polymères décrites dans le tableau ci-dessous: époxy (EP), polyuréthane (PUR) et d'ester de vinyle (VE). Tous les systèmes de revêtement ont été posés sur un substrat en béton de ciment portland (classe B35, qui a une résistance caractéristique à la compression de 35 MPa), préparé à partir du même

mélange de béton. Cette classe de béton a été choisie pour avoir un substrat relativement fort afin d'obtenir l'échec dans la liaison B-R (mode de défaillance adhésif) et d'être près du substrat de béton réel utilisé dans l'industrie du plancher (béton avec résistance à la compression supérieure à 25 MPa).

**Tableau VI.1:** Composition chimique et force de revêtements testés polymères (à partir de feuilles de données techniques de production).

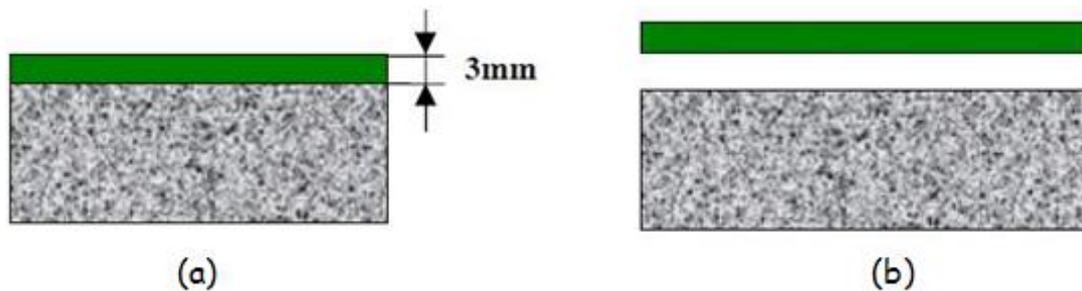
Propriété	Symbole du revêtement de polymère			
	EP- 1	EP- 2	PUR	VE
la composition chimique	résine époxy sans eau	résine époxy	résine de polyuréthane	résine vinyle - ester
Nombre de composants	2	2	2	1+ 3 (système de durcissement)
Max. la taille des grains de charge fine, mm	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,125
Épaisseur nominale, mm	0.7-3	1-5	0.5-4	1-3
Force d'arrachement (béton : résistance à la compression > 25 MPa)	> 1,5 MPa	> 2,5	> 2	> 1.7

### VI-5-3 Évaluation par ultrasons de l'adhésion à des conditions aux limite

Les formes de la propagation d'onde ont été analysées pour les deux conditions aux limites :

- Une adhérence maximale (pour un type donné de revêtement de polymère),
- Zéro adhérence (correspondant à la délamination).

Pour simuler un délaminage, un revêtement polymère a été préparé sur une feuille métallique avec un agent anti-adhérence, et ensuite mis sur un substrat en béton de ciment. Les enquêtes ont été réalisées pour trois systèmes de planchers de résine commerciaux: EP, PUR et VE, d'une épaisseur nominale de 3 mm et contenant une charge de quartz (diamètre de grain maximale  $D_{max} < 0,1$  mm).



**Figure VI.18:** Schéma de l'évaluation de l'adhérence à ultrasons pendant deux conditions:

(a) l'adhérence maximale et (b) zéro -adhérence.

La force d'arrachement moyenne obtenue pour le PE, VE et systèmes de revêtement PUR est égale à 3,23 MPa, 3,45 MPa, et 2,10 MPa, respectivement. Rupture cohésive dans le substrat de béton a été obtenue lors de l'essai d'arrachement pour le PE et VE revêtements. Dans le cas du revêtement en PUR, un mode de rupture mixte (70% de rupture cohésive dans le béton et rupture adhésive à 30% dans Ligne de liaison B-R) a été observé. Cela confirme que, pour la " adhérence maximale " état adhérence élevée dans le système B-R a été effectivement mis au point. Sur la base de l'analyse de forme d'onde, le temps de transit et la valeur MS ont été choisis comme paramètres utiles pour d'autres enquêtes. Les valeurs d'amplitude enregistrées par l'appareil d'essai n'étaient pas significativement en corrélation avec le niveau d'adhérence de tous les systèmes testés.

Les valeurs de MS pour les revêtements avec une adhérence maximale et une adhérence zéro étaient significativement différents. Le MS parcelle déterminée pour le support en béton sans revêtement polymère a été située entre les

parcelles MS pour les revêtements avec une adhérence maximale et avec zéro adhérence. Dans le cas du revêtement époxy, la vitesse de propagation de l'état zéro adhérence,  $V_p = 2623$  m/s, a été proche de la vitesse d'impulsion déterminée par la méthode directe,  $V_p = 2650$  m/s. Ce résultat a confirmé que l'onde ultrasonore a pénétré à la fois le revêtement de polymère et le substrat en béton. Dans le cas où le décollement était présent, l'onde ultrasonore parcourue uniquement à travers le revêtement de polymère. La plus grande différence de la valeur MS entre l'état d'adhérence maximale et l'état d'adhérence zéro a été observée dans l'intervalle de 400 ms à 700 ms dans le domaine temporel. La valeur MS à 500 ms dans le domaine temporel a été utilisée dans la plupart des analyses dans ce rapport.

**Tableau VI-2:** le rapport des analyses réalisées par la force d'arrachement et l'ultrason.

Système de recouvrement	Force d'arrachement [MPa]	vitesse [km/s]	Système de recouvrement	Force d'arrachement † [MPa]	vitesse [km/s]
VE (1)	3,45	4,460	VE (4)	-	2,703
EP (2)	3,23	4,460	EP (5)	-	2,623
PUR (3)	2,10	4,420	PUR (6)	-	2,339

## VI-6 Conclusion :

Au travers de cette revue bibliographique concernant la théorie et l'utilisation des ultrasons, il s'avère que cette méthode non destructive peut être un outil de diagnostic adapté et rapide à la caractérisation de la qualité des réparations minces dans les structures en béton. Elle se substituera alors aux méthodes destructives traditionnelles et qui sollicitent les réparations par des essais d'arrachement. Ces dernières sont souvent coûteuses et pénibles à réaliser.

**Partie II:**

**Etude**

**Expérimentale**

**CHAPITRE I:**  
**Caractéristiques**  
**des matériaux**  
**utilisés**

## I-1. Les matériaux utilisés

Nous allons présenter dans ce chapitre, les matériaux utilisés pour la confection du béton et les caractéristiques mécaniques et physiques de ces matériaux ainsi que les matériaux de réparation.

Les matériaux utilisés sont :

❖ Pour le béton :

- gravier concassé (5/15) provenant de la carrière d'el FEDJOU DJ «Guelma»,
- sable de carrière (0/5) provenant de la carrière de BENDJERAH «Guelma»,
- ciment portland composé CEM II-A (CPJ 42.5): hdjar essoud de la région de Skikda,
- eau de gâchage: c'est l'eau du robinet disponible au niveau du laboratoire,

❖ armatures longitudinales HA Ø8 et transversales lisses Ø6.

❖ Pour les matériaux de réparation :

- tissus de fibre de carbone,
- lamelles de fibre de carbone,

La résine époxyde (pour les tissus -31- et les lamelles -330-).

## I-2. Caractéristiques physiques du sable et du gravier

Les caractéristiques du sable et du gravier utilisés ont été déterminées [ROU.14] expérimentalement, suivant la norme française [N-13] ; [N-14] dont les résultats sont exposés dans les tableaux suivants :

**Tableau I-1:** Caractéristiques physiques du sable utilisé (0/5).

Caractéristiques		Résultats
Masse volumique apparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		1.45
Masse volumique absolue ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		2.44
Equivalent de sable	E.S.V (%)	84
	E.S (%)	81
Teneur en eau (%)		2.45

**Tableau I-2:** Caractéristiques physiques du gravier utilisé (5/15).

Caractéristiques		Résultats
Masse volumique apparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		1.26
Masse volumique absolue ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		2.50
Teneur en eau (%)		0.315

### I-3. Analyse granulométrique

La granularité granulats a été déterminée selon la norme [N-15], les résultats d'essais sont présentés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau I-3:** Analyse granulométrique du sable (0/5).

<b>Sable (0/5)</b>			
<b>Poids de l'échantillon : 2000 g</b>		<b>Fond de tamis : 1996 g</b>	
<b>Ouvertures des tamis</b>	<b>Refus cumulé (g)</b>	<b>Refus cumulé (%)</b>	<b>tamisât (%)</b>
5.60	20	1	99
4	170	8.5	91.5
2	960	48	52
1	1370	68.5	31.5
0.500	1605	80.25	19.75
0.250	1745	87.25	12.75
0.125	1845	92.25	7.75
0.063	1945	97.25	2.75
<0.063	1970	100	0

**Tableau I-4:** Analyse granulométrique du gravier (5/15).

<b>Gravier 5/15</b>			
<b>Poids de l'échantillon : 2000 g</b>		<b>Fond de tamis : 1998 g</b>	
<b>Ouvertures des tamis (mm)</b>	<b>Refus cumulé (g)</b>	<b>Refus cumulé (%)</b>	<b>Tamisât (%)</b>
14	405	20.25	79.7
11.20	855	42.75	57.2
8	1480	74	26
5	1850	92.5	7.5
4	1890	94.5	5.5
2	1920	96	4
1	1930	96.5	3.5
0.063	1960	98	2
<0.063	1992	100	0

## I-4. Caractéristiques physiques des matériaux de réparation

### I-4-1. Lamelles composées de fibres de carbone

#### Caractéristiques techniques

Densité	1,60	
Température de transition vitreuse	> 100°C	(suivant la norme EN 61006)
Pourcentage Volumétrique des fibres	> 68%	

#### Caractéristiques physiques et mécaniques

Module d'Elasticité E en MPa	Valeurs dans le sens longitudinal des fibres (suivant la norme EN 2561)	
	Valeur moyenne	165 000
	Valeur minimum	> 160 000
	Valeur au fractile 5%	162 000
	Valeur au fractile 95%	180 000
Résistance en traction uni axiale en MPa	Valeurs dans le sens longitudinal des fibres (suivant la norme EN 2561)	
	Valeur moyenne	3 100
	Valeur minimum	> 2 800
	Valeur au fractile 5%	3 000
	Valeur au fractile 95%	3 600
Elongation à rupture	Valeurs dans le sens longitudinal des fibres (suivant la norme EN 2561)	
	Valeur minimum	> 1,70%

**Figure I. 1:** Données techniques pour lamelle de fibre de carbone pour le renforcement structural.

### I-4-2. Tissus de fibres de carbone

Couleur	Noir				
Conservation	Entreposer au sec entre 5° - 32°C (41° - 89°F).				
<b>Propriétés à 23 °C (73 °F) et 50 % H.R.</b>					
Direction de la fibre primaire	0° (unidirectionnelle)				
Résistance en traction	3,8 GPa (5,5 x 10 <sup>6</sup> lb/po <sup>2</sup> )				
Module en traction	235 GPa (34 x 10 <sup>6</sup> lb/po <sup>2</sup> )				
Allongement	1,5 %				
Densité	1,8 g/cm <sup>3</sup> (0,065 lb/po <sup>3</sup> )				
Poids par unité de surface	610 g/m <sup>2</sup> (18 oz/v <sup>2</sup> )				
<b>Propriétés du tissu mûri et imprégné avec Sikadur® 300 ou Sikadur® Hex 300 (21° - 24°C (70° - 75°F)/5 jours et suivi d'une cure à 60°C (140°F)/48 h)</b>					
	Valeur moyenne <sup>1</sup>		Valeur de conception <sup>2</sup>		Méthode d'essai
Propriétés	MPa	(lb/po <sup>2</sup> )	MPa	(lb/po <sup>2</sup> )	ASTM
Résistance à la traction*	849	(1,23 x 10 <sup>6</sup> )	717	(1,04 x 10 <sup>6</sup> )	D 3039
Module à la traction*	70 552	(10,24 x 10 <sup>6</sup> )	65 087	(9,45 x 10 <sup>6</sup> )	D 3039
Allongement à la rupture %*	1,12	(1,12)	0,98	(0,98)	D 3039
60°C (140°F) - Résistance à la traction	847	(1,23 x 10 <sup>6</sup> )	699	(1,01 x 10 <sup>6</sup> )	D 3039
60°C (140°F) - Module à la traction	69 843	(10,14 x 10 <sup>6</sup> )	63 088	(9,16 x 10 <sup>6</sup> )	D 3039
60°C (140°F) - Allongement à la rupture %	1,13	(1,13)	0,97	(0,97)	D 3039
Résistance à la compression	779	(1,13 x 10 <sup>6</sup> )	715	(1,04 x 10 <sup>6</sup> )	D 695
Module d'élasticité en compression	67 014	(9,73 x 10 <sup>6</sup> )	61 532	(8,93 x 10 <sup>6</sup> )	D 695
90° - Résistance à la traction	24	(3500)	16	(2300)	D 3039
90° - Module à la traction	4861	(7,06 x 10 <sup>5</sup> )	3973	(5,77 x 10 <sup>5</sup> )	D 3039
90° - Allongement à la rupture %	0,45	(0,45)	0,33	(0,33)	D 3039
Résistance en cisaillement dans un plan ± 45°	52	(7500)	46	(6700)	D 3518
Module en cisaillement dans un plan ± 45°	2498	(3,63 x 10 <sup>5</sup> )	2394	(3,48 x 10 <sup>5</sup> )	D 3518
Épaisseur	1,016 mm	(0,04 po)	-	-	-
Résistance à la traction par po de largeur	21,9 kN	(4928 lb)	18,5 kN	(4160 lb)	D 3039

**Figure I.2:** Données techniques pour le tissu de fibre de carbone pour le renforcement structural.

### I-4-3. Colle époxydique thixotrope à deux composants sans solvant

- Densité du composant A : 1,5 environ.
- Densité du composant B : 1,2 environ.
- Densité du mélange A + B : 1,35 environ.
- Proportion du mélange A/B = 2 : 1 en volume.
- Adhérence sur béton sablé après 14 jours à 23°C : > 1,5 MPa.
- Résistances mécaniques à 14 jours à 23°C
  - à la compression : > 50 MPa,
  - à la traction par flexion : > 15 MPa,

- Les résistances mécaniques sont proches de leur maximum au bout de 48 heures à 20°C.

### I-5. Composition du béton

Le tableau I.5 représente les quantités des constituants utilisés pour le béton à réparer [ROU.14].

**Tableau I.5:** Compositions des bétons.

Composition	Dosages	Unité
Sable	813	Kg/m <sup>3</sup>
Gravier 5/15	946	Kg/m <sup>3</sup>
Ciment	400	Kg/m <sup>3</sup>
Eau	214	L/m <sup>3</sup>

**CHAPITRE II:**  
**Méthodologie**  
**expérimentale**

## II-1. Introduction

La qualification des réparations est celle déterminée par les essais destructifs (arrachement). Ces résistances à l'arrachement vont être corrélées aux évolutions de la vitesse des ultrasons pour des réparations avec différents matériaux composites (tissu de fibre de carbone ; lamelle de carbone dure).

Les corps d'épreuve sont des poutrelles 100x15x15 cm<sup>3</sup> armées par des armatures longitudinales 2 HA Ø8 (en haut et en bas) et transversales lisses Ø6 espacées de 10 cm. Ces poutrelles ont été soumises auparavant à une flexion quatre points jusqu'à 80% de leur capacité portante. Ensuite trois poutrelles ont été réparées par des lamelles de fibres de carbone LFC (poutre 13, 14 et 15) et trois autres par du tissu de fibres de carbone TFC (poutre 10, 11 et 12). Une fois réparées, ces poutrelles ont été chargées en flexion quatre points jusqu'à la rupture.

Les essais non destructifs par les ultrasons ont été réalisés sur les poutrelles avant et après la rupture tandis que les essais destructifs d'arrachement n'ont été réalisés sur les poutrelles qu'après leur rupture.

## II-2. Principes de base et techniques des mesures ultrasoniques

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 (figure II.1). Les transducteurs utilisés, avec une fréquence de 54 kHz, sont ceux disponibles au niveau du LGCH-Guelma.



(a)

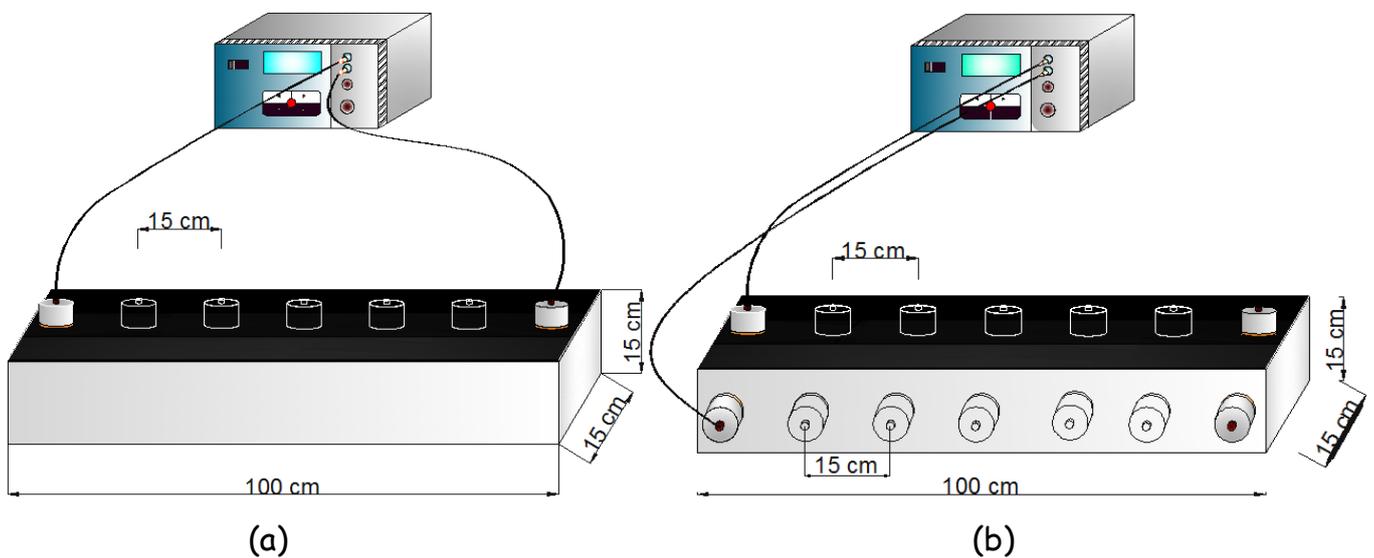


(b)

**Figure II.1:** Figure du dispositif ultrasonique ;

a- Appareillage ultrasonique utilisé ; b- Transducteurs utilisés.

On a utilisé pour l'essai non destructif par les ultrasons deux techniques de mesure. La première correspond à une transmission surfacique avec un pas de 15 cm entre l'émetteur et le récepteur (figure II.2a) et la seconde à celle d'une transmission semi-directe (figure II.2b).



(a)

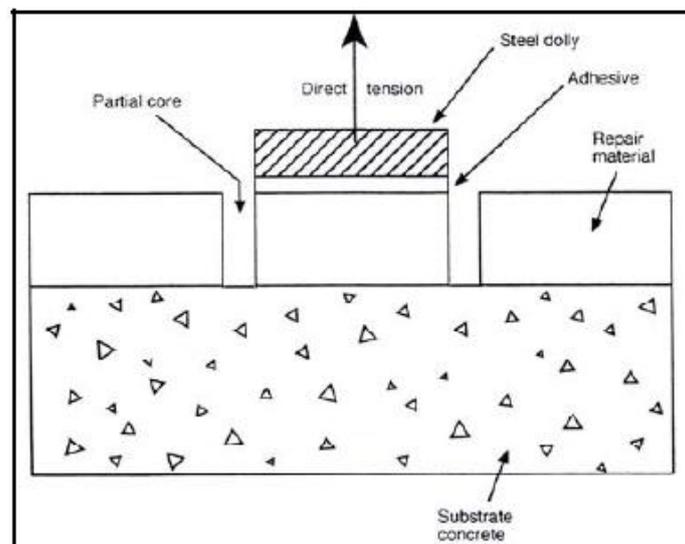
(b)

**Figure II.2:** positionnement de L'émetteur et du récepteur ;

(a) transmission surfacique ; (b) transmission semi-directe.

### II-3. Principe de l'essai d'arrachement

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 (figure II.3). Les plots utilisés dans le cadre de ce travail sont des plots en aluminium de largeur 50 mm- La norme [N-7] préconise de pratiquer une entaille dans le revêtement tout autour du plot jusqu'au substrat, à l'aide d'une scie. La force appliquée sur le plot est progressivement augmentée jusqu'à une force maximale correspondant à la rupture. La contrainte d'arrachement est calculée comme le rapport de la force maximale sur la surface du plot.



**Figure II.3:** Configuration d'un essai classique d'arrachement.

Il existe des dynamomètres à trois pieds qui viennent se fixer sur la surface et saisissent le plot afin de lui appliquer l'effort de traction. Dans le cas où la rupture survient dans le béton, l'essai est considéré comme satisfaisant puisqu'il implique que la force d'adhésion entre les deux matériaux est supérieure à la résistance même du béton. Pour réaliser cet essai, on a utilisé un dynamomètre de traction disponible au niveau du laboratoire pédagogique du département de génie civil et d'hydraulique (figure II.4).



Figure II.4: Photo du dynamomètre de traction utilisé.

#### II-4. Protocol expérimental

La méthodologie suivie se compose des étapes suivantes :

##### 1eme étape : Corps d'épreuve

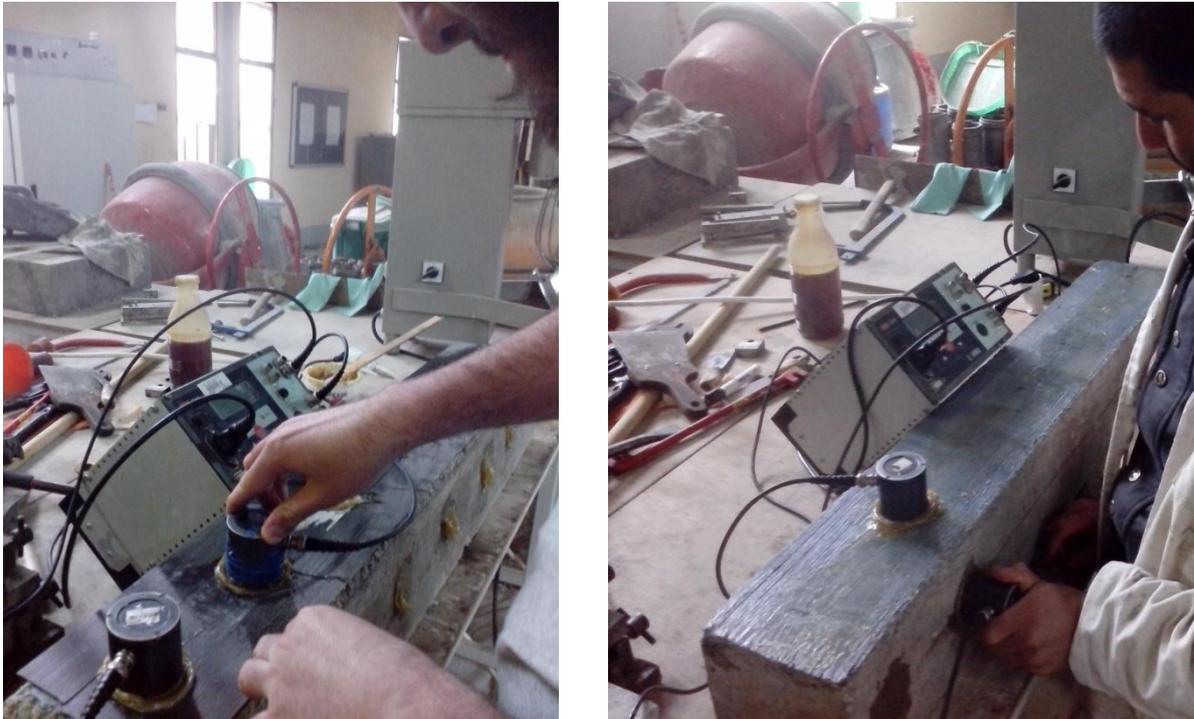
Les dimensions des poutrelles sont  $0.15 \times 0.15 \times 1 \text{ m}^3$  réparées par les matériaux composites.



Figure II.5: Poutrelles destinées aux essais.

**2<sup>ème</sup> étape** : essais non destructifs par les ultrasons

Dans cette étape on a mesuré la vitesse de propagation des impulsions par les deux techniques, transmission surfacique et semi-direct par un pas de 15 cm entre deux positions.



(a)

(b)

**Figure II.6:** Photo de l'opération des essais ultrasoniques avant rupture

(a) : transmission surfacique ;(b) : transmission semi-direct.

**3<sup>ème</sup> étape** : dans cette étape les poutrelles sont chargées en flexion quatre points jusque la rupture.

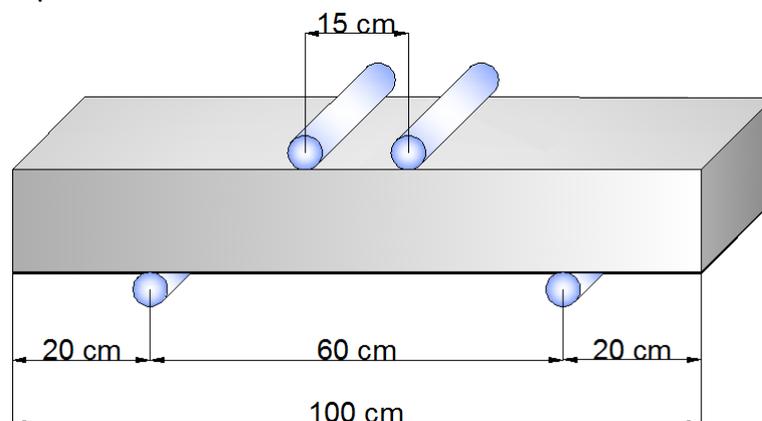
**Figure II.7:** Configuration d'essai de flexion par quatre points.



Figure II.8: photo de l'essai en flexion quatre points.

**4<sup>ème</sup> étape** : cette étape si le même comme l'étape 2



(a)

(b)

Figure II.9: Photo de l'opération des essais ultrasoniques après rupture ;

(a) : transmission surfacique ;(b) : transmission semi-direct.

**5<sup>ème</sup> étape** : Essais destructifs par dynamomètre de traction (arrachement)

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



Figure II.10: Photo de l'opération d'essais d'arrachement.



Figure II.11: Photos des ruptures lors des essais destructifs (arrachement).

**CHAPITRE III:**  
**Interprétation**  
**et exploitation**  
**des résultats**

### III-1. Essais non destructifs

Les résultats des essais non destructifs ont concerné la mesure de la vitesse de propagation des ultrasons en mode de transmission surfacique, donc une vitesse moyenne le long des poutrelles, et en mode de transmission semi-directe en sept points le long des poutrelles. Ces essais ont été réalisés sur les poutrelles réparées avant et après leur rupture.

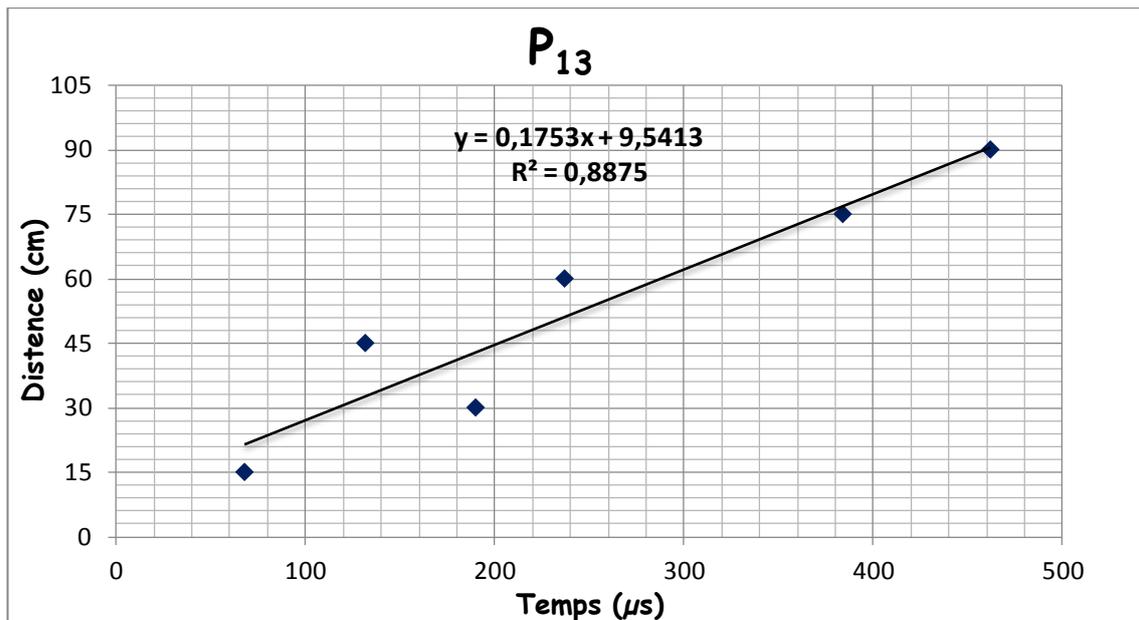
#### III-1-1. Transmission surfacique

##### III-1-1-1. Poutrelles réparées avec lamelles de fibres de carbone LFC

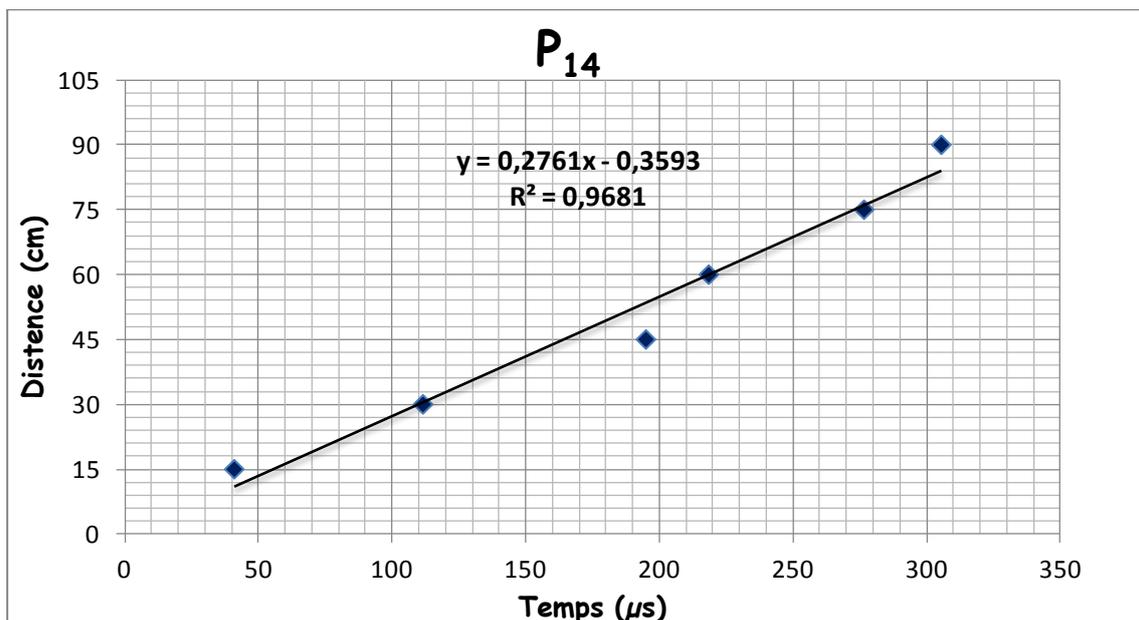
➤ Avant rupture :

**Tableau III-1:** Temps de propagation de l'onde de surface sur les poutrelles réparées avec lamelles de fibre de carbone LFC avant rupture.

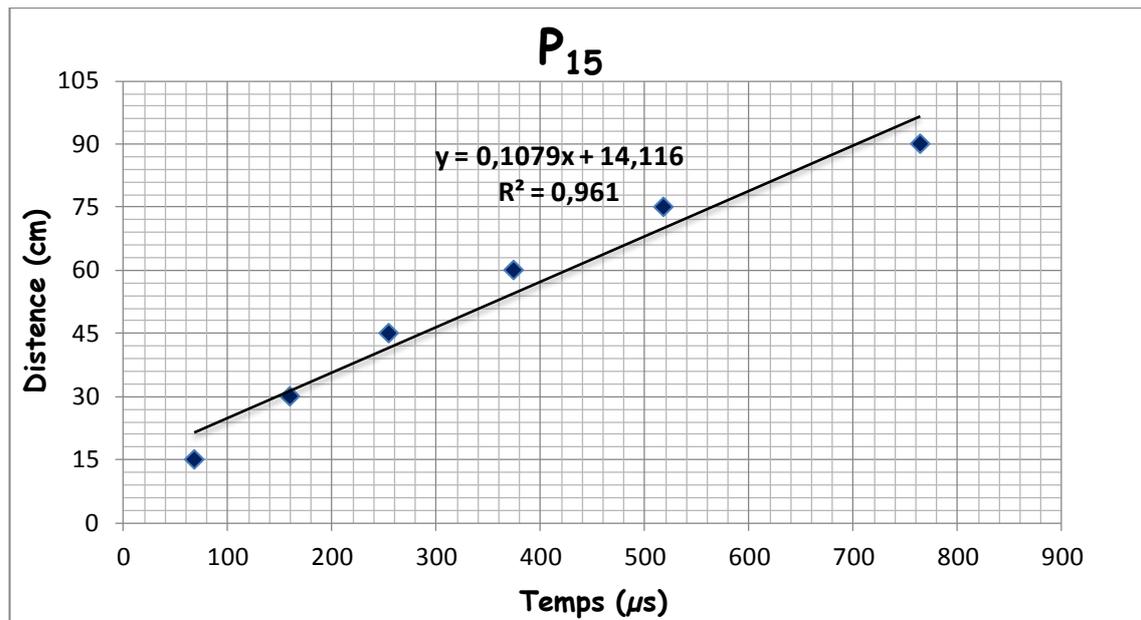
Distance entre l'émetteur et le récepteur (cm)	Temps de propagation de l'onde de surface ( $\mu$ s)		
	P <sub>13</sub>	P <sub>14</sub>	P <sub>15</sub>
15	67.5	41.1	67.3
30	189.6	111.7	159
45	131.3	195.1	253.8
60	236.6	218.6	373.6
75	383.6	276.7	517.3
90	461.6	305.6	763.6



**Figure III.1:** Estimation de la vitesse sur la poutrelle P<sub>13</sub> réparée par des lamelles de fibres de carbone avant rupture.



**Figure III.2:** Estimation de la vitesse sur la poutrelle P<sub>14</sub> réparée par des lamelles de fibres de carbone avant rupture.



**Figure III.3:** Estimation de la vitesse sur la poutrelle P<sub>15</sub> réparée par des lamelles de fibres de carbone avant rupture.

$$V_{P13} = 1750 \text{ m/s};$$

$$V_{P14} = 2760 \text{ m/s};$$

$$V_{P15} = 1070 \text{ m/s}.$$

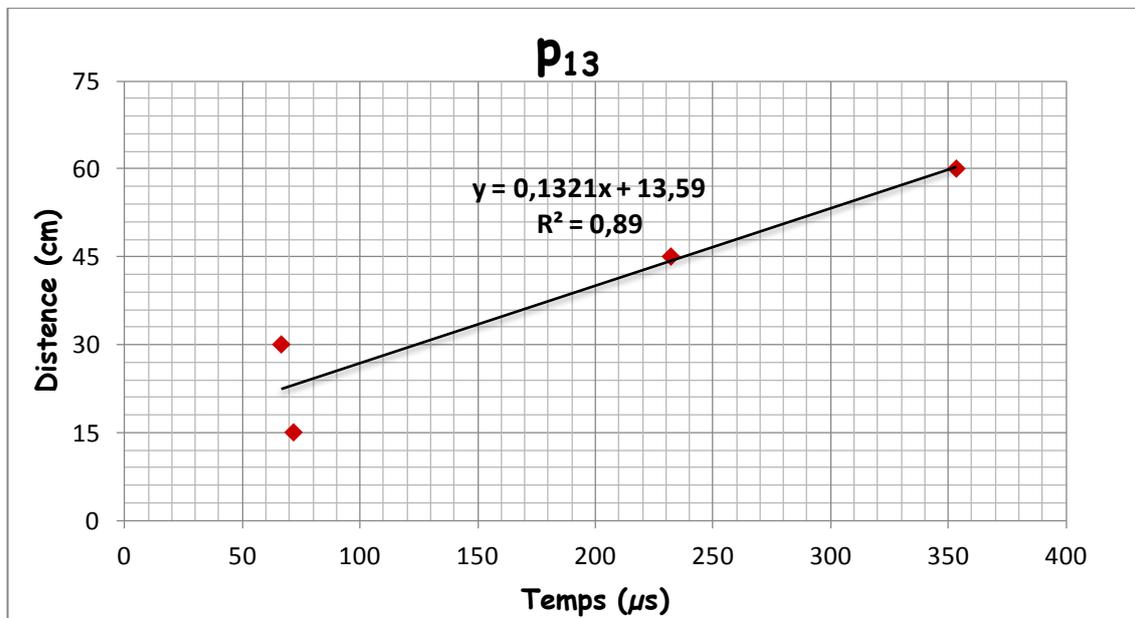
$$\sigma = 694 \text{ m/s}.$$

$$V_{\text{moy}} = 1860 \pm 694 \text{ m/s}.$$

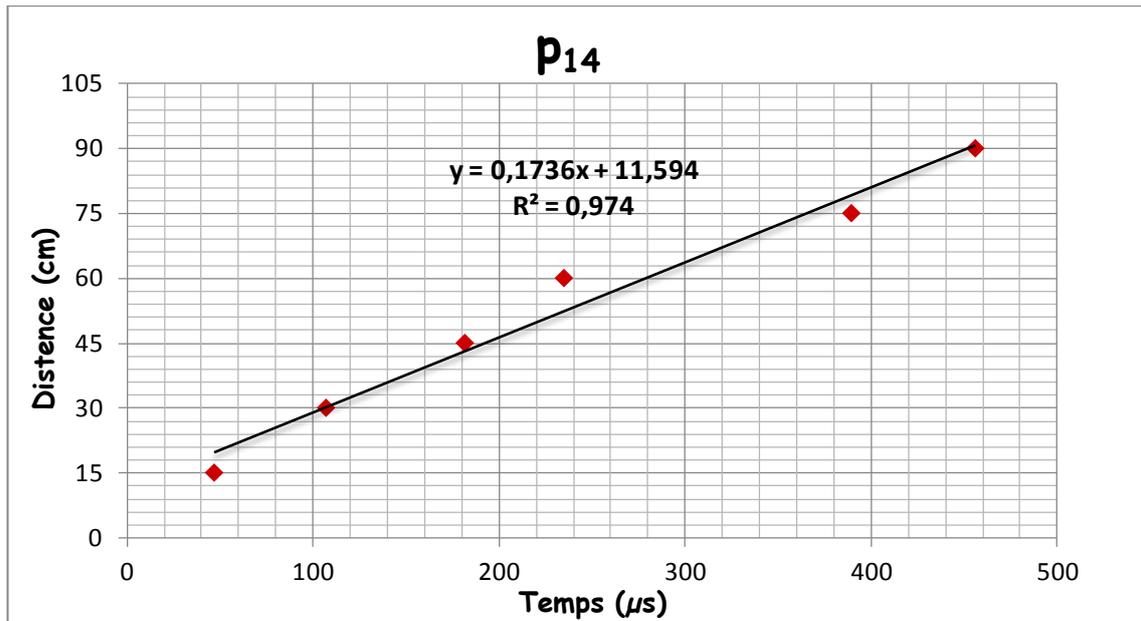
➤ Après rupture :

**Tableau III-2:** Temps de propagation de l'onde de surface sur les poutrelles réparées avec lamelles de fibre de carbone après rupture.

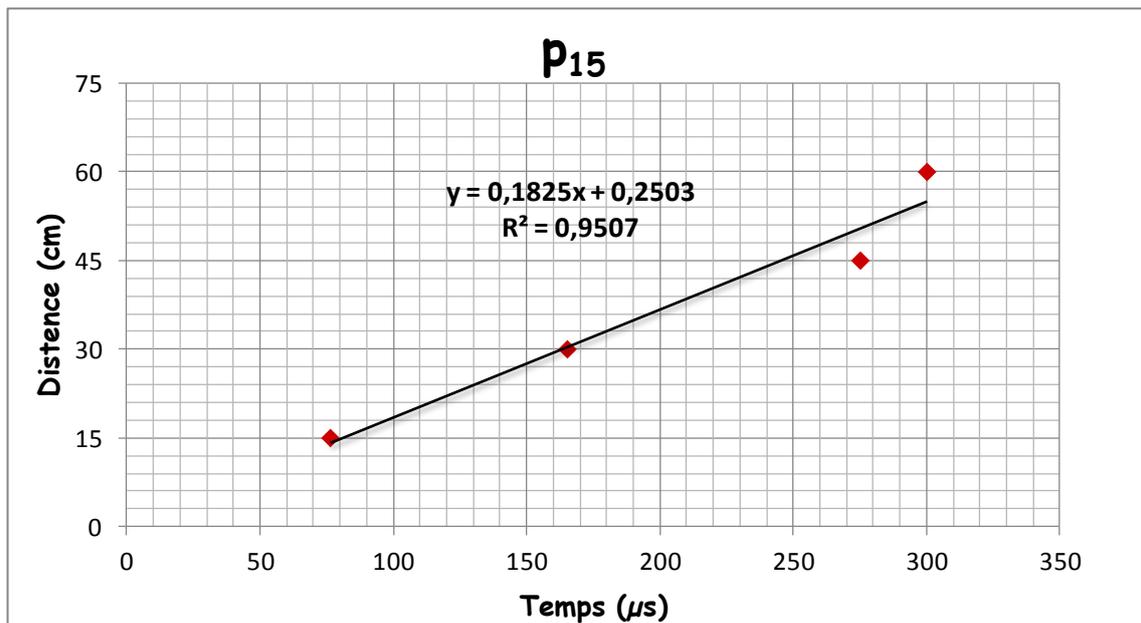
Distance entre l'émetteur et le récepteur (cm)	Temps de propagation de l'onde de surface ( $\mu\text{s}$ )		
	P <sub>13</sub>	P <sub>14</sub>	P <sub>15</sub>
15	71.8	46.6	76.2
30	66.6	106.7	165.1
45	232.2	181.3	275
60	353.5	234.6	300
75	Décollement	389.1	Décollement
90	Décollement	455.7	Décollement



**Figure III.4:** Estimation de la vitesse sur la poutrelle P<sub>13</sub> réparée par des lamelles de fibres de carbone après rupture.



**Figure III.5:** Estimation de la vitesse sur la poutrelle P<sub>14</sub> réparée par des lamelles de fibres de carbone après rupture.



**Figure III.6:** Estimation de la vitesse sur la poutrelle P<sub>15</sub> réparée par des lamelles de fibres de carbone après rupture.

$V_{P13} = 1320$  m/s;

$V_{P14} = 1730$  m/s;

$V_{P15} = 1820$  m/s.

$\sigma = 217$  m/s.

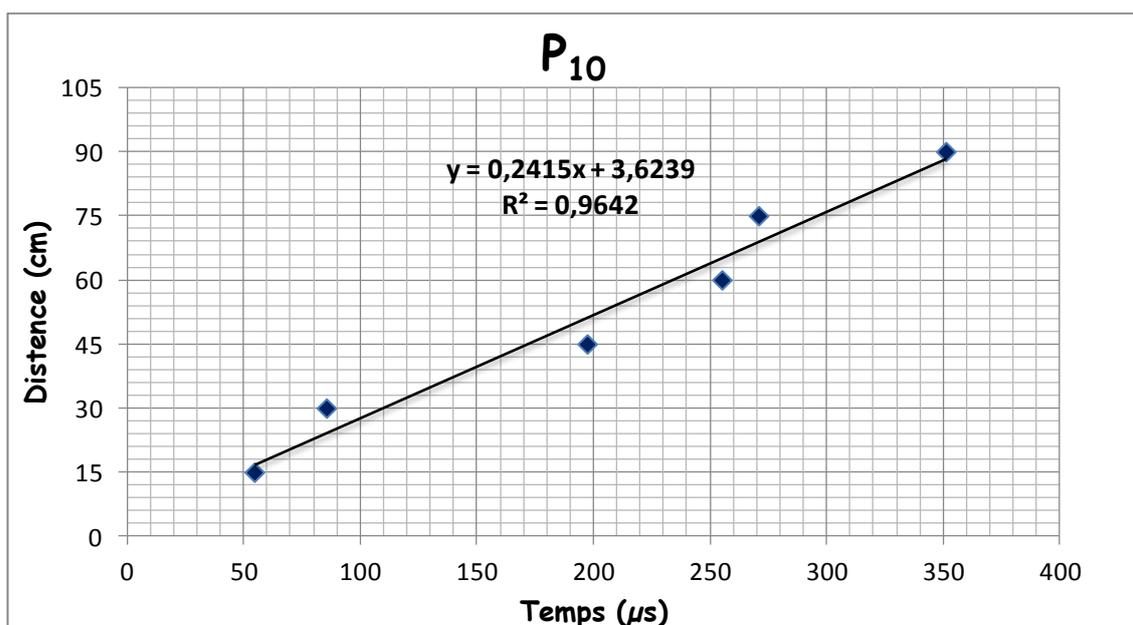
$V_{moy} = 1623 \pm 217$  m/s.

### III-1-1-2. Poutrelles réparées par tissus de fibres de carbone TFC

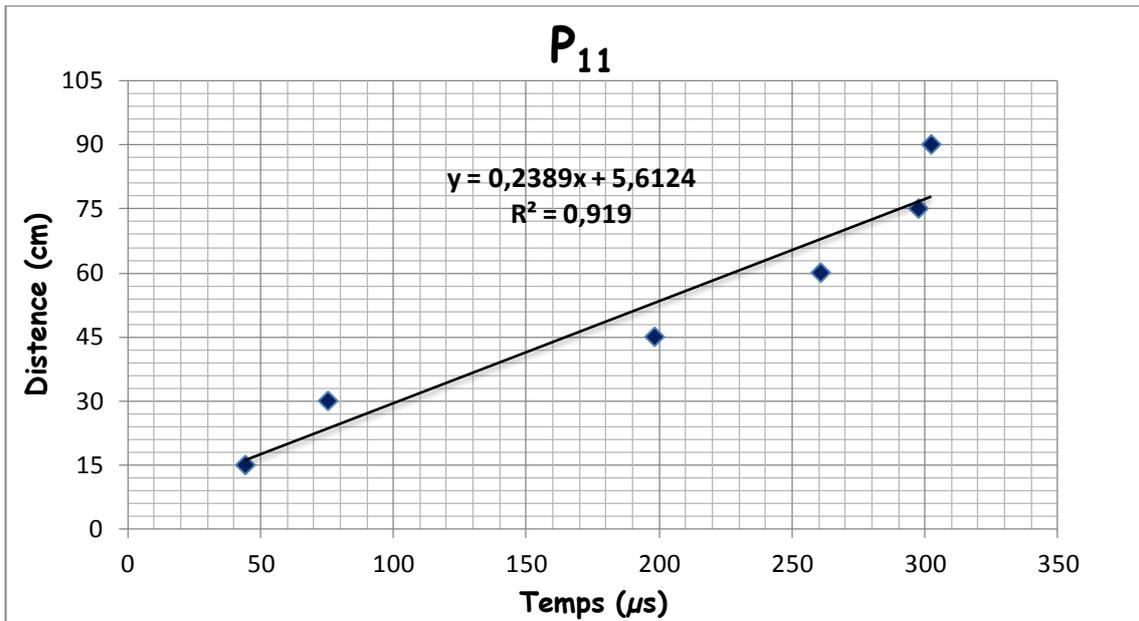
➤ Avant rupture :

**Tableau III-3:** Temps de propagation de l'onde de surface sur les poutrelles réparées TFC avant rupture.

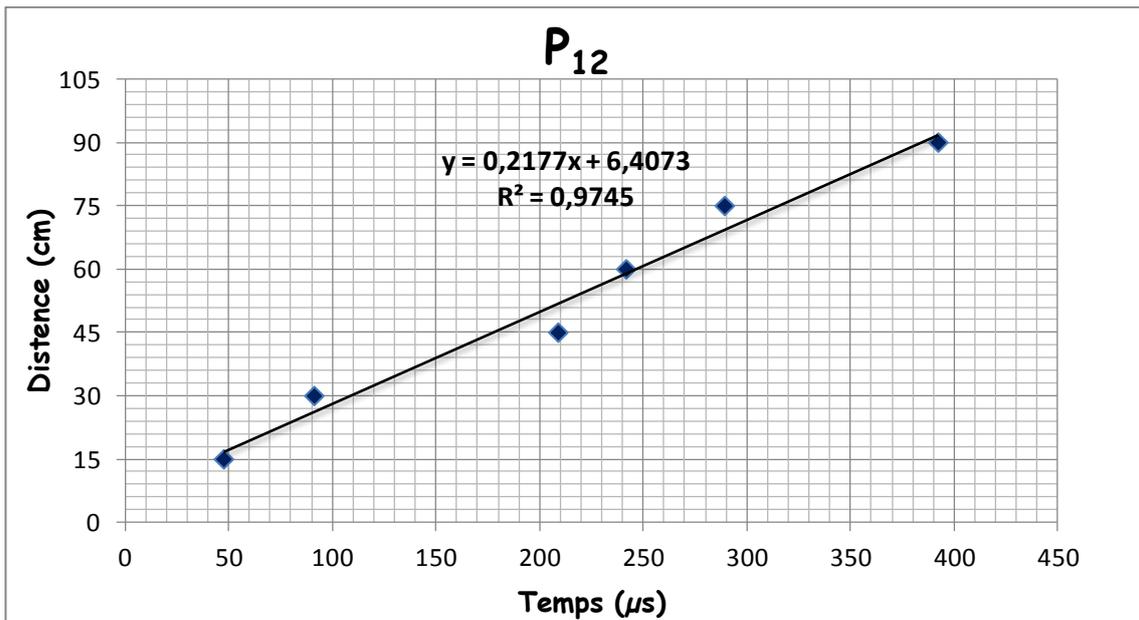
Distance entre l'émetteur et le récepteur (cm)	Temps de propagation de l'onde de surface ( $\mu$ s)		
	P <sub>10</sub>	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>
15	44.1	54.6	47.5
30	75.2	85.5	91.1
45	198.1	197.3	208.8
60	260.6	255.1	241.6
75	297.4	270.8	289.1
90	302.2	351.1	392.1



**Figure III.7:** Estimation de la vitesse sur la poutrelle P<sub>10</sub> réparée par TFC avant rupture.



**Figure III.8:** Estimation de la vitesse sur la poutrelle P<sub>11</sub> réparée TFC avant rupture.



**Figure III.9:** Estimation de la vitesse sur la poutrelle P<sub>12</sub> réparée par TFC avant rupture.

$V_{P10} = 2380$  m/s;

$V_{P11} = 2410$  m/s;

$V_{P12} = 2170$  m/s.

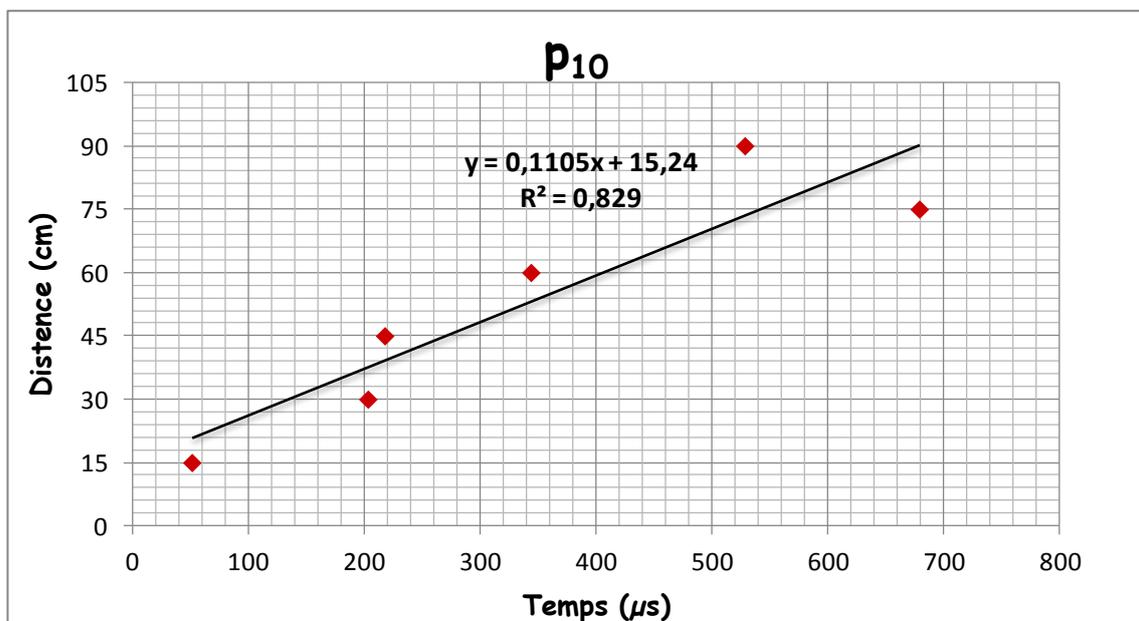
$\sigma = 106$  m/s.

$V_{\text{moy}} = 2320 \pm 106$  m/s.

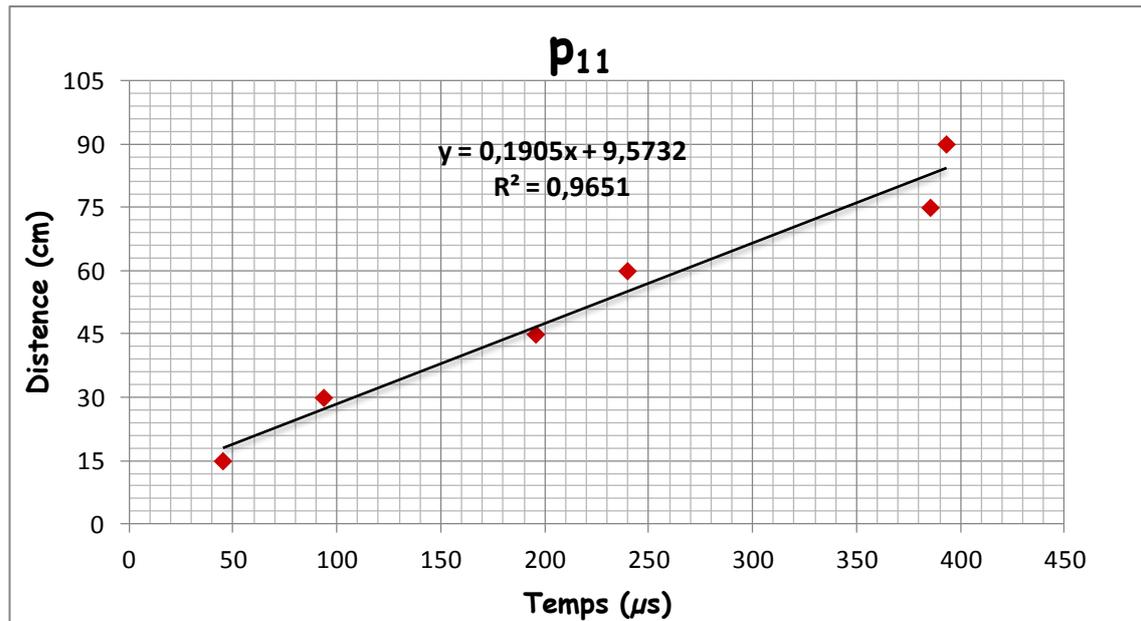
➤ Après rupture :

**Tableau III-4:** Temps de propagation de l'onde de surface sur les poutrelles réparées par TFC après rupture.

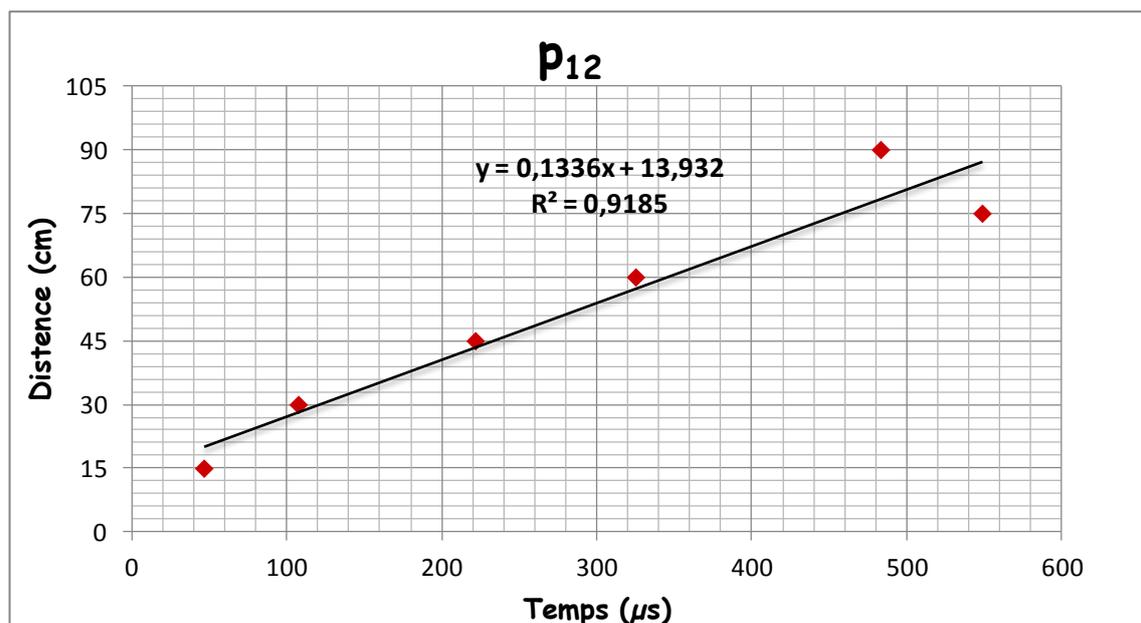
Distance entre l'émetteur et le récepteur (cm)	Temps de propagation de l'onde de surface ( $\mu\text{s}$ )		
	P <sub>10</sub>	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>
15	51.3	45	46.5
30	203.1	93.5	107.4
45	217.6	195.5	221.6
60	343.7	239.6	325
75	678.7	385.3	548.5
90	528.2	393	483



**Figure III.10:** Estimation de la vitesse sur la poutrelle P<sub>10</sub> réparée par TFC après rupture.



**Figure III.11:** Estimation de la vitesse sur la poutrelle P<sub>11</sub> réparée par TFC après rupture.



**Figure III.12:** Estimation de la vitesse sur poutrelle P<sub>12</sub> réparée par TFC après rupture.

$$V_{P10} = 1100 \text{ m/s;}$$

$$V_{P11} = 1900 \text{ m/s;}$$

$$V_{P12} = 1330 \text{ m/s.}$$

$$\sigma = 336 \text{ m/s.}$$

$$V_{\text{moy}} = 1443 \pm 336 \text{ m/s.}$$

**Commentaires :**

Au vue de ces résultats expérimentaux, on peut en tirer les conclusions suivantes :

\* les vitesses des ondes de surface, dans les deux types de réparations (LFC et TFC), dans les poutrelles avant rupture sont toujours supérieures à celles après rupture. Donc la vitesse des ultrasons est bien influencée par l'état d'endommagement du béton et surtout de l'interface. La chute est plus importante dans la réparation par TFC que dans celle par LFC.

Ceci est du à la meilleure réalisation de la réparation par TFC (collage et imprégnation) que celle par LFC (collage). Les vitesses des TFC sont supérieures de 25% à celles des LFC.

**III-1-2. Transmission semi-directe****III-1-2-1. Poutrelles réparées avec lamelles de fibres de carbone LFC**

**Tableau III-5:** Vitesses aux différentes positions dans les poutrelles réparées par LFC.

poutrelle	Vitesses aux différentes positions de la poutrelle (m/s)								
	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>7</sub>	V' <sub>moy</sub>	Ecart type
<b>Avant rupture</b>									
P <sub>13</sub>	4420	3596	4128	4193	3988	3513	3264	3872	389
P <sub>14</sub>	3775	3658	3315	3886	3719	3958	7267	4229	1256
P <sub>15</sub>	4065	3633	3684	4018	3816	3722	4495	3919	280
V <sub>moy</sub>	4087	3629	3709	4032	3841	3731	5009		
Ecart type	264	25	335	126	111	182	1674		

Après rupture									
<b>P<sub>13</sub></b>	3596	1376	3186	3988	3633	720	389	2413	1414
<b>P<sub>14</sub></b>	4080	3775	3633	3775	3915	2301	4080	3651	572
<b>P<sub>15</sub></b>	3422	3284	3031	4160	3536	1164	867	2781	1164
<b>V<sub>moy</sub></b>	3699	2812	3283	3974	3695	1395	1779		
<b>Ecart type</b>	278	1035	255	158	161	666	1639		

### III-1-2-2. Poutrelles réparées par tissus de fibres de carbone TFC

**Tableau III-6:** Vitesses aux différentes positions dans les poutrelles réparées par TFC.

poutrelle	Les vitesses dans chaque position de la poutrelle (m/s)								
	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>7</sub>	V' <sub>moy</sub>	Ecart type
Avant rupture									
<b>P<sub>10</sub></b>	4313	3988	3709	3900	3915	3816	4244	3984	204
<b>P<sub>11</sub></b>	4295	4366	3524	3844	3886	4003	3958	3982	263
<b>P<sub>12</sub></b>	4160	4330	3671	4244	4278	4261	4112	4151	207
<b>V<sub>moy</sub></b>	4256	4228	3635	3996	4026	4027	4105		
<b>Ecart type</b>	68	170	80	177	178	182	117		

Après rupture									
$P_{10}$	3958	3205	3411	3816	3167	1736	4534	3404	813
$P_{11}$	4160	3973	3215	3608	3886	3536	3775	3736	290
$P_{12}$	4112	4420	3264	3749	3315	1861	3886	3515	775
$V_{moy}$	4077	3866	3297	3724	3456	2378	3928		
Ecart type	86	502	83	87	310	821	438		

### Commentaires :

On remarque que les vitesses des ondes, en transmission semi-directe, des deux types de réparations (LFC, TFC) sont proches. On peut expliquer ceci par le fait que le trajet des ondes dans la transmission semi-directe concerne beaucoup plus le béton que le système de réparation, contrairement à la transmission de surface. Comme dans le premier mode de transmission, les vitesses avant rupture sont toujours supérieures à celles après rupture. Cette chute est du cette fois à l'endommagement du béton et aussi à celle du système de réparation, elle est en moyenne de 36 % pour les LFC et de 14 % pour les TFC.

### III-2. Essais destructifs

Les essais destructifs ont concerné la détermination de la charge de rupture par traction du système de réparation aux mêmes positions qui ont servi à la détermination des vitesses des ultrasons (sept positions).

Les résultats des essais destructifs d'arrachement sont résumés dans les tableaux suivants :

**III-2-1. Les Poutrelles réparées avec lamelles de fibres de carbone LFC****Tableau III-7:** Force d'arrachement des poutrelles réparées par LFC.

Positions	Force d'arrachement (N)				
	P <sub>13</sub>	P <sub>14</sub>	P <sub>15</sub>	F <sub>moy</sub>	Ecart type( $\sigma$ )
1	3765	3280	4275	3773	406
2	1000	200*	150*		
3	1900	3700	3200	2933	759
4	4096	6600	6233	5643	1104
5	4120	4960	4762	4614	359
6	500	200*	0**		
7	3018	0**	0**		

\* léger décollement    \*\* décollement complet

Les positions qui ont présentées des décollements donnent des valeurs très faibles, voir même nulles.

**III-2-2. Les poutrelles réparées par tissus de fibres de carbone TFC****Tableau III-8:** Force d'arrachement des poutrelles réparées par TFC.

Positions	Forces d'arrachement (N)				
	P <sub>10</sub>	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	F <sub>moy</sub>	Ecart type( $\sigma$ )
1	5150	8820	7833	7267	1551
2	4300	500	3255	2685	1603
3	3500	985	4500	2995	1479
4	3115	2120	5195	3477	1281
5	2620	3182	5660	3821	1321
6	600	642	5200	2140	2159
7	6210	8780	7400	7463	1050

**Commentaires :**

On remarque que l'évolution des forces d'arrachement est similaire à celle des vitesses ultrasoniques de surface (IV-1-1 Transmission surfacique). Les forces d'arrachement des poutrelles avec TFC sont supérieures à celles avec du LFC, cette différence avoisine les 62%. On observe aussi que la réparation avec TFC a bien résisté aux sollicitations de chargement jusqu'à rupture et qu'il n'a pas eu de délaminage entre le composite et le béton.

**III-3. Corrélation entre les vitesses en transmission surfacique****«  $V_s$  » en transmission semi-directe «  $V_d$  »**

On essaye dans cette partie de prospecter les relations entre les vitesses des deux techniques de mesure (semi-directe et de surface).

**III-3-1. Poutrelles réparées avec LFC**

**Tableau III-9:** Vitesses moyennes en transmissions surfacique et semi-directe dans les poutrelles réparées par LFC.

Poutrelles	P <sub>13</sub>	P <sub>14</sub>	P <sub>15</sub>	V <sub>moy</sub> (m/s)	$\sigma$ (m/s)
<b>Avant rupture</b>					
Transmission surfacique "Vs" (m/s)	1750	2760	1070	1860	694
Transmission semi-directe "Vd" (m/s)	3872	4229	3919	4007	158
<b>Après rupture</b>					
Transmission surfacique "Vs" (m/s)	1320	1730	1820	1623	218
Transmission semi-directe "Vd" (m/s)	2413	3651	2781	1731	1323

### III-3-2. Poutrelles réparées avec TFC

**Tableau III-10:** Vitesses moyennes calculées par les transmissions surfacique et semi-directe pour les poutrelles réparées par TFC.

Poutrelles	P <sub>10</sub>	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	V <sub>moy</sub> (m/s)	σ (m/s)
<b>Avant rupture</b>					
Transmission surfacique "Vs" (m/s)	2380	2410	2170	2320	107
Transmission semi-directe "Vd" (m/s)	3984	3982	4151	2712	1330
<b>Après rupture</b>					
Transmission surfacique "Vs" (m/s)	1100	1900	1330	1443	336
Transmission semi-directe "Vd" (m/s)	3404	3736	3515	2306	1253

#### Commentaires :

Les vitesses en mode semi-direct sont supérieures à celles en mode indirect (de surface) dans toutes les configurations (réparations par LFC ou TFC, avant et après rupture). Les grandes différences concernent les poutrelles avec LFC avant rupture (215 %) où on soupçonne une mauvaise adhésion sur certaines positions des poutrelles ; et les poutrelles avec TFC après rupture (60 %) où l'endommagement du béton et la bonne qualité de l'interface qui explique cette différence.

### III-4. Corrélations entre les vitesses en transmission semi-directe « $V_d$ » et les forces d'arrachement « $F$ »

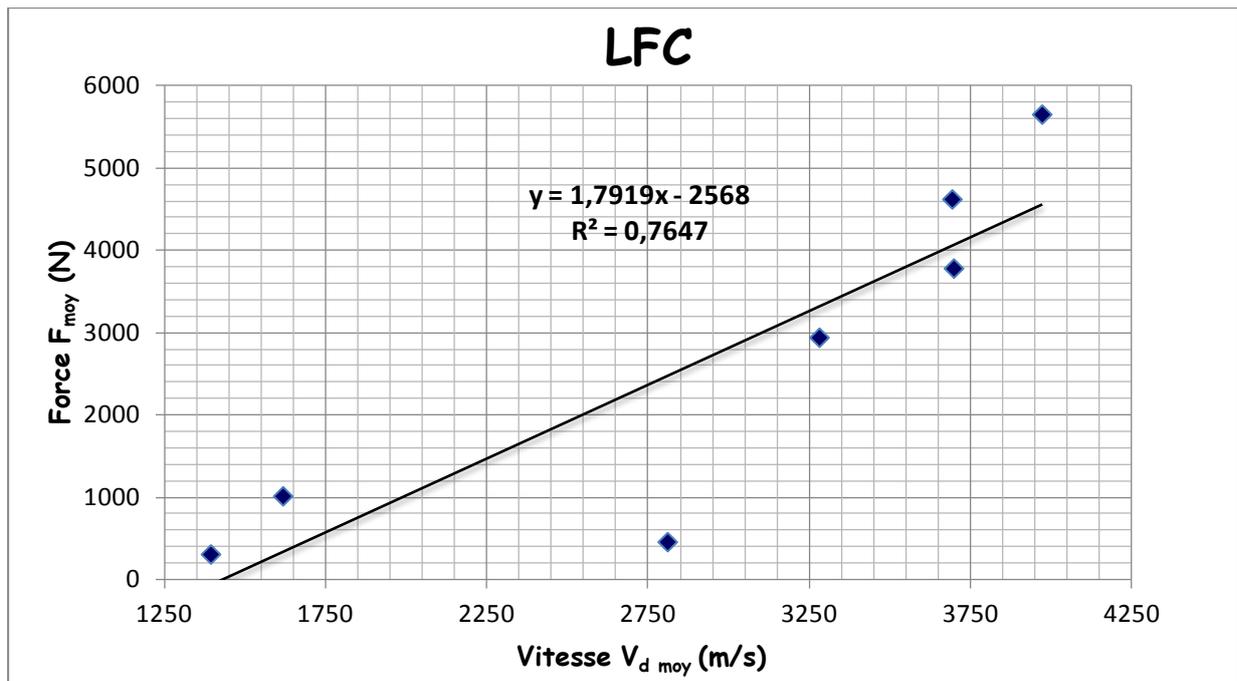
Cette partie de l'étude est consacrée à l'étude des relations entre les vitesses des ultrasons mesurées par la transmission semi-directe et les forces d'arrachement correspondantes.

#### III-4-1. Poutrelles réparées avec lamelles de fibres de carbone LFC

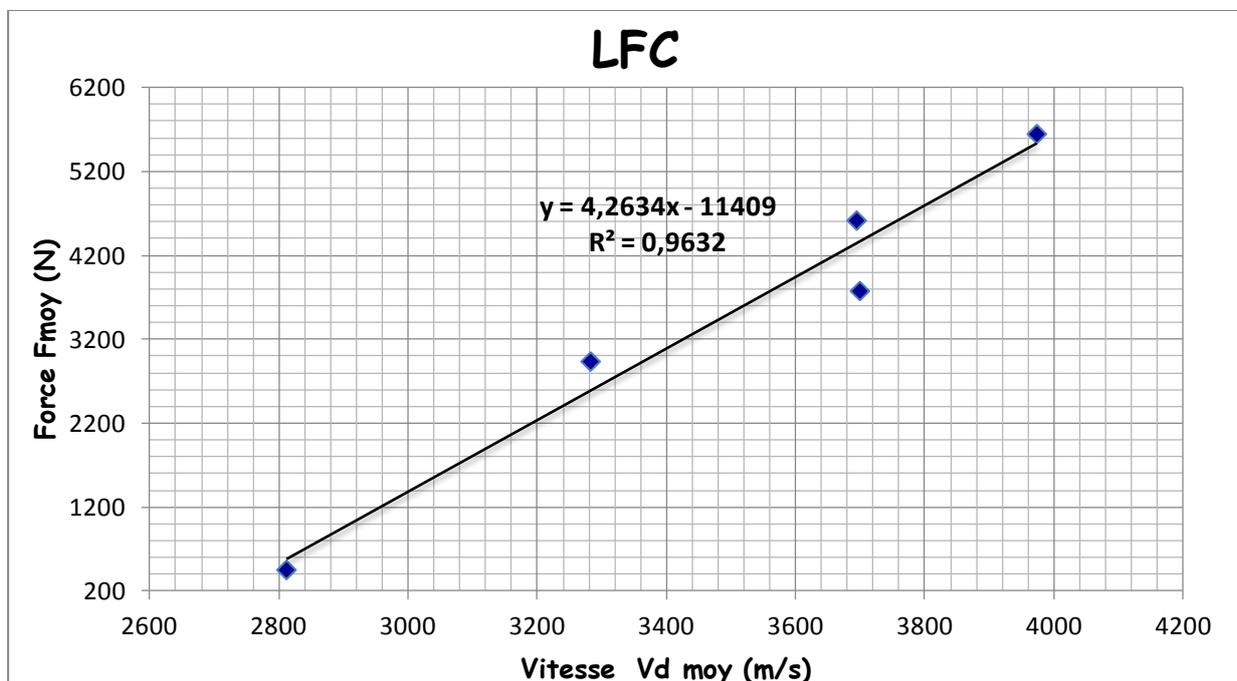
**Tableau III-11:** Vitesses des ultrasons et forces d'arrachement des poutrelles réparées avec LFC après rupture.

Poutrelles	Positions	1	2	3	4	5	6	7
P <sub>13</sub>	V <sub>d</sub> (m/s)	3596	1376	3186	3988	3633	720*	389*
	F (N)	3765	1000	1900	4096	4120	500*	3018*
P <sub>14</sub>	V <sub>d</sub> (m/s)	4081	3775	3633	3775	3915	2301*	4080*
	F (N)	3280	200	3700	6600	4960	200*	0*
P <sub>15</sub>	V <sub>d</sub> (m/s)	3422	3284	3031	4160	3536	1164*	387*
	F (N)	4275	150	3200	6233	4760	200*	0*
La force moyenne F <sub>moy.</sub> (N)		3773 ± 406	450 ± 389	2933 ± 759	5643 ± 1104	4613 ± 358	300* ± 141	1006* ± 1423
La vitesse moyenne V <sub>d moy.</sub> (m/s)		3700 ± 279	2812 ± 1035	3283 ± 255	3974 ± 157	3695 ± 161	1395* ± 666	1619* ± 1740

\* Ces valeurs correspondent aux décollements.



**Figure III.13:** Relation entre la vitesse  $V_{d moy}$  et la force d'arrachement  $F_{moy}$  pour les poutrelles répare par LFC.



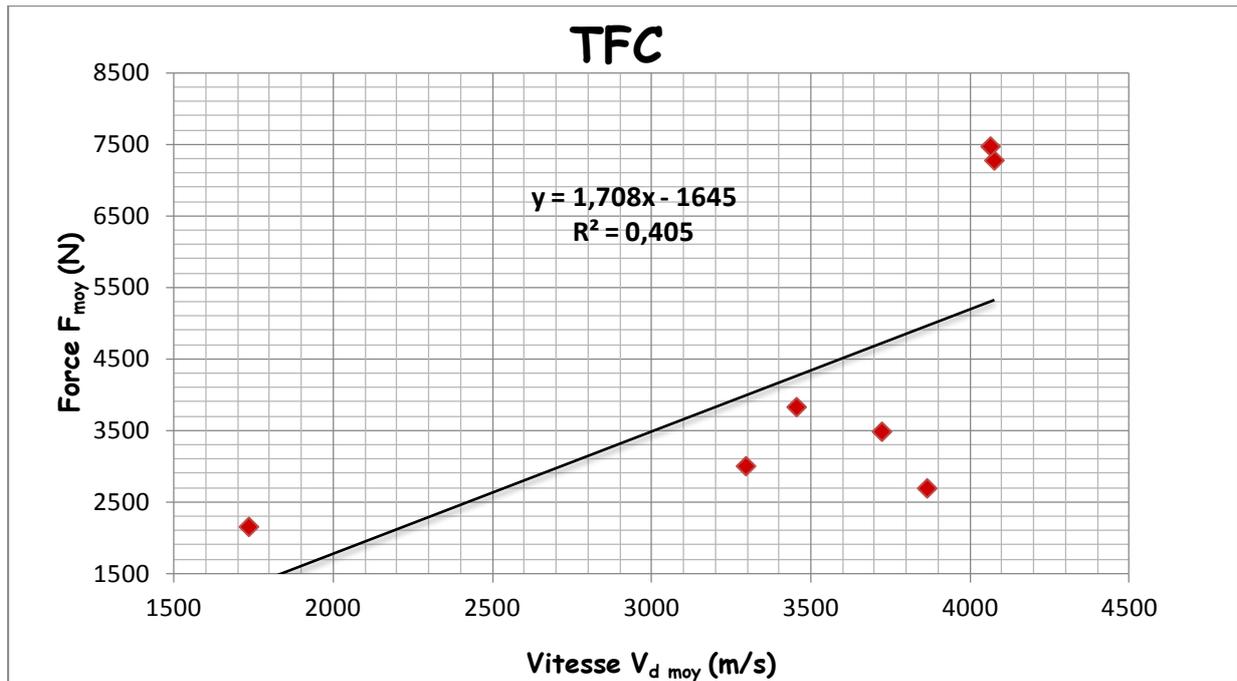
**Figure III.14:** Relation entre la vitesse  $V_{d moy}$  et la force d'arrachement  $F_{moy}$  pour les poutrelles répare par LFC pour les positions 1 ; 2 ; 3 ; 4 et 5.

### III-4-2. Poutrelles réparées par tissus de fibres de carbone TFC

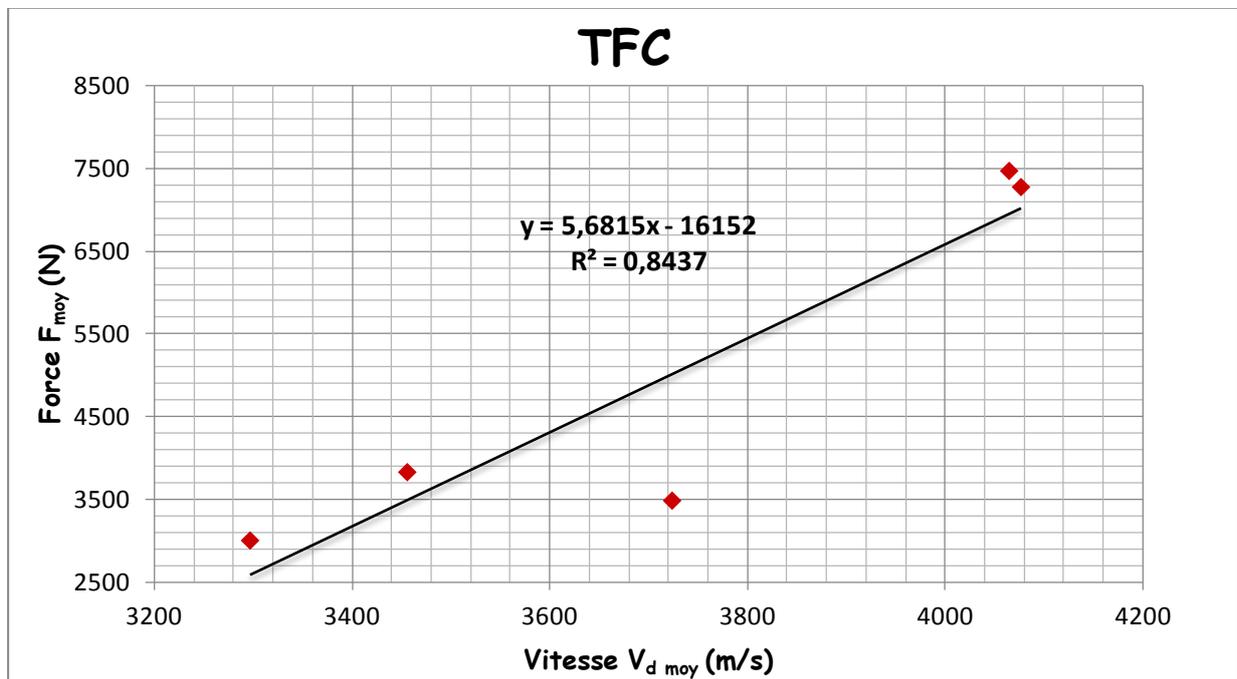
**Tableau III-12:** Vitesses des ultrasons et forces d'arrachement des poutrelles réparées avec TFC après rupture.

Poutrelles	Positions	1	2	3	4	5	6	7
P <sub>10</sub>	V <sub>d</sub> (m/s)	3958	3205	3411	3816	3167	1736*	4534
	F (N)	5150	4300	3500	3115	2620	600*	6210
P <sub>11</sub>	V <sub>d</sub> (m/s)	4160	3973	3215	3608	3886	3536*	3775
	F (N)	8820	500	985	2120	3182	642*	8780
P <sub>12</sub>	V <sub>d</sub> (m/s)	4112	4420	3264	3749	3315	1861*	3886
	F (N)	7833	3255	4500	5195	5660	5200*	7400
La force moyenne. F <sub>moy.</sub>		7268 ± 1551	2685 ± 1603	2995 ± 1479	3477 ± 1281	3821 ± 1320	2147* ± 2159	7463 ± 1050
La vitesse moyenne V <sub>d moy.</sub>		4077 ± 86	3866 ± 502	3297 ± 83	3724 ± 87	3456 ± 310	1736* ± 1042	4065 ± 335

\* Cette position coïncide avec un chemin de fissures dans les poutrelles.



**Figure III.15:** Relation entre la vitesse  $V_{d\ moy}$  et la force d'arrachement  $F_{moy}$  pour les poutrelles répare par TFC.



**Figure III.16:** Relation entre la vitesse  $V_{d\ moy}$  et la force d'arrachement  $F_{moy}$  pour les poutrelles répare par TFC pour les positions 1 ; 3 ; 4 ; 5 et 7.

On remarque que les forces d'arrachement évoluent proportionnellement aux vitesses des ultrasons dans les deux types de réparations et présentent des coefficients de proportionnalité similaires.

### III-4-3. Evolution de la relation vitesse des ultrasons « $V_d$ » -force aux d'arrachement « $F$ » différentes positions des poutrelles

Les figures suivantes montrent l'évolution des relations précédentes entre les vitesses des ultrasons en transmission semi-directe avant et après rupture ainsi que les forces d'arrachement correspondantes. On remarque les points singuliers correspondants aux décollements ou aux chemins de fissuration du béton.

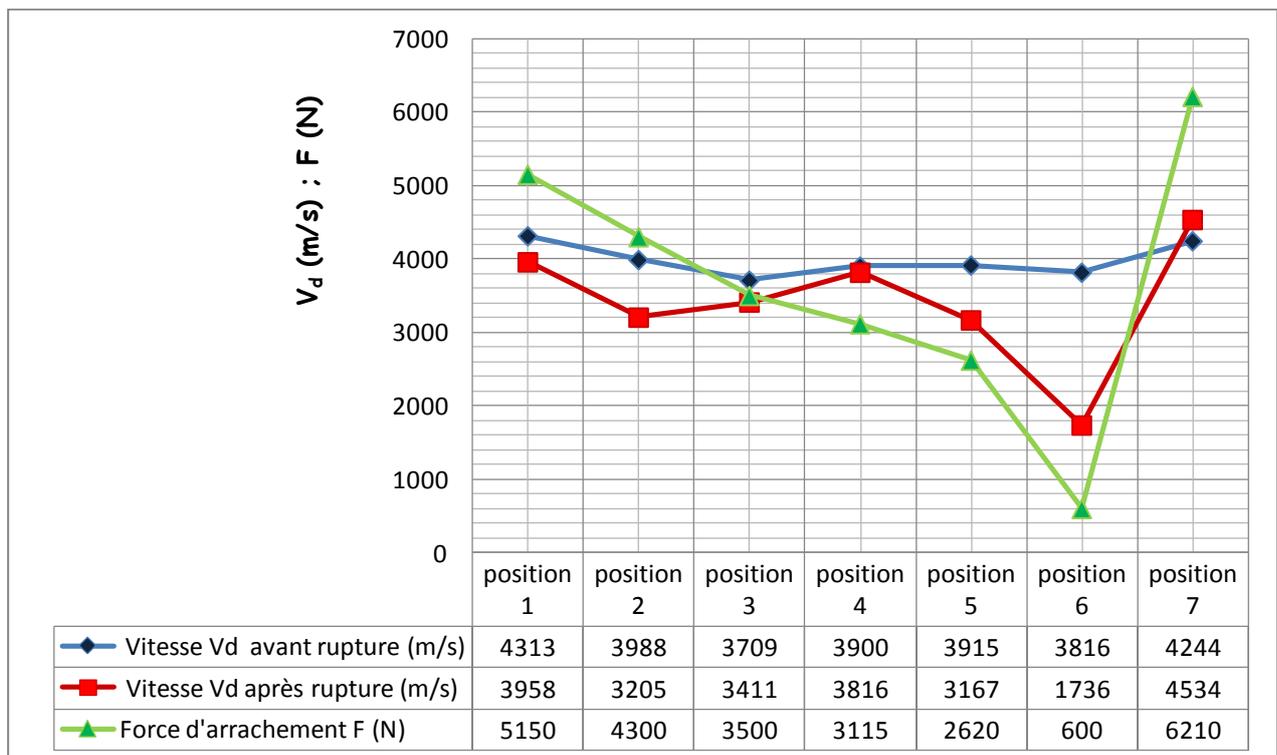


Figure III.17: Evolution de la relation  $V_d$ - $F$  de la poutrelle  $P_{10}$

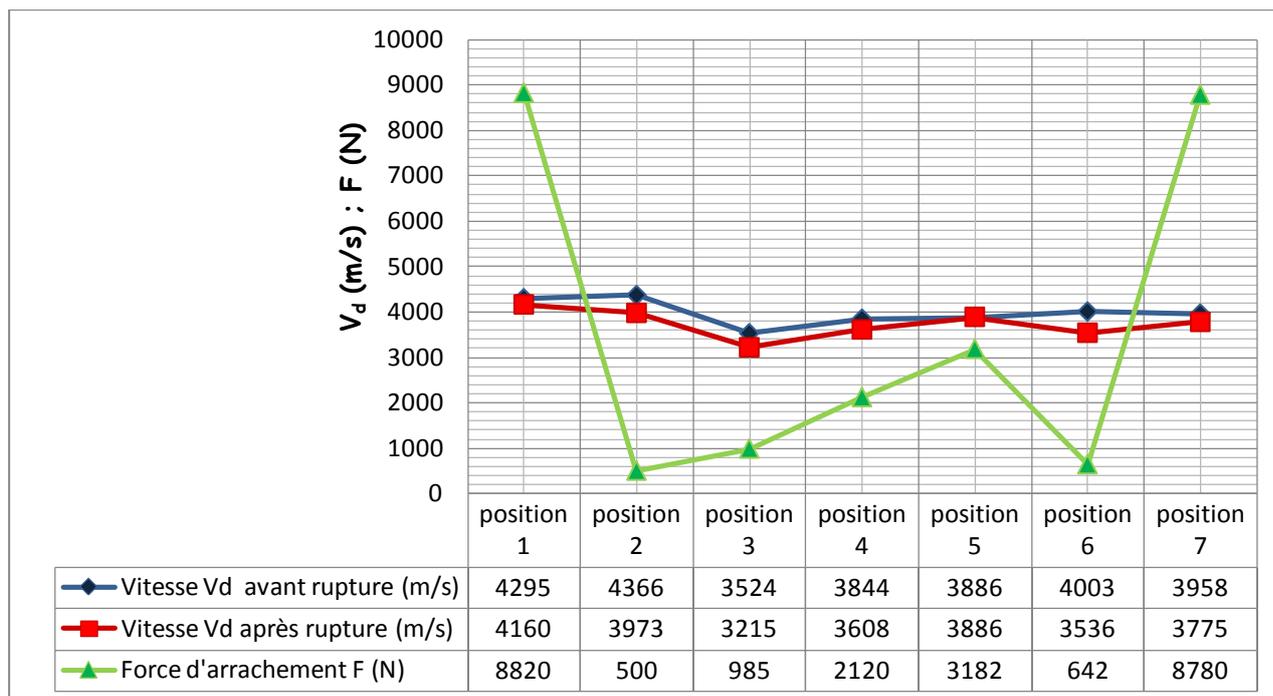


Figure III.18: Evolution de la relation  $V_d$ -F de la poutrelle P<sub>11</sub>.

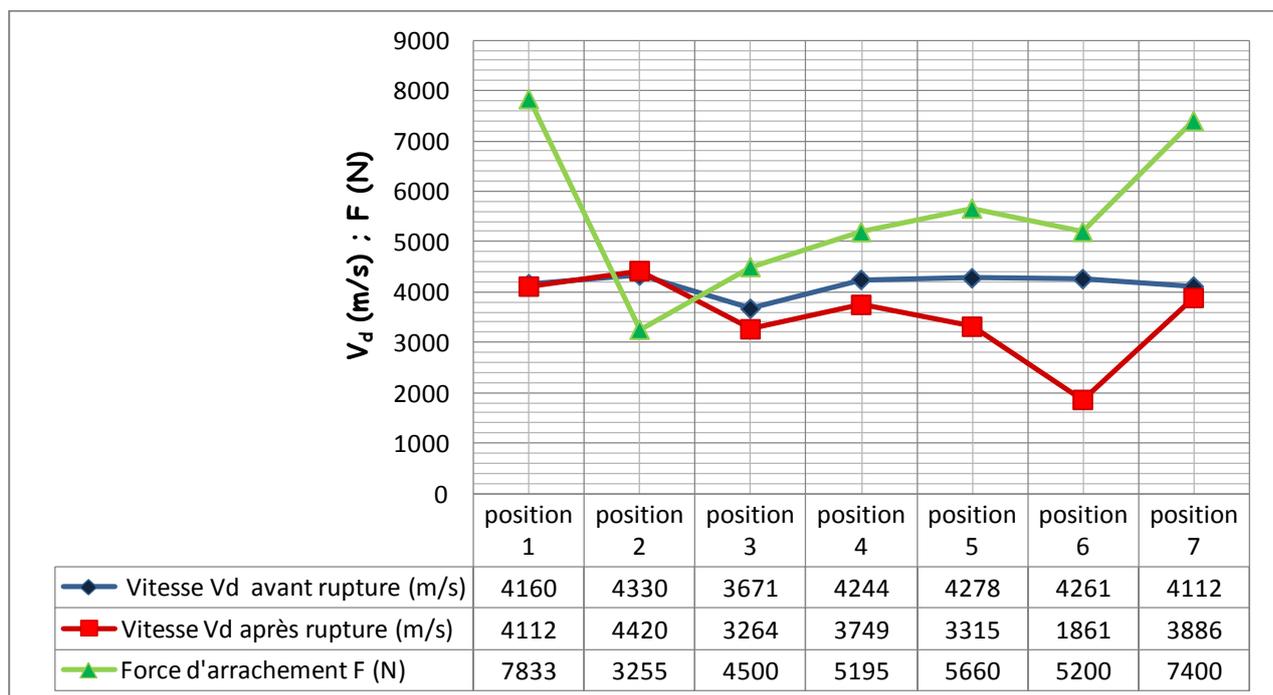


Figure III.19: Evolution de la relation  $V_d$ -F de la poutrelle P<sub>12</sub>.

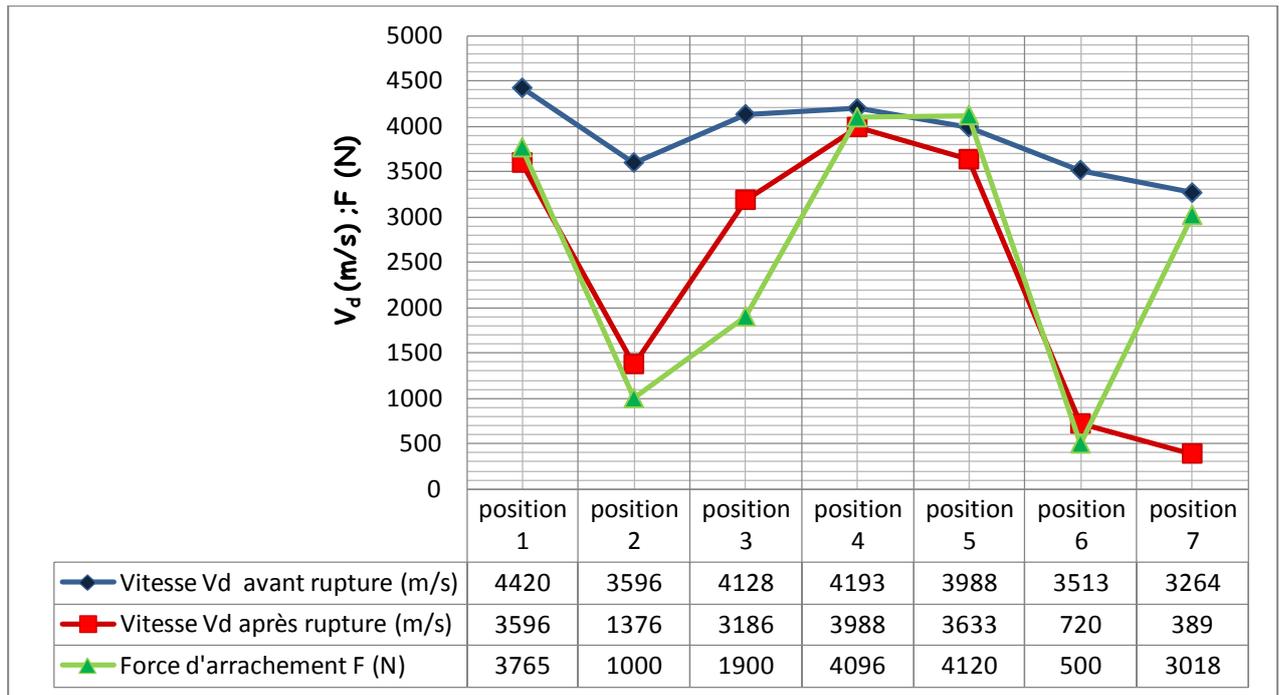


Figure III.20: Evolution de la relation  $V_d$ -F de la poutrelle P<sub>13</sub>.

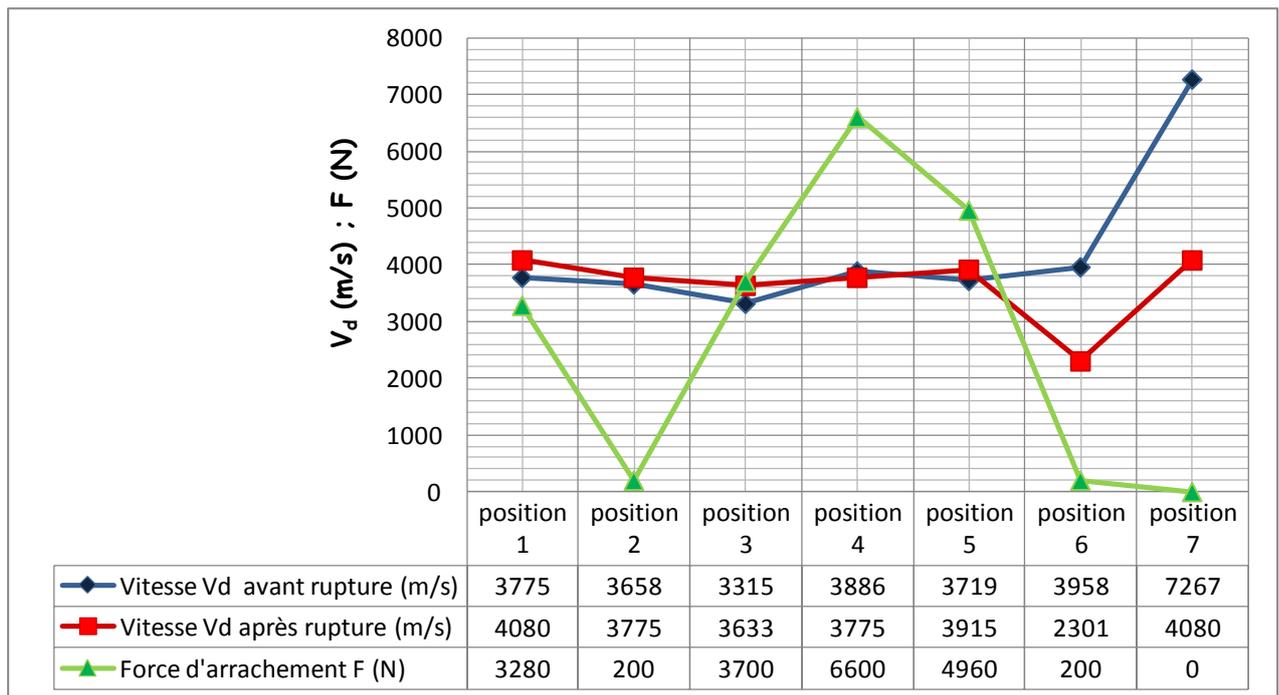
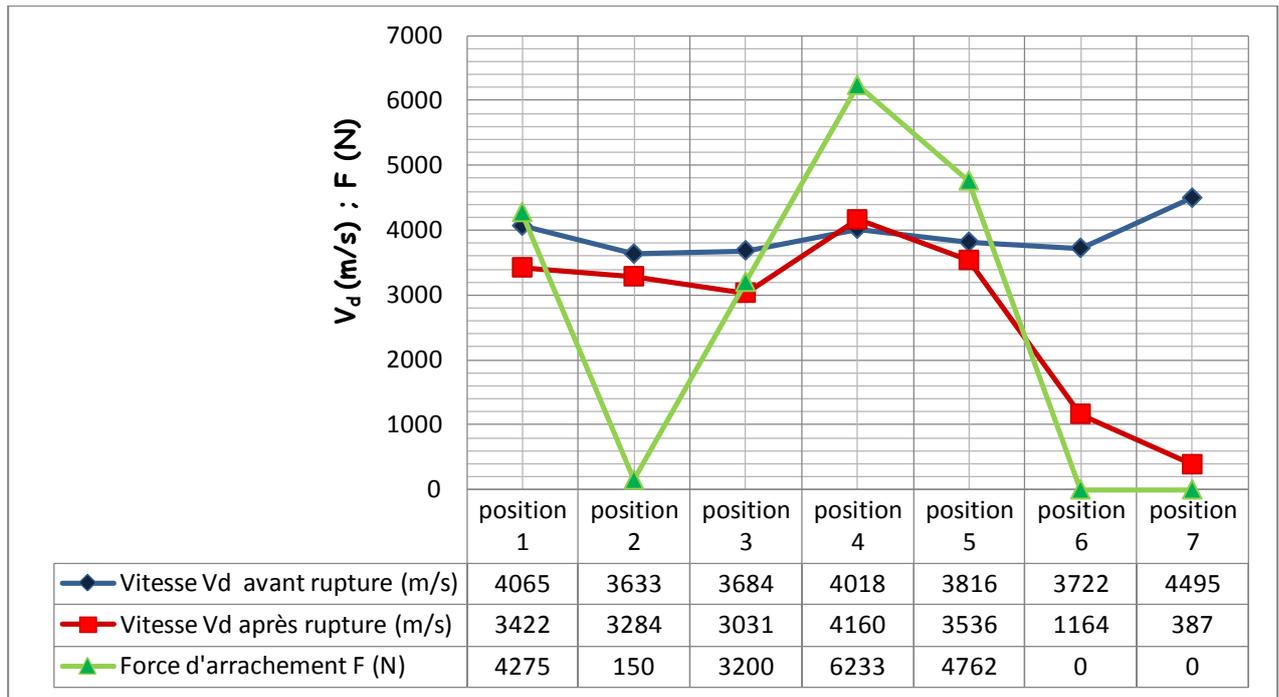


Figure III.21: Evolution de la relation  $V_d$ -F de la poutrelle P<sub>14</sub>.



**Figure III.22:** Evolution de la relation  $V_d$ -F de la poutrelle P<sub>15</sub>.

On remarque sur ces figures que les positions de faibles forces d'arrachement et vitesses ultrasoniques correspondent aux positions des appuis. Ce qui correspond à un endommagement des poutrelles par effort tranchant plus que par moment de flexion (voir figures III.23).



**Figure III.23:** Les différentes lignes de rupteur dans les poutrelles.

### **III-5. Conclusion :**

A travers l'étude de cette partie expérimentale, on remarque que les vitesses des ondes de surface et les ondes semi-directes, dans les poutrelles réparées avant rupture sont toujours supérieures à celles après rupture. Cette différence est causée par l'endommagement du béton pour la transmission semi-directe et l'état de l'interface du système de réparation dans la transmission de surface (indirecte). Cette chute des vitesses est plus importante dans les réparations par TFC que dans celles par LFC. D'autre part, les vitesses des ondes en transmission semi-directe (LFC et TFC) sont proches. Ce qui s'explique par le fait que le trajet des ondes dans la transmission semi-directe concerne beaucoup plus le béton que le système de réparation. Dans un autre contexte l'évolution des forces d'arrachement est similaire à celle des vitesses ultrasoniques. Ils évoluent proportionnellement aux vitesses des ultrasons dans les deux types de réparations et présentent des coefficients de proportionnalité similaires. Ces forces sont supérieures dans les poutrelles avec TFC à celles avec du LFC de plus de 62%. Il a été remarqué que la réparation par TFC a bien résisté aux sollicitations de chargement de flexion jusqu'à la rupture et qu'il n'a pas eu de délaminage entre le composite et le béton, contrairement aux réparations par LFC. On a aussi observé que les positions de faibles forces d'arrachement et de vitesses ultrasoniques correspondent aux positions des appuis. Ce qui correspond à un endommagement des poutrelles par effort tranchant plus que par moment de flexion et donc présence de fissures à travers le béton au niveau de ces positions.

**On peut donc conclure que la substitution des essais destructifs de caractérisation de la qualité des réparations (arrachement) par des essais non destructifs (ultrasons) est possible. La proposition de corrélations fiables reste tributaire d'une étude statistique plus riche (nombre d'éprouvettes, type de composite et qualité de l'interface).**

## **Conclusion générale :**

Dans le cadre de ce modeste travail nous avons voulu prospecter :

dans une première partie (étude bibliographique) les différentes dégradations et pathologies qui nuit à la durabilité des ouvrages en béton armée. Ces dernières peuvent être dus à des agents agressifs qui proviennent de l'environnement immédiat de l'ouvrage, de réactions internes dans les matériaux qui les composent ou de sollicitations d'exploitation. Il faut donc mettre un diagnostic complet avant de procéder aux réparations convenables et efficaces. Ces réparations se résument à des méthodes traditionnelles comme le chemisage en acier ou en béton, et d'autres nouvelles techniques comme le renforcement et la réparation par matériaux composites. Le choix des méthodes d'investigations pour vérifier ces réparations est une opération critique qui mène à un chemin à deux voies l'un des méthodes destructive et l'autre des méthodes non destructive, où la méthode d'évaluation par les ondes ultrasonores fait partie de ces techniques. Elle se base sur la propagation, l'atténuation et la diffusion des ondes acoustiques ultrasonores.

Et dans la deuxième partie de notre travail (partie expérimentale), on a procédé aux corrélations entre la méthode d'évaluation ultrasonique et la méthode d'arrachement. Les essais ont été réalisés au Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique de l'Université de Guelma (LGCH) et qui a concerné l'auscultation ultrasonique de deux types poutrelles réparées (Lamelles de Fibres de Carbone LFC et Tissus de Fibres de Carbone TFC) par deux modes de transmissions (surfactive et semi-direct). Ces auscultations (vitesses des ultrasons) ont été corrélées aux essais d'arrachement. Ces corrélations reflètent un diagnostic similaire par les deux méthodes et donc permettent la substitution de la méthode destructive (arrachement) par la méthode non destructive (ultrasons).

## Références bibliographiques

- [AGG.07] AGGILIS.D.G, SHIOTANI.T, "Experimental study of surface waves propagation in strongly heterogeneous media", *Acous. J.*, 122 (5), 2007.
- [AND.03] GARBACZ A., GARBOCZI. E.J., "Ultrasonic evaluation methods applicable to polymer concrete composites", rapport final de recherche, 2003.
- [ANU.01] ANUGONDA P., WIEHN. J. S. et TURNER. J. A , "Diffusion of ultrasound in concrete", *Ultrasonics*, 39 (6), pp. 429-435, 2001.
- [ARD.97] ARDUINI. M., NANNI A., "Behaviour of precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 1 ( 2), pp. 63-70, 1997.
- [AUS.99] AUSTIN S., ROBINS P., PAN Y., "Shear bond testing of concrete repairs", *Cement and Concrete Research*, 29 (1), pp. 1067-1076, 1999.
- [BAR.07] BARBIER V., GOURY P., "Mise au point d'une méthode de détection des défauts par ultrasons dans les tiges d'ancrages en acier allié ou faiblement allié ", *Recherche sur l'essai ultrasonique en construction métallique*, 2007.
- [BEN.09] BENOUIS A., GRINI A., "Relationship between ultrasonic velocity, mixtures and porosity of concretes (effect of transducers dimensions). NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering. Nantes, France, June 30th - July 3rd, 2009.
- [BEN.10] BENZAID.R, "Contribution à l'étude des matériaux composites dans le renforcement et la réparation des éléments structuraux linéaires en béton", Thèse de doctorat, Université mentouri Constantine, 2010.

**[BOD.11]** BODIAN P.A., "Propagation des Ultrasons en Milieu Hétérogène et Anisotrope"; Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon , 2011.

**[BOU.12]** BOUAKKAZ M.A., "Caractérisation du béton par les méthodes non destructives - application de la méthode de fréquence de résonance", Mémoire de magister, Université Aboubekr belkaid, Tlemcen 2012.

**[BRE.71]** BRESSON J., "Nouvelles recherches et applications concernant l'utilisation des collages dans les structures béton plaqué", Annales de l'ITBTP, série béton et béton armé, N° 278, février 1971.

**[BRE.92]** BREYSSE D., DELGRAVE A., GERRARD B., HORNAIN H. et MARCHAN J., "Etude du vieillissement d'origine chimique ou mécanique des matériaux à matrice cimentaires ", Note technique 1992 contrat LERM/EDF-Derny T20D47.

**[BUY.04]:** BUYUKOZTURK.O, GUNES.O et KARACA.E; "Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites"; Construction and Building Materials; Vol.18, pp. 9-19; 2004.

**[CAR.03]** CAROLIN A., "Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements", Doctorate Thesis, Lulea University of Technology, 178 p, 2003.

**[CHA.06]** CHAIX J.F., GARNIER V., CORNELOUP G., "Ultrasonic wave propagation in heterogeneous solid media : Theoretical analysis and experimental validation, Ultrasonics, 44 (3), pp. 200-210, 2006.

**[CHA.96]** CHAI. Y. H., PRIESTLEY M. J. N., SEIBLE F., "Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance", ACI Structural Journal, 88 (5), pp. 572-584, 1996.

**[CHE.08]** CHEKOUN M., "Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface", Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Nantes, 2008.

**[COG.04]** COGNARD J.G., "Science et technologie du collage", presses polytechniques et universitaires romandes, 2004.

**[EMM.94]** EMMOS P.E., "Concrete repair and illustrated PRT", Dunod, 1994

**[FEU.09]** FEUILLY N., "Etude de l'influence de la microstructure sur la diffusion ultrasonore en vue de l'amélioration du contrôle non-destructif des matériaux polycristallins", Thèse de doctorat Université de la Méditerranée, 2009.

**[FNI.06]:** FNINE A., "Auscultation de la peau du béton par ondes ultrasonores haute fréquence", Thèse de doctorat, Université de Lille, 2006.

**[FOL.45]** Foldy L., "The multiple scattering of waves", Phys. Rev, 67 (3-4), pp. 107-119, 1945.

**[FOO.01]** FOO S., NAUMOSKI N., SAATCIOGLU M., "Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinions d'atténuation des risques pour les immeubles canadiens", Bureau de la Protection des Infrastructures Essentielles et de la Protection Civil, Ministère des Travaux Publics et Service Gouvernementaux, 2001.

**[FUK.00]** FUKUYAMA H., SUGANO S., "Studies Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken-Nanbu Earthquake", Cement and Concrete Composites; 22 (1), pp. 59-79, 2000.

**[GHA.96]** GHOBARAH A., AZIZ T.S., BIDDAH A., "Seismic rehabilitation of reinforced concrete beam-column connections", Earthquake Spectra, 12 (4), pp. 761-780, 1996.

**[GOE.80]** GOEBBELS K., "Structure Analysis by Scattering Ultrasonic Radiation", In: R.S. SHARPE. Research Techniques in Nondestructive Testing, chapter 4; New York: Academic Press; New York; chapter 4, pp. 87-157 1980.

**[GOU.04]** GOUEYGOU M., PIWAKOWSKI B., "Radiation of surface waves into concrete by means of a wedge transducer : design and optimization", Electronics & Acoustics Group, 2004.

**[HAM.02]** HAMELIN P., "Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites", AM 5 615, Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites, Vol. AM 6; 2002.

**[HAU.99]** HAU K.M., "Experiments on concrete beams strengthened by bonding fibre reinforced plastic sheets", Master of Science in Civil Engineering Thesis, the Hong Kong Polytechnic University, 1999.

**[HOL.99]** HOLLAWAY L.C., LEEMING M. B., "Strengthening of reinforced concrete structures", Wood head publishing limited, Cambridge, 1999.

**[LAB.11]** LABIDI N., "Contribution au diagnostic des renforcements minces des bétons par les ultrasons", Mémoire de magister, Université de Guelma, 2011.

**[LAM.97]** LAMBERT A., PRALUS Y., RIVENEZ J., "Propagation des ondes ultrasonores", Niveau 2, Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM), 1997.

**[LAN.94]** LANGLOIS M. et al., "Durability of pavement repairs : a field experiment"; Concrete International, 16 (8) pp. 39-43, 1994.

**[LAN.95]** LANDIS E.N., SHAH S.P., "Frequency-dependent stress wave attenuation in cement-based materials", J. Eng. Mech., ASCE, 121(6), pp. 737-743, 1995.

**[LCPC.08]** LCPC, L'apport de la thermographie infrarouge pour la détection des défauts de collage, CETE de Lyon, France, 2008.

**[LUY.99]:** LUYCKX J., "Composites à fibres de carbone dans le génie civil", Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites, AM 5 620, 1999.

**[MAM.05]** MAMOU V., "Caractérisation ultrasonore d'échantillons hétérogènes multiplement diffuseurs", Thèse de doctorat, Université de Paris 7, 2005.

**[MED.13]** MEDFOUNI I.M.B., "Etude par mesures non-destructives de l'endommagement in-situ du béton associé à l'oxydation des sulfures de fer présents dans les granulats", Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 2013.

**[MON.03]** MONTI G., "Seismic upgrade of reinforced concrete columns with FRP", Technical report, Teheran, 22 July 2003, 29 p, 2003.

**[MUK.98]** MUKHOPADHYA P., SWAMY N., LYNSDALE C., "Optimizing structural response of beams strengthened with GFRP plates", Journal of Composites for Construction, ASCE, 2 (2), pp. 87-95, 1998.

**[NEV.92]** NEVILLE A.M., "Propriétés des bétons", Eyrolles, p. 805, 1992.

**[NIC.08]** NICOT P., "Interactions mortier-support : éléments déterminants des performances et de l'adhérence d'un mortier", Thèse doctorat, Université de Toulouse, 2008.

**[OHD.00]** OHDAIRA E., MASUYAMA N., "Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete", Ultrasonic, 38, pp. 546-552, 2000.

**[OUL.02]** OULED-NAFFA S., GOUEYGOU M., PIWAKOWSKI B., BUYLE-BODIN F., "Detection of chemical damage in concrete using ultrasound". Ultrasonics, 40, pp. 247-251, 2002.

**[OWI.99]** OWINO J.O., JACOBS L.J., "Attenuation measurements in cement-based materials using laser", *Ultrasonics Eng. Mech., ASCE*, 125(6), pp. 637-647, 1999.

**[PAN.00]** PANTELIDIS .C.P., CLYDE C. et REAVALEY L.D., "Rehabilitation of RC building joints with FRP composites", 12th World Conference of Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.

**[PER.93]** PERDIJON J., "Le contrôle non destructif par ultrasons", *Traité des Nouvelles Technologies, Série Mécanique*, Hermes, 1993.

**[PHI-05]** PHILIPPIDIS T.P., AGGELIS D.G., "Experimental study of waves dispersion and attenuation in concrete", *Ultrasonics*; 43,pp. 584-595, 2005.

**[PIW.04]** PIWAKOWSKI B., FININE A., GOUEYGOU M., BUYLE-BODIN F. "Generation of Rayleigh waves into mortar and concrete samples", *Ultrasonics*, 42, pp. 395-402 2004.

**[PRI.94a]** PRIESTLEY M.J.N., SEIBLE F., XIAO.Y, VERMA R., "Steel jacket retrofitting of reinforced concrete bridge columns for enhanced shear strength - Part I: Theoretical considerations and test design", *ACI Structural Journal*, 91 (4), pp. 394-405, 1994.

**[PRI.94b]** PRIESTLEY M.J.N., SEIBLE F., XIAO Y., VERMA.R; "Steel jacket retrofitting of reinforced concrete bridge columns for enhanced shear strength- Part II: Test results and comparison with theory", *ACI Structural Journal*, 91 (5), pp. 537-551, 1994.

**[PRI.96]** PRIESTLEY M.J.N., SEIBLE F., CALVI G.M., "Seismic design and retrofit of bridges", John Willey & Sons, Inc, New York, USA, 686 p, 1996.

[PUN.06] PUNURI W., JARZYNKI J., QU J., KURTIS K.E., JACOB L.J., "Characterisation of entrained air voids in cement paste with scattered ultrasound", *NDT & E Int.*, 39, pp. 514-524, 2006.

[QUI.12] QUIVIGER A., "Ultrasons diffus pour la caractérisation d'une fissure dans le béton : Approche linéaire et non linéaire", Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille, 2012.

[RIN.09] RINCKER V., "Diagnostic de structures existantes"; INSA STRASBOURG ;2009.

[ROU.14] ROUAISSIA Y., "Optimisation des interfaces collés dans les réparations par composites", doctorat en cours, Université de Guelma, 2014.

[ROY.96] ROYER D., DIEULESAINT E., "Ondes élastiques dans les solides", Tome 1: Propagation libre et guidée, Masson, 1996.

[SAA.00] SAATCIOGLU M., YALCIN C., MES D., BEAUSEJOUR P., "Seismic retrofit of concrete columns by external prestressing", Research report of OCEERC, Earthquake Engineering Research Centre d'Ottawa-Carleton, UniversitéD'Ottawa, Canada, 2000.

[SMI.02] SMITH S.T., TENG J.G., "FRP-strengthening RC beams", *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 385-395, 2002.

[SPA.98] SPADEA G., BENCHARDINO F., et SWAMY R.N., "Structural behaviour of composite RC beams with externally bonded CFRP", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2 (3), pp. 132-137, 1998.

[STE.96] STEINER W., "Strengthening of structures with FRP strips" In: EI-Badry, M.M. (Ed.), *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Canadian Society for Civil Engineering; Montreal, pp. 407-417, 1996.

[TEM.10] TIMBO A., "Contrôle non destructif des ouvrages en béton par les ultrasons", mémoire de master, Université de Guelma, 2010.

[TEN.02] TENG J.G., CHEN J.F., SMITH S.T., LAM L., "FRP strengthened RC structures", John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 245 p, 2002.

[TEN.03] TENG J.G., SMITH S.T., YAO J., CHEN J.F., "Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs", *Construction and Building Materials*, 17, pp. 447-462, 2003.

[THE.97] THEILLOUT J.N., "Renforcement des structures à l'aide de plats métalliques collés", In: CALGARO.J.A et LACROIX.R : *Maintenance et Réparation des Ponts*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 666 p, 1997.

[TOU.10] TOUKL A., "Influence des taux de chargement sur la caractérisation non destructive du béton par ultrasons", mémoire de magistère, Université de Boumerdes, 2010.

[TRU.99] TRUNK B., SCHOBER G., HELBLING A.K., WITTMANN H., "Fracture mechanics parameters of autoclaved aerated concrete", *Cement and concrete Research*, 29, pp 855-859 1999.

[TUR.04] TURGUT P., "Evaluation of the Ultrasonic Pulse Velocity Data Coming on Field", 4<sup>th</sup> International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, 2004.

[VIZ.00] VIZUETE J. M., "Techniques et systèmes de renfort des structures en béton", *Proceedings of The Third ST Workshop, Session IV : Technology 2*, Chamonix, 25-28 January 2000, edited by LAEGER H. and PRODON S., pp.151-158, 2000.

## **Netographie:**

[Site.1]: [www.fra.sika.com/](http://www.fra.sika.com/) consulté le 13 Mars 2014.

[Site.2]: [www.freyssinet.fr/](http://www.freyssinet.fr/) consulté le 23 Mars 2014.

[Site.3]: [www.mtq.gouv.qc.ca/](http://www.mtq.gouv.qc.ca/) consulté le 10 Avril 2014.

## Références normatives

**[N-1]:** XP P 18-540 : Granulats, définitions, conformité, spécifications; octobre 1997.

**[N-2]:** NF p18-303 : Béton, eau de gâchage, classification, contrôle, essai, essai chimique, dosage, chlorure, temps de prise, échantillonnage, essai de conformité ; mai 1941.

**[N-3]:** CSA A23.2-4C: détermination de la teneur en air du béton plastique par la méthode de pression d'air.

**[N-4]:** NF EN 201-6(P18-325) "Béton - Partie 1: Spécification, Performances, Production et conformité, AFNOR (aout 2002).

**[N-5]:** NF EN 1324. Colles à carrelage. Détermination de l'adhérence par cisaillement d'un adhésif en dispersion, AFNOR (1998).

**[N-6]:** BS 6319: Part 4. Slant shears test method for evaluating bond strength of epoxy systems, BSI, Londres, 1984.

**[N-7]:** NF EN 12504-3 (IDC P 18-446) - Essais pour béton dans les structures - Partie 3 : détermination de la force d'arrachement ; Juin 2005.

**[N-8]:** NFT 76-114 : Adhésifs - Détermination de la résistance au fendage par coin ; AFNOR (1999).

**[N-9]:** NFT 76-112 : Adhésifs - Détermination de la résistance au pelage des assemblages - Méthode des galets mobiles ; avril 2010.

**[N-10]:** NFT 76-126 : Méthode d'essais d'adhésifs pou revêtements de sols et muraux, Essai de pelage ; septembre1987.

**[N-11]:** NFT 76-115 Adhésifs - Détermination de la résistance des adhésifs par l'essai de Wedge test, AFNOR (1998).

**[N-12]:** NF-EN-12504-4. Essais pour les bétons dans les structures-partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son, AFNOR (2005).

**[N-13]:** AFNOR Recueil de normes français, béton et ciment courant, paris 1978.

**[N-14]:** NF P18-597: Granulats - détermination de la propreté des sables-équivalent de sable à 10% de fines. (déc. 1990), AFNOR.

**[N-15]:** NF EN 933-2: essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats-partie 2: détermination de la granularité -tamis de contrôle. (mai 1996), AFNOR.