

تقرير عام لمشروع البحث
Rapport général du projet PNR

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المديرية العامة للبحث العلمي و التطوير التكنولوجي
Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique

I-Identification du projet:

-التعريف بالمشروع

PNR

Habitat, Construction et Urbanisme -16-

Organisme pilote

CNERIB

Domiciliation du projet :

Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique LGCH Université 8 mai 1945 Guelma

Intitulé du projet

عنوان المشروع

Diagnostic des réparations minces des ouvrages en béton par les ultrasons

Chercheurs impliqués dans le projet

أعضاء المشروع و المؤسسة المستخدمة

Nom et prénom الاسم و اللقب	Grade الرتبة	Etablissement employeur المؤسسة المستخدمة	Observation
BENOUIS Abdelhalim	Pr.	Université 8 mai 1945 – Guelma-	Chef de projet
BOUABID Mohamed Fawzi	Chef d'agence	CTC-EST Mila	(anciennement Souk Ahras)
BENMALEK Mohamed Larbi	Pr.	Université 8 mai 1945 – Guelma-	-----
CHERAIT Yacine	MC-A-	Université 8 mai 1945 – Guelma-	-----
NAFA Zahredinne	MC-A-	Université 8 mai 1945 – Guelma-	-----
LABIDI Nabil	Doctorant	Université 8 mai 1945 – Guelma-	-----

Déroulement du projet :

Rappeler brièvement les objectifs du projet et les tâches prévues

تذكير مختصر بأهداف المشروع و المهام المسطرة :

- Rappel des objectifs du projet

Une mauvaise durabilité de la réparation ou du renforcement peut prendre la forme d'une baisse d'adhérence, d'un délaminage ou encore de fissuration dans le matériau de réparation.

La fabrication d'une réparation (ou d'un renforcement) durable et efficace repose sur une sélection appropriée des matériaux et sur leur utilisation selon les règles de l'art. Le choix des matériaux n'est cependant pas la seule étape importante de ce processus. Il faut aussi porter une attention particulière à la préparation des surfaces, aux techniques d'application et de mûrissement et **au contrôle de la qualité de la réparation ou du renforcement**.

Ce travail de recherche porte sur l'utilisation d'une technique non destructive pour diagnostiquer la qualité de ces opérations. Cette méthode repose sur la réflexion des ondes ultrasoniques pour déterminer les propriétés de l'interface entre le béton d'origine et le matériau de réparation ou du renforcement. Il s'agit de mesurer les vitesses et les atténuations des ondes ultrasoniques et de les corrélater aux essais destructifs (essais d'arrachement) dans le but de mettre au point une méthodologie rapide et efficace de la qualification des réparations et des renforcements minces.

- Rappel des tâches prévues

- 1) Mise au point du programme expérimental.
- 2) Formulation des bétons à réparer et de réparation.
- 3) Essais de caractérisations des matériaux (béton à réparer, béton de réparation, matériaux composites).
- 4) Confection des corps d'épreuve (éprouvettes).
- 5) Etude de sensibilité des ondes ultrasoniques de surface à la maturation du béton
- 6) Réalisation des essais ultrasoniques (variation de la position et de la fréquence des transducteurs) différentes poutrelles.
- 7) Traitement des résultats des ultrasons et confrontation aux résultats de la littérature.
- 8) Réalisation des essais d'arrachement sur les mêmes éprouvettes ayant servis aux essais non destructifs (ultrasons).
- 9) Quantification de l'adhérence des poutres réparées comparativement aux poutres non réparées.
- 10) Essais de flexion sur les poutrelles témoins.
- 11) Corrélations entre les résistances de l'adhérence, les vitesses des ultrasons et les atténuations de l'amplitude du signal..
- 12) Etude de sensibilité de ces corrélations aux différents paramètres (nature de la réparation, qualité de réparation, fréquence des ultrasons, densité du ferrailage).
- 13) Validation des résultats obtenus.
- 14) Proposition d'une méthodologie de caractérisation non destructive par les ultrasons et sa validation.

**RAPPORT D'ACTIVITÉ (Veuillez expliquer les activités que vous avez mené dans le cadre du projet et les résultats auxquels vous êtes parvenu)
40 pages minimum**

حصيلة النشاط (يرجى شرح و توضيح النشاطات و الأعمال التي قمتم بها) 40 صفحة على الأقل

Rapport scientifique détaillé du projet (rédaction libre selon la nature du projet tout en respectant le plan suivant) :

الحصيلة العلمية المفصلة للمشروع (يتم تدوين الأعمال و النشاطات التي قمتم بها بشكل حر حسب طبيعة مشروعكم مع مراعاة المخطط الآتي) :

- Page de garde - الواجهة
- Table de matières avec les titres des chapitres et des sections ainsi que les numéros de page
- الفهرس
- Introduction. - المدخل (يراعى فيه التذكير بالإشكالية و أهداف المشروع و المهام (الجانب النظري و التطبيقي)
(Contenu du travail (théorie et Expérimentation)-المسطرة...)
- محتوى انجاز المشروع
- Conclusions - الخاتمة و خلاصة النتائج
- Bibliographie - المراجع
- Annexes - الملاحق
- Information financière - معلومات مالية

Veuillez inscrire vos revenus et vos dépenses dans le tableau De la nomenclature des dépenses.
يرجى القيام بتدوين صرف النفقات حسب جدول مدونة النفقات

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي الجمهورية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المديرية العامة للبحث العلمي و التطوير التكنولوجي
Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique



RAPPORT FINAL DU PROJET PNR

Diagnostic des réparations minces des ouvrages en béton par les ultrasons

Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique
Université 8 mai 1945 Guelma

2013

TABLE DE MATIERES

Introduction -----	07
Objectif -----	07
Présentation de l'étude -----	07
PARTIE 1 – Etude bibliographique -----	08
PREMIER CHAPITRE : PATHOLOGIES ET DURABILITE DES OUVRAGES EN BETON	
I.1. Introduction -----	08
I.2. Principales causes de désordres affectant les ouvrages en béton -----	08
I.2.1. Dégradation des matériaux -----	09
I.2.2. Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution -----	10
I.2.3. Modification des conditions d'exploitation ou d'utilisation des ouvrages -----	10
DEUXIEME CHAPITRE - LES MATERIAUX COMPOSITES DANS LE GENIE CIVIL -----	11
II.1. Les polymères dans le génie civil -----	11
II.1.1. Définitions -----	11
II.2. Durabilité -----	12
IV.3. Le collage en milieu poreux : cas du béton. -----	13
IV.4. Caractérisation de l'adhérence -----	14
IV.4.1. Modes de rupture -----	14
TROISIEME CHAPITRE : CONTROLE NON DESTRUCTIF DES MATERIAUX DE STRUCTURE -----	16
III.1. Intérêt du Contrôle Non-Destructif (CND) -----	16
III.1.1. CND des matériaux composites -----	16
III.1.2. Essai non destructif de la qualité du béton -----	16
III.2. Les techniques de CND -----	16
III.2.1. Les techniques ultrasonores -----	
CONCLUSION -----	17
PARTIE 2 – Etude Expérimentale -----	18
PREMIER CHAPITRE : PRESENTATION DES METHODES DE CONTROLE UTILISEES --	18
I.1. Auscultation ultrasonique -----	18
I.1.1. Principe de base -----	18
I.2. Oscilloscope numérique -----	21
I.3. Dynamomètre de traction -----	21
I.3.1. Principe de l'essai d'arrachement -----	21

DEUXIEME CHAPITRE : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODOLOGIE EXPERIMENTALE -----	23
II.1. Caractéristiques des matériaux -----	23
II.2. Méthodologie expérimentale -----	23
TROISIEME CHAPITRE : INTERPRETATION ET EXPLOITATION DES RESULTATS -27	
III.1. Introduction -----	27
III.2. Essais non destructifs -----	27
III.2.1. Eprouvettes témoins -----	27
III.2.2. Eprouvettes renforcées avec lamelles de fibres de carbone LFC -----	31
III.2.3. Eprouvettes renforcées par tissus de fibres de carbone TFC -----	37
III.2.4. Eprouvettes renforcées par du béton-----	40
III.2.5. Eprouvettes renforcées par tissus de fibres de verre TFV -----	43
III.3. Essais destructifs -----	46
III.4. Relations entre la vitesse des ultrasons et la force d'arrachement-----	47
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES -----	49
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -----	49

i-Introduction

L'étude des pathologies des ouvrages en béton met en évidence l'existence de désordres induits par la dégradation des matériaux. On constate ainsi une altération mécanique et physicochimique des bétons et des armatures métalliques. Les mécanismes de dégradation se traduisent par des fissurations excessives du béton, par des pertes de caractéristiques des armatures corrodées et donc par une diminution des propriétés mécaniques.

Afin de pallier les pertes de résistance mécanique des ouvrages, il est devenu nécessaire d'effectuer des réparations. Les progrès réalisés ces dernières années dans la formulation des produits organiques de synthèse permettent d'envisager l'utilisation du collage de matériaux composites. L'intérêt des solutions composites réside principalement dans les performances de tenue à la corrosion des polymères, à leur facilité de pose et de formage sur les structures à réhabiliter ainsi que dans les propriétés mécaniques spécifiques des fibres qui leur sont associées.

Il est donc important de pouvoir mesurer la qualité des réparations (ou des renforcements). La méthode standard utilisée pour tester l'adhérence entre le produit de réparation (ou de renforcement) et le béton d'origine consiste à attendre plusieurs semaines que la réparation soit entièrement prise, à coller un cylindre d'essai sur la surface, puis à mesurer la force nécessaire pour retirer le matériau au composite de réparation du substrat en béton. Cette méthode est longue et coûteuse. Il n'est donc pas étonnant, étant donné la difficulté de ce processus, que les réparations (ou les renforcements) ne sont pas toujours correctement vérifiées.

ii-Objectif

L'objectif de ce travail est l'utilisation de la technique ultrasonore pour mesurer la qualité des renforcements et 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.

iii-Présentation de l'étude

Cette étude est composée de deux parties, en plus de l'introduction et de l'objectif :

- **LA PREMIERE PARTIE:** est une étude bibliographique qui s'intéresse aux pathologies bétons, aux matériaux composites dans le génie civil et au contrôle non destructif des matériaux de structure.

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

- présentation des méthodes de contrôle utilisées,
- caractéristiques des matériaux utilisés et méthodologie expérimentale ,
- interprétation et exploitation des résultats des essais.

PREMIER PARTIE - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : PATHOLOGIES ET DURABILITE DES OUVRAGES EN BETON

I - 1 Introduction

La durabilité des ouvrages fait partie des nouvelles exigences des maîtres d'ouvrages. Le diagnostic et la rénovation occupent une part sans cesse croissante des activités du secteur de la construction, ils représentent l'actuelle orientation permettant la préservation des ouvrages.

Etablir un diagnostic nécessite une forte expérience et une approche pluridisciplinaire dans les domaines du contrôle et de la pathologie des matériaux.

I - 2 Principales causes de désordres affectant les ouvrages en béton

I - 2- 1 Dégradation des matériaux

Les propriétés physiques et, plus particulièrement, le comportement mécanique du béton et des aciers sont susceptibles de se dégrader en fonction des conditions d'environnement définies par la localisation géographique de l'ouvrage. Les principales causes de vieillissement sont liées aux phénomènes : Érosion, abrasion, chocs, action des cycles de gel-dégel, Action des sels de déverglaçage, Retrait du béton...

I - 2- 1-1 La carbonatation [9]

La carbonatation du béton est due à l'action de l'acide carbonique CO_2 (dioxyde de carbone) qui se trouve dans l'atmosphère (en faible quantité environ 0.05 %) sur la chaux (contenu dans le ciment) libérée par l'hydratation des carbonates de calcium CaCO_3 :



Cette carbonatation qui progresse dans le béton à partir des faces en contact avec l'atmosphère fait baisser le ph de la solution interstitielle dans la pâte durcie de ciment portland d'une valeur de l'ordre de 12.6 à 13.5 à une valeur d'environ 9 neutralisant ainsi progressivement l'alcalinité du béton et son rôle (passivant) sur les armatures qui, n'étant plus protégées, se corrodent.

La carbonatation commence donc à la surface du béton et concerne une certaine épaisseur (dite profondeur de carbonatation) de ce matériau, ses effets sont importants.

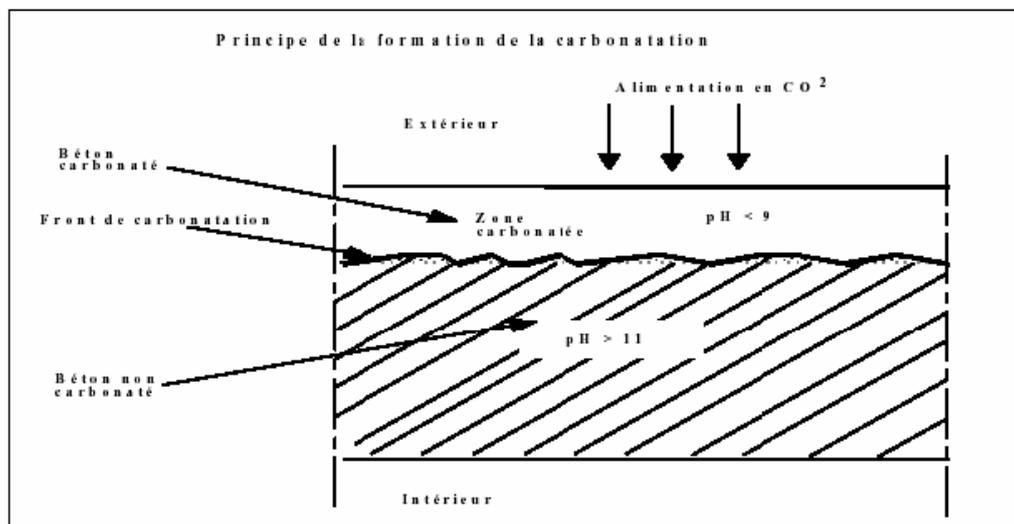


Figure I.3. Coupe théorique d'un mur en béton dégradé par la carbonatation [1]

I - 2- 1-1 -1 Conséquences

Les armatures métalliques incorporées au béton à une distance inférieure à 25 mm de la surface se trouveront, dans les conditions habituelles de construction, soumises à la corrosion. Lors de sa formation, la rouille foisonne et fait éclater l'épiderme du béton du même coup le front de carbonatation.

I - 2- 1- 2 Attaque du béton par des sulfates [2]

Les eaux souterraines contiennent parfois des sulfates en solution (les eaux séléniteuses contiennent du sulfate de calcium) ; un gonflement peut alors être occasionné, si la teneur en sulfate atteint une certaine concentration ; l'alumine tricalcique, et le sulfate se combinent pour donner un trisulfate « etringite » hydrate qui constitue un gel gonflant par suite de fixation d'un grand nombre de molécules d'eau. Les ciments qui résistent le mieux aux sulfates sont donc ceux qui contiennent de l'aluminate tricalcique comme le CEMI ES ou CEMII-A et B ES ainsi que les ciment très chargés en laitier (CHF-CEMIII/C et CLC-CEMV/A et B).

I - 2- 1-3 Efflorescences [3]

Le terme « *Efflorescences* » désigne le dépôt de sels blancs de carbonate de calcium observés sur la surface du béton ou de mortier. Il en résulte des hétérogénéités de teinte d'autant plus visible que la surface de béton est sombre.

Les efflorescences ne modifient en rien la résistance mécanique et la porosité du béton. Elles affectent uniquement son aspect.

I - 2- 1-4 Dégradation par la réaction alcali-granulats (R.A.G)

Parmi les trois réactions alcali-granulats, nous retrouvons la réaction alcali-silice comme étant la plus répandue (R.A.S). Les autres réactions alcali-granulats étant les réactions alcali-silicates et alcali-carbonates.

I - 2- 1-4-1 Réaction alcali-silice (R .A.S) [4]

L'alcali-silice est une réaction entre les phases siliceuses réactives des granulats et les alcalis du ciment utilisé, il résulte la formation d'un gel silico-alcaline hydraulique (C-S-K ou C-S-H) dans les pores des granulats où à la surface des granulats peut détruire l'adhérence entre les granulats et la pâte de ciment et absorber l'eau de façon presque illimitée [4]. La réaction peut être destructrice et ce manifeste sous forme de fissuration et en présence d'eau, il peut donc provoquer des éclatements du béton [3]. L'expansion provoqué par réaction alcali-silice est d'autant plus grande que la teneur en silice réactive est élevée, mais seulement jusqu'à une certaine teneur en silice ; au-delà de cette teneur, l'expansion est plus faible [5].

I - 2- 1-5 Corrosion des armatures métalliques [6]

Les corps dissous dans le milieu qui environne l'ouvrage, peuvent pénétrer progressivement dans le béton. Certains d'entre eux sont agressifs, par exemple le dioxyde de carbone (CO₂), les acides (engrais, etc.) et les chlorures. Un acier mis au contact d'un béton qui a une forte basicité (pH de l'ordre de 12) et qui n'est pas pollué par des chlorures, se recouvre d'oxydes protecteurs. Si son enrobage est chimiquement modifié, cet acier se recouvre de produits " intermédiaires " qui ne sont pas stables en présence d'oxygène dissous dans le béton. Ils se transforment en des produits " finaux " non protecteurs, ce qui conduit à la dissolution et à l'enrouillement continu de l'acier.

I - 2-2 Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution

Ce type de désordres peut être induit par des erreurs intervenant soit au stade du dimensionnement de l'ouvrage, soit au stade de son exécution. Dans le premier cas, les causes de fissuration et de dégradation de la structure sont généralement induites par de graves erreurs dans la vérification de la stabilité de l'ouvrage et des conditions de résistance ou, plus simplement, par la prise en considération d'hypothèses erronées au niveau des conditions de chargement, d'environnement, de fonctionnement de l'ouvrage.

I - 2-3 Modification des conditions d'exploitation ou d'utilisation des ouvrages

En fonction de l'évolution du trafic, ou de la voirie, il est possible de justifier la nécessité de renforcer ou d'améliorer la portance d'un ouvrage. L'évolution des conditions de chargement est souvent induite soit par la modification des charges réglementaires sur essieux, soit par une modification de la fréquence des sollicitations qui s'exercent. Il faut aussi évoquer la nécessité, dans certains cas, de prendre en considération des sollicitations extrêmes (climatiques ou accidentelles) qui avaient été sous-estimées lors de l'exécution de l'ouvrage. C'est notamment le cas de la mise en conformité des ponts ou bâtiments vis-à-vis des sollicitations sismiques ou le renforcement de certains éléments de l'ossature (piles de pont, poutres latérales) vis-à-vis de sollicitations accidentelles telles que l'impact de véhicules [7].

DEUXIEME CHAPITRE- LES MATERIAUX COMPOSITES DANS LE GENIE CIVIL-

II.1. LES POLYMERES DANS LE GENIE CIVIL

II.1.1. Introduction

L'intérêt des solutions de réparation ou de renforcement par matériaux composites dépend essentiellement des propriétés mécaniques spécifiques des fibres, des performances de tenue à la corrosion des polymères et de la facilité de pose et de formage sur les structures à réhabiliter.

II.1.2. Définition et propriétés

Un matériau composite est issu de l'association de tissus de fibres haute résistance noyées dans une matrice polymère. Les polymères les plus couramment utilisés dans le génie civil, sont les polyesters insaturés ou les résines époxydes. Ces dernières sont souvent préférées aux autres polymères pour leur bonne mouillabilité sur une grande variété de substrats, leur grande gamme de viscosité, leur adhésivité élevée et leur excellente résistance chimique.

Les trois grandes familles de renfort actuellement utilisées dans l'industrie des matériaux composites sont le verre, l'aramide et le carbone. Cependant, de par leurs excellentes propriétés spécifiques, les fibres de carbone sont généralement préférées lorsque les contraintes de coût le permettent.

Il existe différentes techniques de réparation par matériaux composites : le collage de plats composites ou bien l'imprégnation des renforts in situ sur la structure à réparer. Dans tous les cas, les phénomènes qui donnent lieu à l'adhésion apparaissent lors du contact de la résine sur le support.

Le Tableau II.1 donne un ordre de grandeur des caractéristiques des fibres traditionnellement utilisées dans le domaine des composites [8].

Les fibres de verre et d'aramide sont plus économiques mais les premières ont un faible module et manquent de résistance face aux solutions salines et/ou basiques. Les secondes présentent un faible module, une résistance à la fatigue limitée en milieu aqueux et une tenue thermique limitée.

Filament	Diamètre (μm)	Densité	Résistance à la traction (MPa)	Module de traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Température de fusion ($^{\circ}\text{C}$)
Verre E	3 à 30	2,54	3 400	73 000	4,5	850
Verre D	3 à 30	2,14	2 500	55 000	4,5	-
Verre R	3 à 30	2,48	4 400	86 000	5,2	990
Carbone HR	8	1,78	3 500	200 000	1	2 500
Carbone HM	8	1,8	2 200	400 000	0,5	2 500
Aramide HR	12	1,45	3 100	70 000	4	480
Aramide HM	12	1,45	3 100	130 000	2	480

Tableau II.1: Propriétés des différentes fibres [8]

Les propriétés mécaniques des résines époxydes peuvent être assez variables selon leur formulation. Elles sont rassemblées dans le Tableau II.2.

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

Tableau II.2 : *Propriétés mécaniques des résines époxydes* [9]

Le comportement mécanique de la résine va dépendre de sa température d'utilisation par rapport à la température de transition vitreuse. Cette transition marque, en effet, une brusque variation de beaucoup de propriétés physiques du matériau (Figure III.5). En dessous de T_g , la mobilité moléculaire est très réduite et ne permet pas d'atteindre l'équilibre.

II.2. DURABILITE.

Wu et al. [10] ont étudié l'influence de l'eau, ils ont montré que la présence d'eau distillée en faible quantité accélère la réaction de polymérisation et améliore les propriétés mécaniques des résines.

Micelli et al. [11] ont, quant à eux, réalisé une étude comparative sur la tenue de différents composites en environnements agressifs tels que l'immersion en solution alcaline ou l'exposition à des cycles de gel-dégel, d'humidité, de température... Les éprouvettes soumises à un vieillissement accéléré en milieu alcalin ont été immergées dans une solution d'eau distillée contenant 0,16% de Ca(OH)_2 , 1% de Na(OH) , 1,4% de K(OH) . La température choisie pour accélérer le vieillissement est de 60°C et le temps d'immersion est de 21 et 42 jours. Selon Litherland et al. [12] ces durées peuvent être assimilées à des temps réels d'exposition qui sont respectivement de 14 et 28 ans. Les conclusions tirées de ces recherches montrent une très bonne tenue des résines époxydes lorsqu'elles sont exposées à un milieu basique. Le gain de masse de ces résines est très faible (0,05% après 900h), les propriétés mécaniques ne sont pas affectées et l'interface fibres/matrice est intacte. D'autres études sur les résines polyester ou vinylester [13] sont arrivées, après 100h d'immersion en eau salée à 60°C ou en eau interstitielle du béton, à constater une perte de masse du polyester alors que le vinylester devient stable après un gain de masse sur les 50 premières heures.

Peu d'études ont réellement été menées sur la tenue des résines époxydes en environnement alcalin représentatif de l'eau interstitielle de béton. Zhang et al. [14] présentent des exemples de solutions référencées dans la littérature pour étudier le vieillissement des adhésifs utilisés dans le génie civil. Ils précisent qu'il n'est pas rare de voir des chercheurs qui ne prennent en compte que la basicité de la solution ou seulement la présence de divers sels sans vérifier la composition d'une solution contenue dans les pores du béton.

II.3. Le collage en milieu poreux : cas du béton.

L'adhésion en milieu poreux résulte d'un processus en plusieurs étapes : la première correspondant à l'établissement du contact entre les matériaux, la création de liaisons plus fortes, susceptibles d'assurer le maintien du contact entre les matériaux, s'effectuant dans une seconde étape. La théorie du mouillage permet d'expliquer l'établissement d'un contact intime entre les matériaux pour que des liaisons puissent éventuellement se créer (théories des interactions moléculaires et des liaisons chimiques).

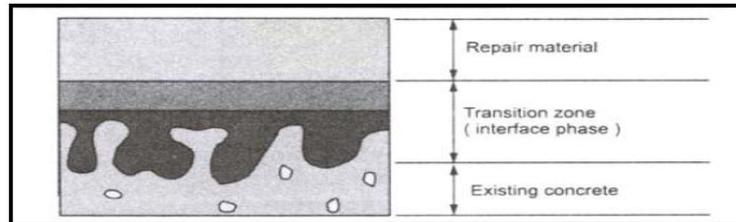


Figure II.1 : Modèle idéalisé d'une surface réparée [15]

Cardon et Hiel [16] ont montré qu'une résine déposée sur une surface de béton crée une zone de transition dont les propriétés sont caractéristiques de la qualité de l'adhésion. Ils considèrent que l'adhésion est totale lorsque l'épaisseur de la zone de transition est infinie. De plus, si la couche adhésive est fine, ils font le postulat que les propriétés de la zone de transition et l'influence des facteurs environnementaux sur celles-ci, conditionnent la qualité de l'assemblage. À l'inverse, si la couche adhésive est épaisse, ce sont les propriétés massives de l'adhésif qui conditionnent l'adhérence. Suite à diverses études menées ces dernières années, plusieurs paramètres caractéristiques des matériaux et de l'environnement dans lequel s'effectue l'assemblage ont été identifiés comme ayant une influence primordiale dans la création de la zone de transition :

- La rugosité et la porosité du béton contribuent toutes deux à augmenter l'aire de contact effective, favorisant un meilleur ancrage mécanique. Il est alors nécessaire de réaliser un traitement de la surface à revêtir afin, dans un premier temps, d'éliminer la couche de très faible cohésion en surface ainsi que toute présence d'huile ou autre agent polluant, mais également pour obtenir une surface de rugosité souhaitée et ouvrir les porosités surfaciques. Toutanji et Ortiz ont montré l'influence du traitement effectué à la surface du substrat sur l'adhésion d'un composite sur un support en béton. Celle-ci semble être liée au niveau de rugosité obtenu sur le substrat après un traitement par sablage ou par jet d'eau sous haute pression. En effet, la rugosité a un effet direct sur la valeur de l'angle de contact et par conséquent sur la mouillabilité du support. Néanmoins, un traitement trop agressif peut entraîner une forte rugosité, néfaste à la bonne tenue du revêtement. De l'air peut rester piégé et provoquer par la suite une décohésion du revêtement. Il n'y a pas systématiquement de corrélation entre la force d'adhésion et la rugosité de surface du substrat, puisque des liaisons fortes peuvent être obtenues sur des matériaux de très faible porosité comme le verre [17]. Prin [18] affirme d'ailleurs que l'absorption d'un liquide par mouillage de la surface solide est d'autant meilleure que la rugosité de cette surface est faible.

Par ailleurs, un support poreux signifie aussi une surface de contact plus grande, ce qui a pour effet d'augmenter l'énergie de rupture nécessaire à la séparation des matériaux

assemblés. Ainsi, la porosité ouverte du béton est un paramètre essentiel puisqu'elle gouverne l'imprégnation de la surface par la résine. Ainsi selon Munger [19], la qualité de l'adhésion d'un revêtement et sa durée de vie seraient proportionnelles à la profondeur de pénétration de la résine.

- La teneur en eau du béton : pour que la pénétration de la résine soit optimale, les pores du béton doivent être vides, en particulier d'eau. Le support peut être humide mais ne doit pas être saturé en eau. En effet, si le support est saturé, le phénomène de capillarité n'existe pas.

Pour pénétrer la résine devra évacuer une partie de l'eau. La seule possibilité est alors que la mouillabilité de la résine soit supérieure à celle de l'eau. Sasse et Fiebrich [17] ont montré que le mécanisme de pénétration de la résine dans le béton, est quasiment parfait sur substrat sec alors que des délaminages et des fissures sont visibles sur substrat humide. Pour prévenir la formation d'un film de condensation d'eau au niveau de l'interface juste après l'application de la résine, la température du béton ne doit jamais être inférieure à celle de l'air. C'est pourquoi il est souvent conseillé de sécher la surface du substrat avant tout assemblage. Généralement l'application du revêtement doit être réalisée lorsque la température du support est supérieure de 3 à 5°C à la température du point de rosée. Cette température est la limite au-dessous de laquelle la vapeur d'eau commence à condenser sur la paroi. Dans ce cas, l'adhésion de la résine sur le béton se fait plus intime et la force à rupture du revêtement est nettement meilleure [20]. Paillère et al. [21] ont par ailleurs montré que l'adhérence d'un polymère sur un support en béton humide serait liée à l'absorption plus ou moins élevée de l'eau présente en surface du substrat.

Wu et al. [11] ont montré qu'en réalité la présence d'eau en faible quantité favorise la réaction de réticulation de la résine et donc permet d'augmenter ses propriétés mécaniques.

- La viscosité de la résine est le paramètre essentiel gouvernant le flux capillaire à l'intérieur des porosités du béton. En effet, une faible viscosité et une énergie de surface élevée permettent d'augmenter le flux capillaire de résines dans les cavités et d'éviter la formation de poches de gaz [18, 22]. La résine pourra pénétrer dans les pores ouverts du béton, et la profondeur en sera plus importante. Certaines résines époxydes pénètrent sur une distance de quelques millimètres [19].

II.4. CARACTERISATION DE L'ADHERENCE.

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.

II.4.1. Modes de sollicitation.

Les différents essais de caractérisation mécanique des assemblages collés sont répertoriés dans le tableau II.3. 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.

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.

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.

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.

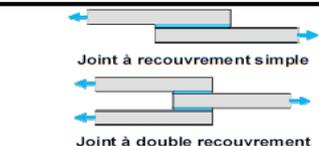
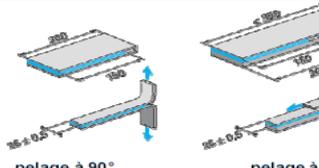
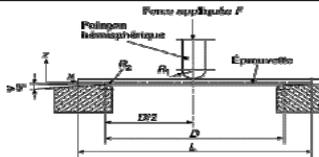
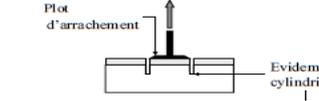
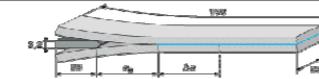
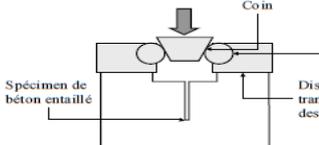
Sollicitation par cisaillement :	 <p>Joint à recouvrement simple</p> <p>Joint à double recouvrement</p>
Sollicitation par pelage :	 <p>pelage à 90°</p> <p>pelage à 180°</p>
Sollicitation par flexion :	 <p>Force appliquée F</p> <p>Polymère thermoplastique</p> <p>Éprouvette</p> <p>Support</p>
Sollicitation d'arrachement :	 <p>Plot d'arrachement</p> <p>Evidement cylindrique</p>
Blister test :	
Wedge test :	
Wedge splitting test :	 <p>Co in</p> <p>Spécimen de béton entaillé</p> <p>Dispositif de transmission des efforts</p>

Tableau II.3 : Modes de sollicitation d'un joint cohésif

TROISIEME CHAPITRE - CONTROLE NON DESTRUCTIFS DES MATERIAUX DE STRUCTURE -

III.1. Intérêt du Contrôle Non-Destructif (CND)

Le contrôle non destructif (CND) consiste à évaluer par une méthode physique (ultrasons, radiographie ...) l'intégrité d'une structure à l'intérieur de laquelle peuvent apparaître d'éventuels défauts. De fait, la plupart des méthodes de CND nécessitent une bonne connaissance de la physique du matériau et de son endommagement pour détecter et caractériser les défauts, c'est à dire évaluer leur emplacement, leur dimension et leur densité afin d'être en mesure d'estimer s'il y a lieu ou non d'intervenir sur l'objet (nécessité de mettre en œuvre une maintenance dans le cas de structures en service, etc.). Le CND des matériaux trouve son utilité dans un large domaine d'applications comme les produits de fabrication industrielle (métallurgie, verre), les infrastructures de transport ou d'habitat, les matériaux aéronautiques, etc.

III.2. Les techniques de CND

Il existe de nombreuses méthodes d'évaluation non destructive des matériaux, et il serait hasardeux de tenter d'en dresser une liste exhaustive. Parmi les méthodes classiques de CND, on peut citer le simple contrôle visuel, qui est souvent le premier maillon de la chaîne de détection d'imperfections des structures. Viennent ensuite les techniques classiques de radiographie X, les ultrasons (en transmission, en réflexion, en double transmission), les courants de Foucault, l'émission acoustique, la thermographie, l'interférométrie holographique, etc.

III.2. 1. Les techniques ultrasonores

Les techniques d'échographie ultrasonore se sont en premier lieu beaucoup développées en médecine, du fait de la grande facilité de propagation des ultrasons dans les tissus biologiques. Le contrôle par ultrasons consiste à engendrer une impulsion brève dans le matériau à contrôler, et à observer les échos éventuels réfléchis par les discontinuités rencontrées.

III.2. 1.1. Propagation d'ondes dans les milieux hétérogène du génie civil

L'hétérogénéité du béton sera un paramètre très important à prendre en compte. Les longueurs d'ondes utilisées étant du même ordre de grandeur que les granulats, et il y aura donc une interaction forte entre les ultrasons et les granulats; les ondes se propageront en régime multidiffusif.

III.2. 1.2. Les types d'ondes

Dans les milieux solides, on considère la propagation d'ondes suivantes différentes types de critères : polarisation, domaine d'application, milieux d'existence.

On distingue les ondes de Volume (OL, OT.....)

Onde Longitudinale : déplacement rectiligne parallèle à la direction de propagation

Onde Transversale : déplacement rectiligne perpendiculaire à la direction de propagation

Ondes de Surface (Rayleigh, Lamb.....) :

Dans un demi espace homogène et isotrope, 67% de l'énergie d'une source vibrant verticalement se propage en une onde de surface dite de Rayleigh, 26% en une onde de cisaillement (S) et 7% en une onde de compression (P) [23]. L'amplitude des ondes de surface décroît exponentiellement avec la profondeur. Elles sont donc adaptées à l'étude des couches superficielles. D'autre part, la profondeur de pénétration des ondes de surface diminue avec la longueur d'onde λ et ne dépasse pas quelques longueurs d'onde. Si un milieu est par exemple stratifié, la vitesse de phase V_R des ondes de surface sera fonction de la fréquence f . C'est ce phénomène, appelé dispersion, qui est mis à profit dans les méthodes de reconnaissance. Dans un modèle stratifié, la vitesse de phase des ondes de Rayleigh dépend de la vitesse des ondes S et des ondes P, de la densité et de la hauteur de chacune des couches. La vitesse des ondes S, V_s , est le paramètre le plus sensible.

Les ondes de surface peuvent être avantageusement utilisées pour leur auscultation. Par exemple, l'épaisseur endommagée de la surface d'un béton et ses caractéristiques mécaniques peuvent être étudiées en procédant comme pour l'auscultation des couches superficielles des sols à l'aide des courbes de dispersion de l'onde de surface.

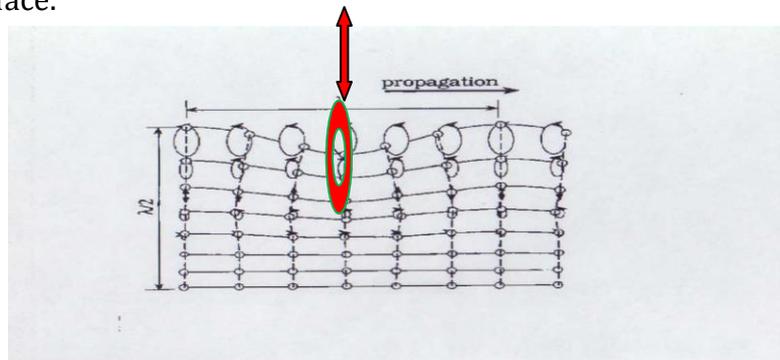


Figure III.1. Onde de Rayleigh : déplacement elliptique parallèle à la direction de propagation

CONCLUSION

Cette revue bibliographique a mis en exergue la multitude des paramètres intervenant dans la réparation et le renforcement des ouvrages en béton. Elle a aussi montré la possibilité de l'utilisation de la technique ultrasonore dans la qualification des réparations ou des renforcements en exploitant les propriétés des ondes. Elle nous a permis de s'orienter vers l'utilisation des ondes de surface par l'exploitation de deux de leurs propriétés. A savoir la vitesse de propagation et l'atténuation du signal. Ceci est possible par les deux appareils disponibles (appareil des ultrasons et l'oscilloscope) au niveau du LGCH à l'université de Guelma.

DEUXIEME PARTIE - ETUDE EXPERIMENTALE

PREMIER CHAPITRE : PRESENTATION DES METHODES DE CONTROLE UTILISEES

I.1. Auscultation ultrasonique

Cette méthode [24] permet de mesurer le temps de propagation d'une impulsion ultrasonique traversant le béton. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché sont très semblables. Ces appareils comprennent un générateur d'impulsions et un récepteur [25] d'impulsions. Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc. Des cristaux semblables sont utilisés dans le récepteur. Le temps de propagation de l'impulsion dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.

Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés. Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures :

- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, et une substance de contact telle une mince couche de gel de contact est indispensable.
- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau ; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température.
- La présence d'acier d'armature dans le béton a un effet appréciable sur la vitesse des impulsions. Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours d'impulsion.

En plus de la vitesse de propagation, on procède à l'évaluation de l'atténuation de l'amplitude des ondes à l'aide d'un oscilloscope. L'atténuation est aussi en relation avec le milieu traversé par les ondes.



Figure I.1. Appareillage ultrasonique utilisé

I.1.1 Principes de base

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.

1.1.2 Description de l'appareil

L'appareil utilisé comprend :

- Le testeur ultrasonique 58-E0048
- Une tête de transmission et une de réception (54 kHz)
- Deux câbles de connexion (BNC)
- Un barreau de calibrage
- Un flacon de gel de contact

1.1.3 Résultats des essais et évaluation

a-Positionnement des transducteurs

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

b- Mesure du temps de propagation et de la longueur de parcours

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

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

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

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

Où :

V est la vitesse conventionnelle de propagation, en km/s

L est la longueur de parcours, en mm

T est le temps de propagation en ms.

Note : en exprimant L en mètres et T en secondes, la vitesse obtenue sera en mètres/secondes. La détermination de la vitesse de propagation sera arrondie au plus proche 0.01 km/s ou trois chiffres significatifs.

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

Pour cela, le transducteur émetteur sera placé en contact avec la surface du béton en un point P fixe et le transducteur récepteur sera déplacé en différents points alignés à des distances fixes. Les temps de propagation relevés seront reportés sur une courbe donnant la relation temps/distance entre transducteurs. Un exemple est montré en figure I.2.

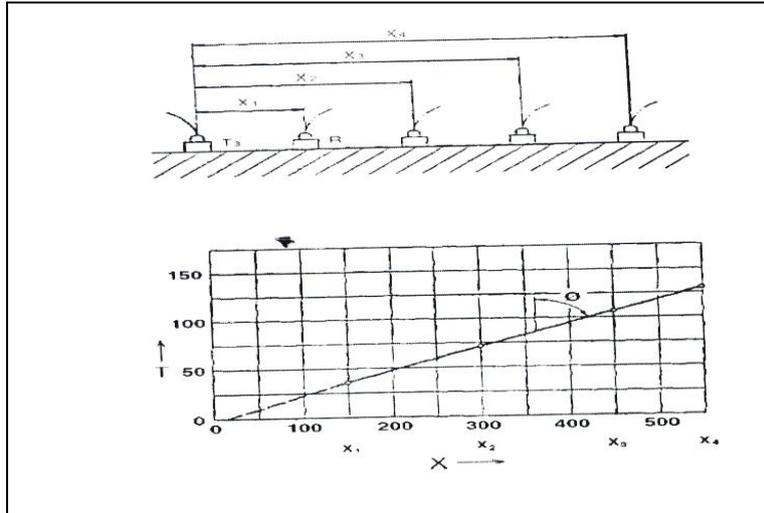


Figure I.2. Vitesse de propagation déterminée en transmission indirecte ou de surface

c- Evaluation de l'homogénéité et de l'uniformité du béton

En traçant un quadrillage sur l'élément béton et en mesurant les temps de propagation correspondants, il est possible d'évaluer l'homogénéité du béton. Il est souhaitable de se servir d'un diagramme pour visualiser les résultats d'essais et démontrer les variations éventuelles de la qualité du béton.

d- Présence de fissures, vides, zones dégradées

Lorsqu'une onde ultrasonique rencontre une interface béton air, il y a une diffraction et une réflexion qui atténue la vitesse et allonge donc le temps de propagation. En utilisant ce phénomène, il est possible de localiser les défauts, vides, zones dégradées et fissures.

e- Corrélation entre vitesse de propagation et résistance du béton

Il est à noter que les caractéristiques physiques d'un matériau qui influencent la vitesse de propagation sont le module élastique et la densité. Pour du béton, ces caractéristiques sont relatives au type de granulats, leur proportion dans le mélange, leurs propriétés physiques, celles du ciment liées principalement au dosage eau/ciment que par le type de granulats et les proportions granulats/pâte de ciment. Les corrélations entre vitesse de propagation et résistance du béton sont indirectes et devront être établies pour un mélange spécifique. Pour un béton non connu, l'estimation de la résistance, en se fiant seulement à la vitesse de propagation, n'est pas significative.

f- Estimation du module élastique

A partir des mesures de vitesse de propagation, il est possible de calculer le module dynamique E_d selon la formule :

$$E_d = V^2 \gamma \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (I.2)$$

Où :

V = vitesse en km/s

γ = masse volumique du béton en kg/m^3

ν = coefficient de Poisson (pour béton haute résistance $\nu=0.15$; pour béton faible résistance $\nu=0.30$)

E_d = Module élastique dynamique en Mpa .

A partir d'un diagramme similaire à la figure I. 3, il est possible de corréler le module élastique dynamique au module élastique statique et ceci en connaissant la vitesse de propagation des ondes.

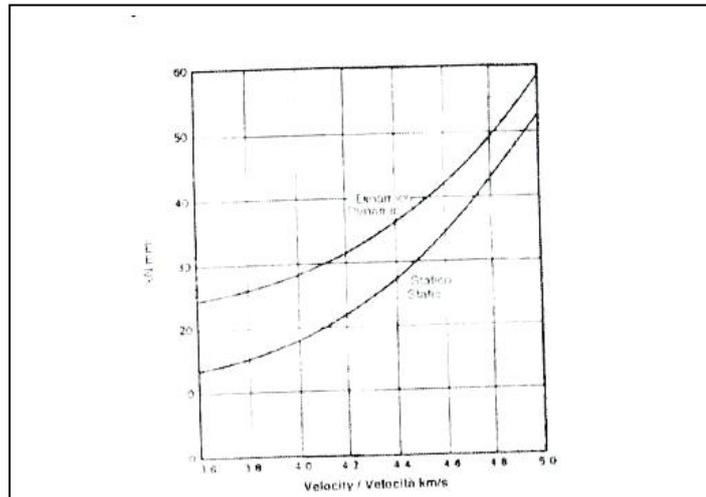


Figure I.3. Estimation des modules élastiques statiques et dynamiques à partir de la vitesse de propagation

I.2. Oscilloscope numérique

L'acquisition des amplitudes et des atténuations des signaux ultrasoniques est réalisée par un oscilloscope numérique (fig. I.4.).



Figure I.4. Photo de l'oscilloscope numérique utilisé

I.3. Dynamomètre de traction

I.3.1. 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 I.4). Les plots utilisés dans le cadre de ce travail sont des plots en aluminium de largeur 50 mm- La norme NF EN 24624 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 à une vitesse constante, 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.

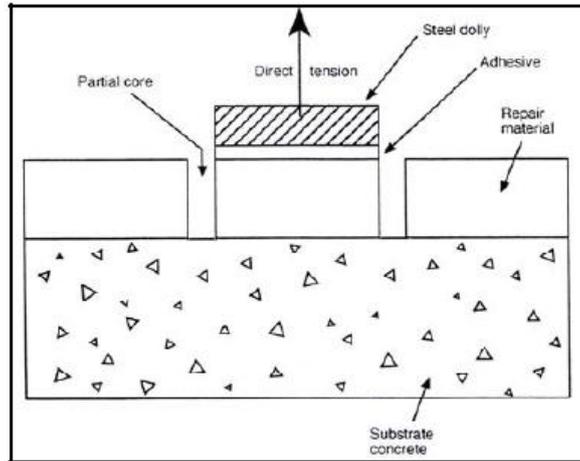


Figure I.5. Configuration d'un essai classique d'arrachement [26]

Ce type d'essai est fréquemment utilisé sur site pour contrôler l'adhérence d'un matériau composite sur du béton en raison de la facilité de réalisation d'une telle mesure. 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.

La réalisation de tels essais entraîne une grande dispersion des résultats obtenus. Lors de la découpe pratiquée autour du plot il est difficile de s'assurer que le trait de scie s'arrête systématiquement au niveau de l'interface résine-pâte de ciment, principalement à cause des épaisseurs variables de résine déposée.



Figure I.6. Photo du dynamomètre de traction utilisé

DEUXIEME CHAPITRE : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX ET METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

II.1. Caractéristiques des matériaux

Le choix des matériaux utilisés dans la confection des bétons s'est porté, sur leur disponibilité dans la régions de Guelma : sable de mer, deux types de graviers d'origine calcaire issus de la carrière de bendjerah (SARL SAPAM) de fraction (G 5/15) et (G 15/25), un ciment CEM II-A 42.5 de la cimenterie de Hadjar Essoud (Skikda) et enfin l'eau du robinet disponible au laboratoire (LGCH) Guelma.

	Module de	Equivalent de sable		Teneur en
Caractéristiques	M_f	ESV (%)	ESP (%)	W (%)
Résultats	1.77	95.05	94.41	2.45

Tableau II.1. Caractéristiques physiques du sable

Le sable est très propre (ESV > 80 %, ESP > 80 %) mais il a une majorité d'élément fins et très fins ($M_f < 1.8$).

Les graviers présentent des masses absolues proches (2.8 g/cm³) et des impuretés inférieures à 5% (graviers propres). Ils ont des coefficients de Los Angeles de 27% et 32% respectivement pour les graviers 5/15 et 15/25. Donc les deux graviers sont utilisables pour le béton hydraulique.

Les compositions des deux bétons utilisés (béton à réparer et béton de réparation) sont données dans le tableau suivant :

Composition	Béton à renforcer	Béton de renforcement
Sable (Kg/m ³)	257,21	257,21
G 5/15 (Kg/m ³)	1560,83	1469,02
G 15/25 (Kg/m ³)	---	91,81
Ciment (Kg/m ³)	350	350
Eau (L)	212,12	212,12

Tableau II.2. Compositions des bétons

La résistance à 28 jours du bétons à réparer est 23 MPa et celle du béton de réparation est 31.5 MPa.

La colle ayant servi au collage des matériaux composites (lamelles en fibres de carbone, tissus en fibres de carbone et tissus en fibre de verre) est une colle époxydique thixotrope à deux composants sans solvant. Elle présente une adhérence sur béton sablé après 14 jours à 23°C : > 1,5 MPa et des résistances mécaniques (à 14

jours à 23°C) supérieures à 50 MPa à la compression et à 15 MPa à la traction par flexion.

II.2. Méthodologie expérimentale

La méthodologie suivie se compose des étapes suivantes :

1^{eme} étape : Corps d'épreuve

Les dimensions des poutrelles sont $0.10 \times 0.12 \times 1 \text{ m}^3$ pour les éprouvettes réparées par les matériaux composites et $0.10 \times 0.10 \times 1 \text{ m}^3$ pour celles avec du béton. Trois éprouvettes pour chaque cas.



Figure II.1. Poutrelles destinées aux essais

2^{eme} étape : préparation des supports

- on partage chaque éprouvette en deux parties pour obtenir une bonne adhésion et une mauvaise du matériau de renforcement. Le support de la première partie est nettoyée pour être propre et sain. Il est exempt de laitance, de parties non adhérentes, de toute trace de graisse, d'huile, de rouille, etc.
- On provoque des ruines transversales d'une profondeur de 2 à 3 mm pour une bonne adhérence de surface.
 - L'autre moitié n'a subi aucun traitement. Elle est notamment lisse.

3^{eme} étape : préparation du mélange de la colle

4^{eme} étape : réparation des éprouvettes

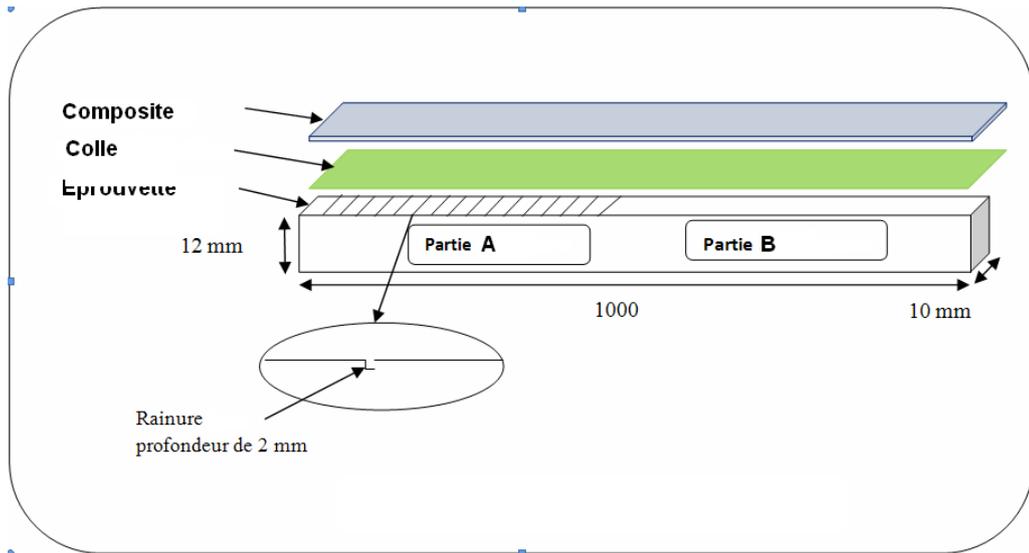


Figure II.2. Opération de collage des matériaux composites

5^{eme} étape : essais non destructifs par les ultrasons

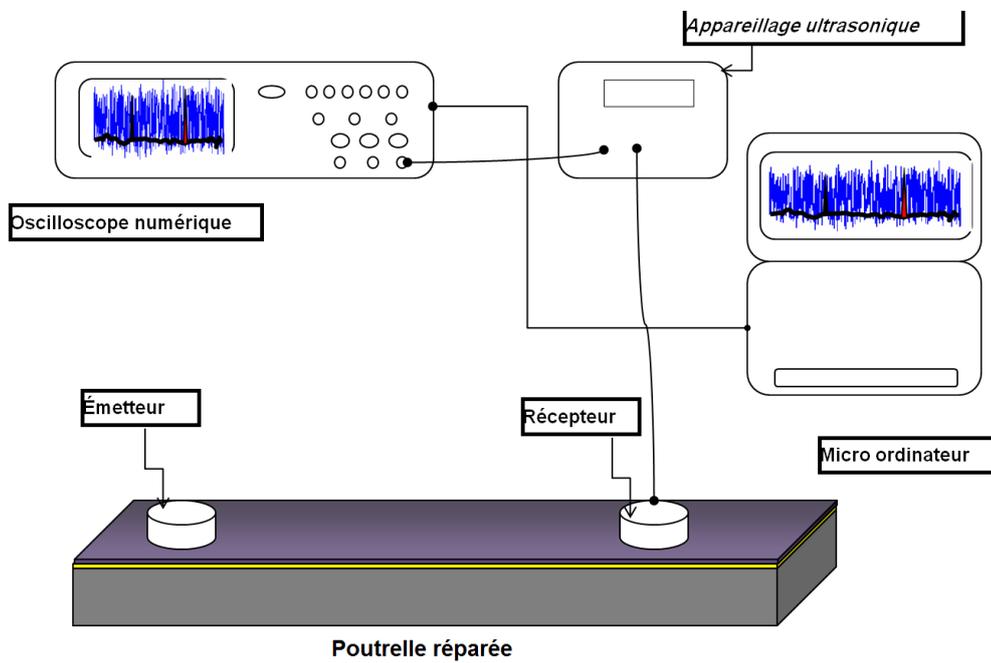


Figure II.3. Schéma de l'opération des essais ultrasoniques



Figure II.4. Photo de l'opération des essais ultrasoniques

5^{eme} étape : essais destructifs par (arrachement)

L'essai d'arrachement consiste à coller un plot métallique 5cm x 5cm sur la surface revêtue ou réparée et à appliquer un effort de traction jusqu'à la rupture, par un dynamomètre de traction en trois positions pour chaque partie pour avoir une moyenne.



Figure II.5. Photo de l'opération des essais destructifs (arrachement)



Figure II.6. Photo de rupture lors des essais destructifs (arrachement)

TROISIEME CHAPITRE : INTERPRETATION ET EXPLOITATION DES RESULTATS

III.1. Introduction

Ce chapitre consiste à présenter d'une façon globale les résultats obtenus et leurs interprétation afin d'en tirer des conclusions.

A partir des résultats des essais expérimentaux, nous tentons d'établir la relation existante entre les différentes propriétés étudiées ; à savoir : la vitesse et l'atténuation des ultrasons et la qualité de réparations du béton en fonction de l'influence

La qualification des différents renforcements et réparations est celle déterminée par les essais destructifs (arrachement). Ces résistances à l'arrachement vont être corrélées aux évolutions de la vitesse et de l'atténuation des ultrasons pour des réparations avec différents matériaux composites (tissu de fibre de verre ; tissu de fibre de carbone ; plaque de carbone dure) et avec un ragréage en béton.

III.2. Essais non destructifs : mesure de la vitesse ultrasonore de l'onde de surface et détection des signaux par l'oscilloscope

Les essais non destructifs par les ultrasons ont été conduits pour différents pas entre l'émetteur et le récepteur. Ces espacements sont conformes à la règle proposée par Tokimatsu *et al* [59], qui recommandent un espacement L supérieur à quatre fois la longueur d'onde : $\lambda / 4 \leq L$. Notre béton est un béton ordinaire ($V=3000$ m/s), la fréquence des pulsations utilisées est $f=54$ kHz ; ce qui conduit à une longueur d'onde $\lambda=5.5$ cm.

On a utilisé des pas de 10, 13 et 15 cm, les transducteurs utilisés ont un diamètre de 4.95 cm, pour prospector l'effet des espacements entre l'émetteur et le récepteur tout en respectant la règle de Tokimatsu.

III.2.1. Eprouvettes témoins

▪ Epreuve témoin T1

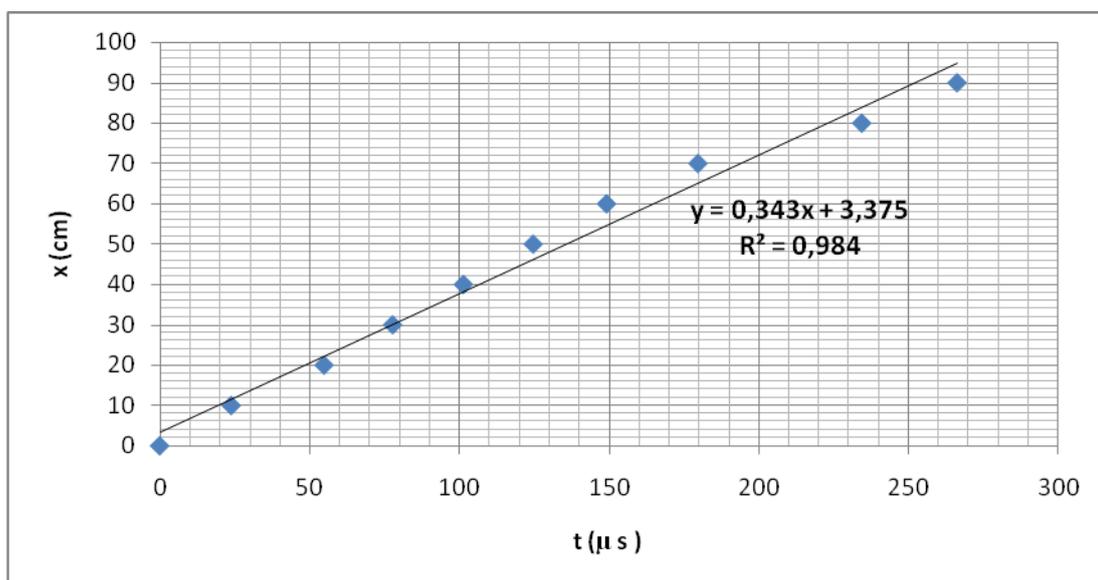


Figure III.1. Estimation de la vitesse des ondes de surface sur l'éprouvette témoin T1 à pas constant (10 cm)

La vitesse des ondes de surface est estimée à partir de la pente de la courbe linéaire présentée sur la **Figure II.1**. qui donne la variation du temps (acquisition du signal) en fonction de la distance (entre l'émetteur et le récepteur) : $V_{1-10} = 0.343 \text{ cm}/\mu\text{S}$

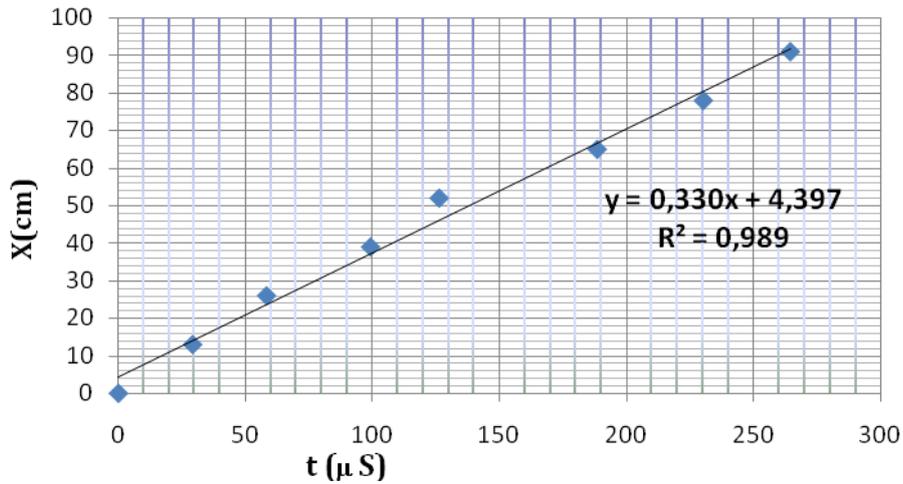


Figure. III.2. Estimation de la vitesse des ondes de surface sur l'éprouvette témoin T1 à pas constant (13 cm)

La vitesse des ondes de surface est $V_{1-13} = 0.330 \text{ cm}/\mu\text{S}$

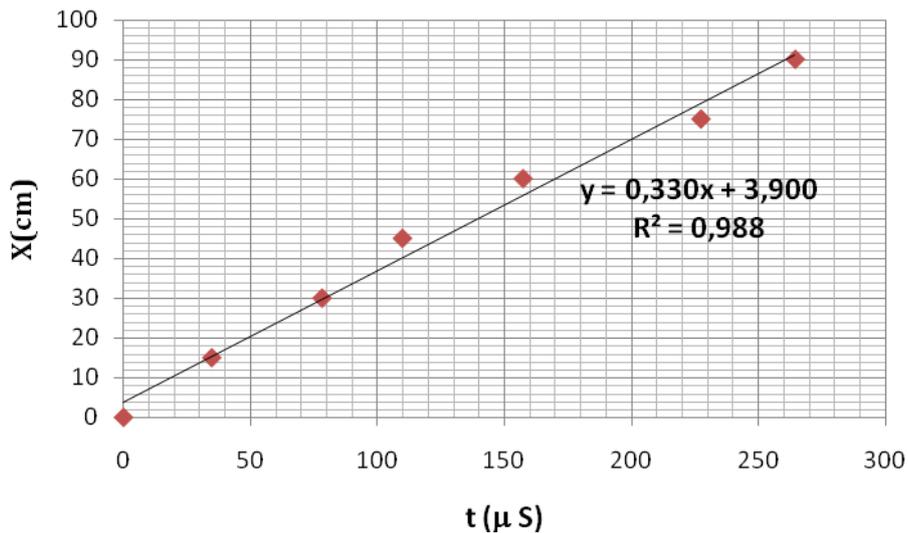


Figure. III.3. Estimation de la vitesse des ondes de surface sur l'éprouvette témoin T1 à pas constant (15 cm)

La vitesse des ondes de surface est $V_{1-15} = 0.330 \text{ cm}/\mu\text{S}$

Les résultats des différentes vitesses sur les trois poutres témoins sont résumés dans le tableau suivant :

Eprouvette	V [cm/μ s] R ²			Vmoy. [cm/μ s]
	T1	T2	T3	
10	0.343 <i>R²=0.984</i>	0.343 <i>R²=0.987</i>	0.322 <i>R²=0.970</i>	0.336± 0.012
13	0.330 <i>R²=0.989</i>	0.342 <i>R²=0.996</i>	0.357 <i>R²=0.977</i>	0.343±0.014
15	0.330 <i>R²=0.988</i>	0.339 <i>R²=0.993</i>	0.411 <i>R²=0.998</i>	0.360±0.044

Tableau II.1. Vitesses des ultrasons des éprouvettes témoins

Les vitesses obtenues pour les différentes poutres indiquent que la qualité du béton est acceptable et confirment les résultats d'écrasement pour déterminer la résistance. L'éprouvette T3 présente, pour le pas de mesure de 15 cm, une valeur de vitesse supérieure aux autres éprouvettes ce qui a conduit à un écart dépassant les 10% de la moyenne des mesures pour ce pas. On remarque que l'effet du pas de mesure (pour les pas retenus) est négligeable (7 % avec prise en compte de la valeur de T3).

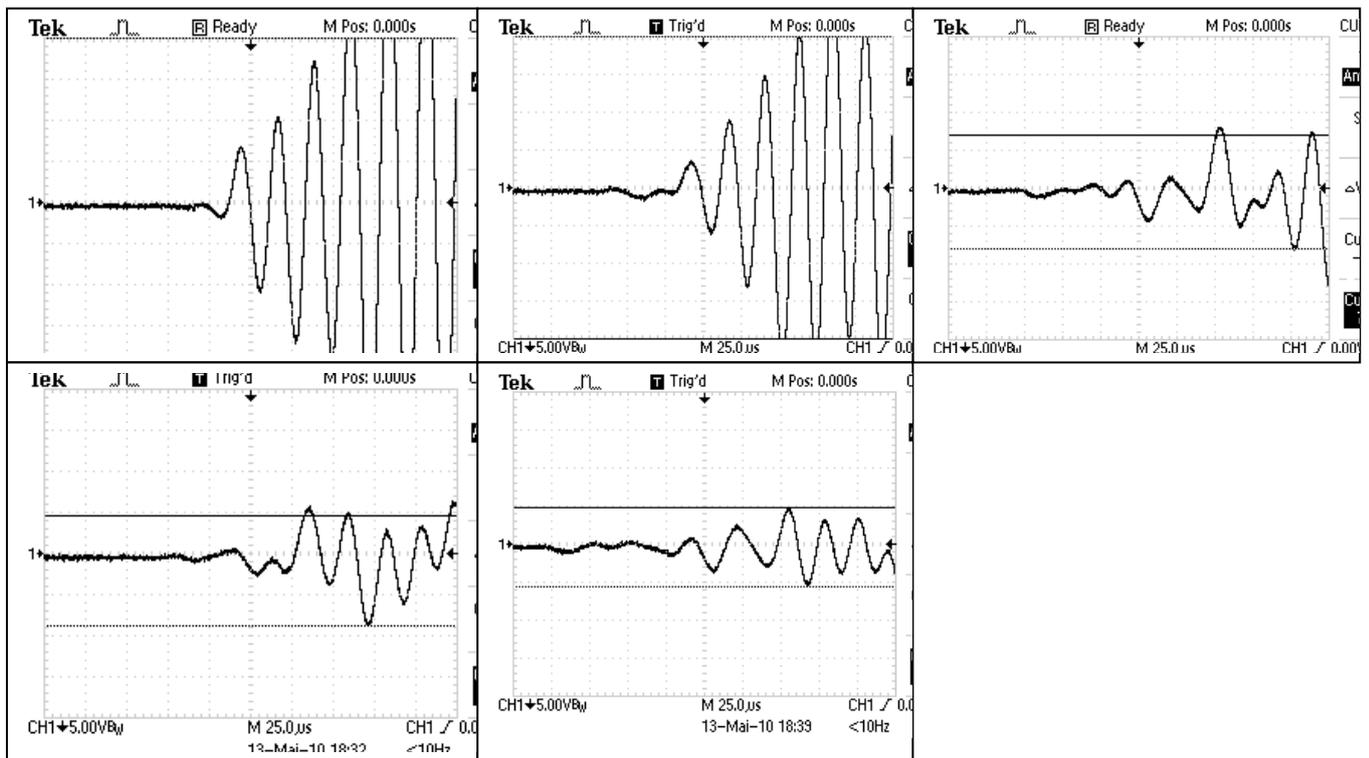


Figure. II. 4. Exemples des signaux enregistrés sur l'éprouvette témoin à pas constant par l'oscilloscope

15 combinée		13 combinée		10 combinée		Pas de mesure (cm)	Qualité de la réparation	ΔV [v]
(cm)	>40	(cm)	>40	(cm)	>40			
15	>40	13	>40	13	>40	10	T1	
30	40	26	>40	20	>40	20		
45	22.6	39	28.4	30	>40	30		
60	15	52	23.8	40	31.8	40		
75	13.4	65	17.6	50	21	50		
		78	10.4	60	19	60		
90	10.4	91	9.6	70	16.2	70		
				80	15	80		
				90	11.6	90		
							T2	
15	22.2	13	>40	10	>40	10		
30	29.4	26	>40	20	>40	20		
45	22.8	39	25.4	30	26.2	30		
60	20.8	52	22.2	40	25.6	40		
75	16.2	65	19.6	50	23.4	50		
90	12.4	78	14.4	60	20.4	60		
				70	18	70		
				80	10.0	80		
				90	9.6	90		
							T3	
>40	>40	13	>40	10	>40	10		
30	33.2	26	>40	20	>40	20		
45	35	39	>40	30	>40	30		
60	12	52	38.2	40	36.4	40		
75	12	65	36.6	50	35.6	50		
90	8	78	13.6	60	21.6	60		
				70	18.8	70		
				80	15	80		
				90	11.2	90		

Tableau III. 5. Amplitudes des signaux enregistrés sur les éprouvettes témoins à pas constant

Nous observons que les signaux enregistrés sur un profil sur l'éprouvette témoin à pas constant commencent par une grande amplitude pour les premières distances et l'amplitude commence à diminuer pour les grandes distances. Cette diminution de l'amplitude est due à l'atténuation de propagation des ondes de surfaces sous l'effet de la composition du béton (gravier de différentes dimensions, sable, ciment) et le degré de la compacité de béton et l'état de la surface traité.

Les diminutions du signal à la moitié et à l'extrémité de la poutrelle sont respectivement 33% et 73 % pour le pas de 10 cm, 30 % et 73,5 % pour le pas de 13 cm et enfin 33 % et 74,5% pour le pas de 15 cm. Comme pour les vitesses, l'effet du pas utilisé est négligeable sur les amplitudes du signal.

III.2.2. Eprouvettes réparées avec lamelles de fibres de carbone LFC

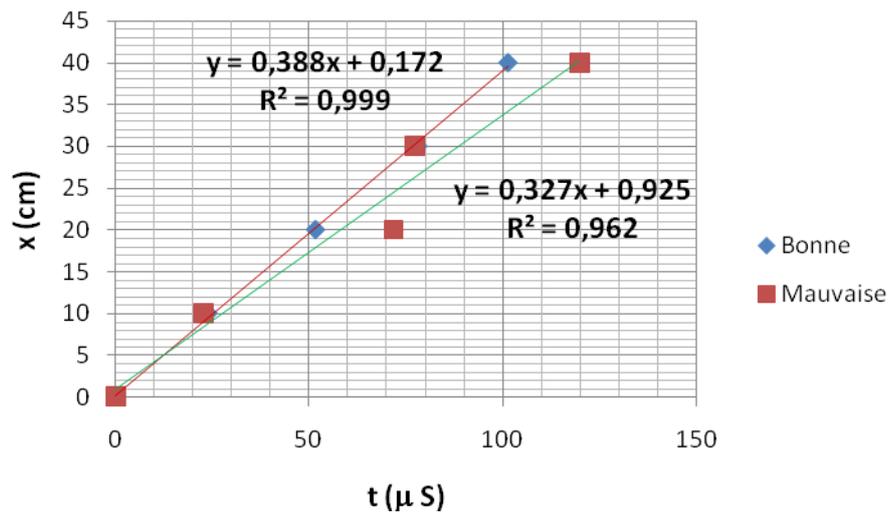


Figure. III.5. Estimation de la vitesse sur des éprouvettes réparées par des lamelles de fibres de carbone (pas de 10 cm)

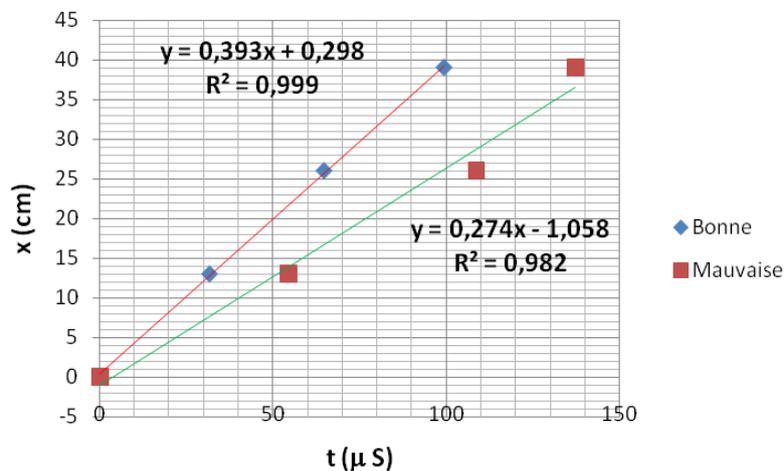


Figure. III.6. Estimation de la vitesse sur des éprouvettes réparées par des lamelles de fibres de carbone (pas de 13 cm)

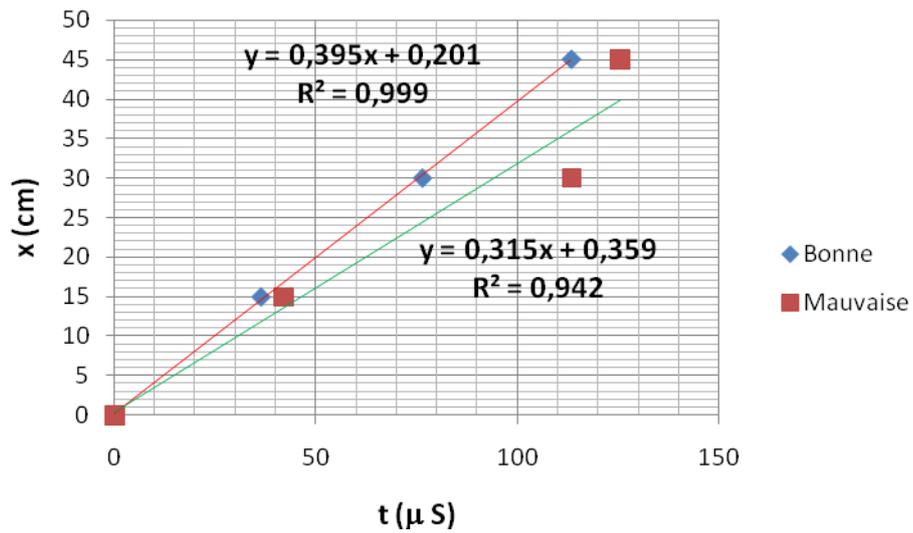


Figure. III.7. Estimation de la vitesse sur des éprouvettes réparées par des lamelles de fibres de carbone (pas de 15 cm)

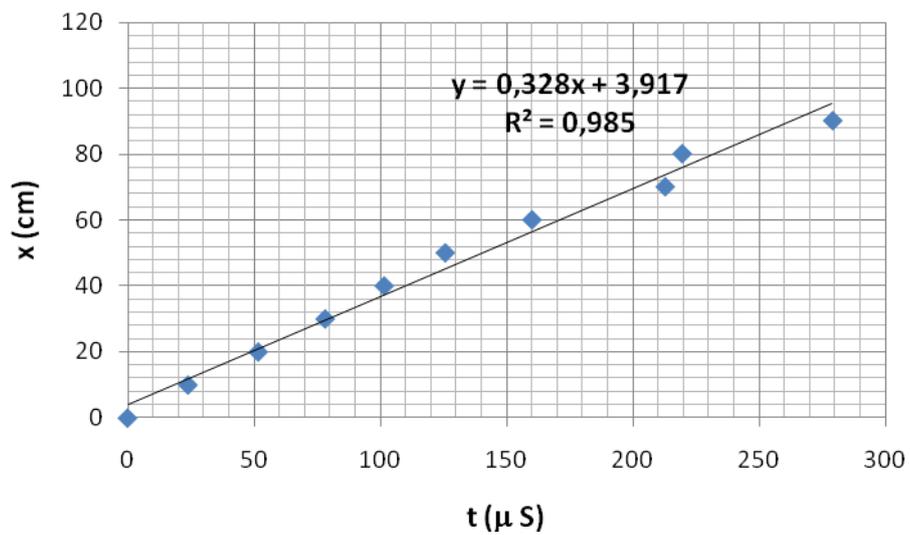


Figure. III.8. Estimation de la vitesse des ondes de surface sur toute l'éprouvette T1 réparée par lamelles de fibres de carbone (pas de 10 cm)

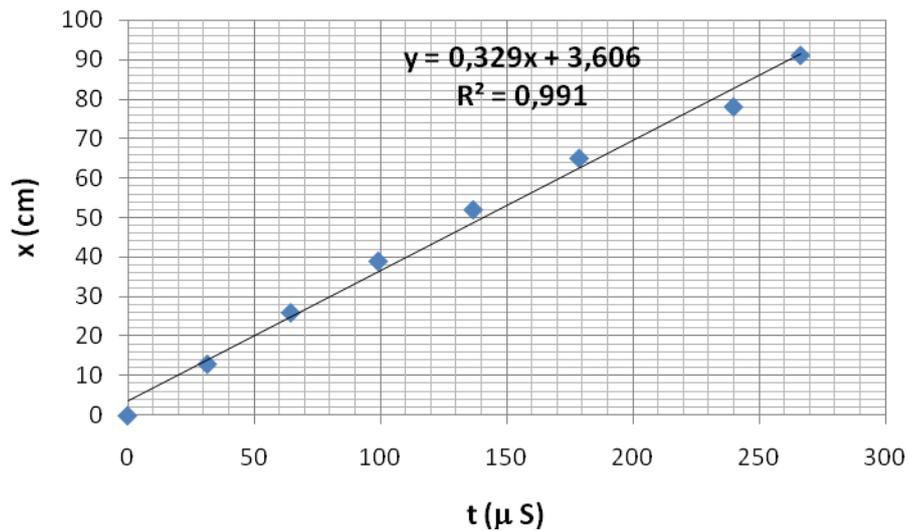


Figure. III.9. Estimation de la vitesse des ondes de surface sur toute l'éprouvette T1 réparée par lamelles de fibres de carbone (pas de 13 cm)

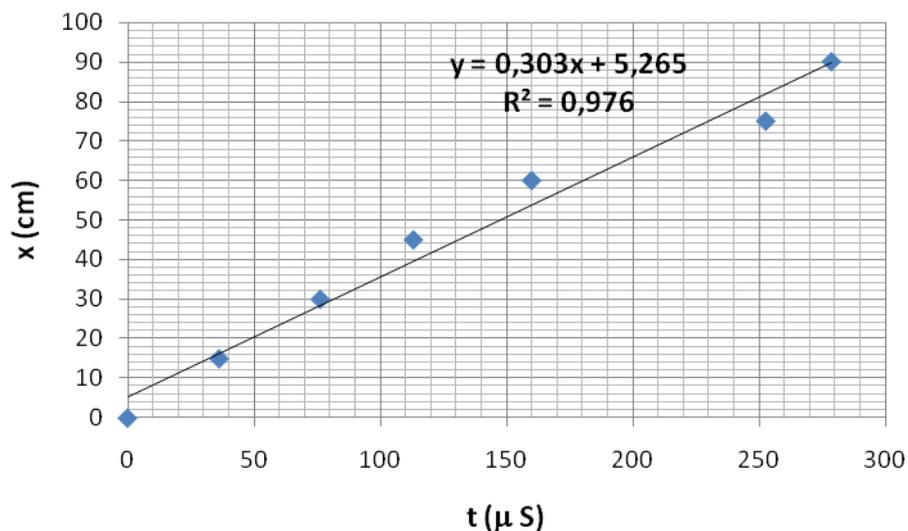


Figure. III.10. Estimation de la vitesse des ondes de surface sur toute l'éprouvette T1 réparée par lamelles de fibres de carbone (pas de 15 cm)

La vitesse des ondes de surface est estimée à partir de la pente de la courbe linéaire présentée sur les figures III « 5 6 7 8 9 10 » qui donne la variation du temps en fonction de la distance (entre l'émetteur et le récepteur) :

Les résultats des différentes vitesses sur les trois poutres réparées par des lamelles composites de fibres de carbone sont résumés dans le tableau suivant :

Pas de mesure (cm)	Qualité de la réparation	V [cm/μ s] R ²			Vmoy. [cm/μ s]
		T1	T2	T3	
10	bonne	0.388 <i>R</i> ² =0.999	0.397 <i>R</i> ² =0.998	0.405 <i>R</i> ² =0.996	0.397± 0.008
	mauvaise	0.327 <i>R</i> ² =0.962	0.321 <i>R</i> ² =0.984	0.291 <i>R</i> ² =0.973	0.314±0.018
	combinée	0.328 <i>R</i> ² =0.985	0.383 <i>R</i> ² =0.979	0.341 <i>R</i> ² =0.994	0.351±0.029
13	bonne	0.393 <i>R</i> ² =0.999	0.395 <i>R</i> ² =0.999	0.404 <i>R</i> ² =0.997	0.397±0.006
	mauvaise	0.274 <i>R</i> ² =0.982	0.379 <i>R</i> ² =0.998	0.276 <i>R</i> ² =0.987	0.310±0.060
	combinée	0.329 <i>R</i> ² =0.991	0.352 <i>R</i> ² =0.993	0.352 <i>R</i> ² =0.990	0.344±0,013
15	bonne	0.395 <i>R</i> ² =0.999	0.408 <i>R</i> ² =0.999	0.407 <i>R</i> ² =0.999	0.403±0.007
	mauvaise	0.315 <i>R</i> ² =0.942	0.355 <i>R</i> ² =0.993	0.364 <i>R</i> ² =0.981	0.345±0.026
	combinée	0.303 <i>R</i> ² =0.976	0.282 <i>R</i> ² =0.919	0.344 <i>R</i> ² =0.994	0.310±0.032

Tableau III.6 Vitesses des ultrasons des éprouvettes réparées par des lamelles de fibres de carbone

Les vitesses dans les poutres bien réparées sont toujours supérieures aux vitesses dans celles avec une mauvaise réparation. Les différences sont respectivement de 31 %, 28 % et 10 % pour les pas de mesure 10 cm, 13 cm et 15 cm. L'effet du pas de mesure conduit à une différence maximale, des vitesses mesurées, de 1.5% pour les poutres bien- réparées et 12% pour les poutres mal- réparées.

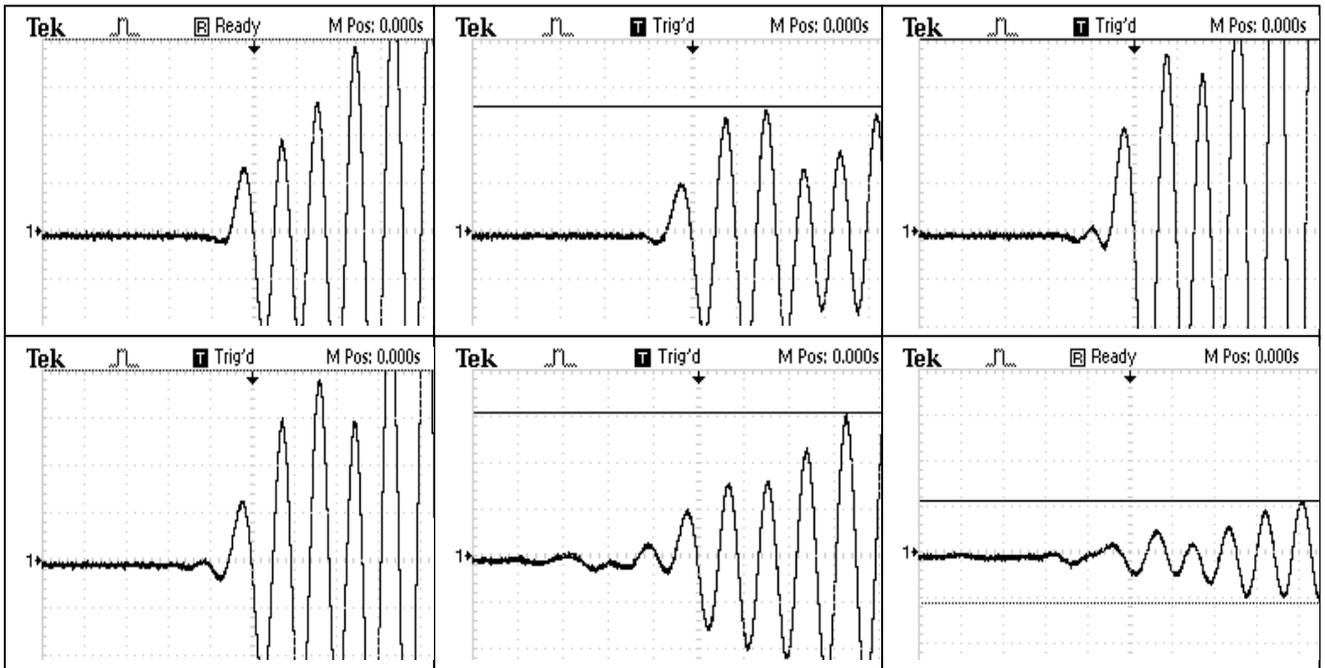


Figure. III. 11. Exemples des signaux enregistrés sur l'éprouvette réparée par lamelles de fibres de carbone

Pas de mesure (cm)	Qualité de la réparation	ΔV [v]											
		T1				T2				T3			
10	bonne	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
		>40	>40	>40	>40	>40	>40	>40	31.2	>40	>40	>40	>40
	mauvaise	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
		>40	>40	8.6	4.4	14.2	10.2	9.4	6.6	15.4	15	9.4	8.4
	combinée	10	20	30	40	50	60	70	80	90	10	20	30
		>40	>40	40	14	11.2	6.4	5.2	5	>40	>40	>40	>40
13	bonne	13	26	39	13	26	39	13	26	39	13	26	39
		>40	>40	>40	>40	>40	34.2	>40	>40	>40	>40	>40	
	mauvaise	13	26	39	13	26	39	13	26	39	13	26	39
		24	20.6	5.2	16.2	10.8	5	12	10	9.8			
	combinée	13	26	39	52	65	78	91	13	26	39	52	65
		>40	>40	>40	17.6	14.8	11	11	11	91	13	26	39
15	bonne	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45
		>40	>40	30	>40	>40	34.2	>40	>40	>40	>40	>40	
	mauvaise	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45
		40	26.8	19.2	16.2	10.8	5	12	10	9.8			
	combinée	15	30	45	60	75	90	15	30	45	60	75	90
		>40	>40	30	11.2	11	10	>40	>40	14.6	>40	>40	>40

Tableau III.7.a. Amplitude des signaux enregistrés sur les éprouvettes réparées par lamelles de fibres de carbone

Les amplitudes moyennes des trois éprouvettes, pour les pas de 10 et 15 cm, sont résumées dans les tableaux suivants :

Type	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Bonne	40 ± 0	40 ± 0	40 ± 0	37,7 ± 5					
Mauvaise	23,3 ± 15,56	21,73 ± 16	9,13 ± 0,46	6,47 ± 2					
Combinée	40 ± 0	40 ± 0	40 ± 0	37,4 ± 4,5	18,33 ± 8,2	12,4 ± 2,08	11,46 ± 6,36	10,13 ± 6,88	7,07 ± 3,58

Tableau II.7.b. Amplitudes moyennes sur les éprouvettes réparées par lamelles de fibres de carbone (pas 10 cm)

Type	15	30	45	60	75	90
Bonne	40	40	34,73			
Mauvaise	22,37	15,87	11,3			
Combinée	40	40 ± 0	37,73	19,73	18,2	10,93

Tableau II.7.c. Amplitudes moyennes sur les éprouvettes réparées par lamelles de fibres de carbone (pas 15 cm)

On remarque que les amplitudes (ΔV) des signaux sont fortement influencées par la qualité de la réparation. La diminution du signal reçu, entre un bon et une mauvaise réparation, varie de 42 % à 82 % pour les pas de 10 cm et de 43 % à 67 % pour les pas de 15 cm. Ceci conforte l'aptitude de l'utilisation des amplitudes des signaux pour caractériser la qualité de la réparation. Les signaux reçus le long de toute la poutre (combinée) montre aussi l'effet de la qualité de la réparation. Mais dans cette condition, l'effet du parcours entre l'émission et la réception influe aussi sur la diminution des signaux.

III.2.3. Eprouvettes réparées par tissus de fibres de carbone TFC

Les résultats des différentes vitesses sur les trois poutres réparées par des tissus composites de fibres de carbone sont résumés dans le tableau suivant :

Pas de mesure (cm)	Qualité de la réparation	V [cm/μ s] R ²			V _{moy.} [cm/μ s]
		T1	T2	T3	
10	bonne	0.370 <i>R</i> ² =0.997	0.356 <i>R</i> ² =0.996	0.323 <i>R</i> ² =0.981	0.350±0.024
	mauvaise	0.246 <i>R</i> ² =0.984	0.205 <i>R</i> ² =0.984	0.191 <i>R</i> ² =0.981	0.214±0.029
	combinée	0.273 <i>R</i> ² =0.984	0.324 <i>R</i> ² =0.974	0.326 <i>R</i> ² =0.968	0.308±0.030
13	bonne	0.391 <i>R</i> ² =0.994	0.359 <i>R</i> ² =0.988	0.336 <i>R</i> ² =0.997	0.362±0.028
	mauvaise	0.240 <i>R</i> ² =0.987	0.253 <i>R</i> ² =0.999	0.190 <i>R</i> ² =0.979	0.228±0.033
	combinée	0.275 <i>R</i> ² =0.995	0.326 <i>R</i> ² =0.964	0.313 <i>R</i> ² =0.970	0.305±11.7

15	bonne	0.414 $R^2=0.996$	0.368 $R^2=0.997$	0.312 $R^2=0.998$	0.403±0.027
	mauvaise	0.227 $R^2=0.997$	0.228 $R^2=0.998$	0.211 $R^2=0.990$	0.211±0.010
	combinée	0.264 $R^2=0.978$	0.294 $R^2=0.949$	0.308 $R^2=0.944$	0.289±0.022

Tableau III .8. Vitesses des ultrasons des éprouvettes réparées par tissu de fibres de carbone

Les vitesses dans les poutres bien réparées sont toujours supérieures aux vitesses dans celles avec un mauvaise réparation. Les différences sont respectivement de 27 %, 28% et 17 % pour les pas de mesure 10 cm, 13 cm et 15 cm. L'effet du pas de mesure conduit à une différence maximale de 1.5 % des vitesses mesurées, pour les poutres bien- réparées et 11% pour les poutres mal- réparées.

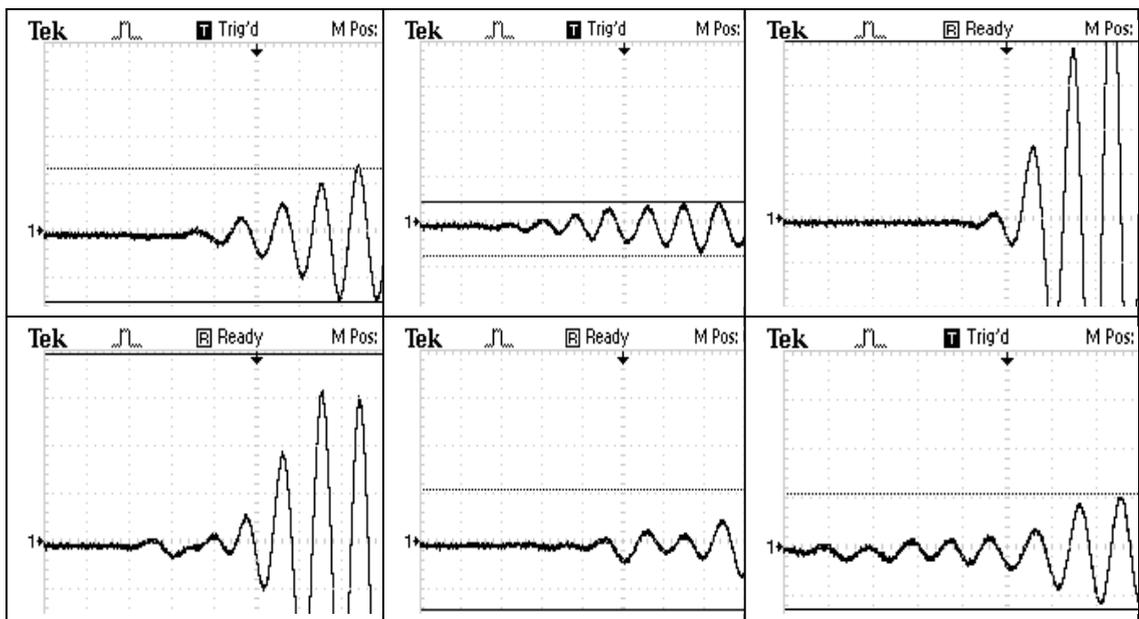


Figure III .12. Signaux enregistrés sur un profil sur l'éprouvette réparée par tissu de fibre de carbone

Pas de mesure (cm)	Qualité de la réparation	ΔV [v]											
		T1				T2				T3			
10	bonne	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
		>40	40	37.2	23.6	>40	>40	>40	27.8	>40	>40	40	35.2
	mauvaise	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
		13.2	6.8	5.2	4.8	13.8	5.4	5	4.8	6.2	4.4	3.8	3.4
	combinaison	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
		>40	40	37.2	23.6	>40	>40	>40	27.8	>40	>40	40	35.2
		10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
		13.2	6.8	5.2	4.8	13.8	5.4	5	4.8	6.2	4.4	3.8	3.4
		10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
		>40	40	37.2	23.6	>40	>40	>40	27.8	>40	>40	40	35.2
10		20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40	
>40		40	37.2	23.6	>40	>40	>40	27.8	>40	>40	40	35.2	
10		20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40	
>40		40	37.2	23.6	>40	>40	>40	27.8	>40	>40	40	35.2	
13	bonne	13	26	39	13	26	39	13	26	39			
		>40	40	27.6	>40	>40	30.2	>40	25.2	24.2			
	mauvaise	13	26	39	13	26	39	13	26	39			
		18.4	8	4	>40	>40	3.2	6.4	3.8	2			
	combinaison	13	26	39	13	26	39	13	26	39			
		>40	40	27.6	>40	>40	30.2	>40	25.2	24.2			
		13	26	39	13	26	39	13	26	39			
		18.4	8	4	>40	>40	3.2	6.4	3.8	2			
		13	26	39	13	26	39	13	26	39			
		>40	40	27.6	>40	>40	30.2	>40	25.2	24.2			
13		26	39	13	26	39	13	26	39				
18.4		8	4	>40	>40	3.2	6.4	3.8	2				
13		26	39	13	26	39	13	26	39				
>40		40	27.6	>40	>40	30.2	>40	25.2	24.2				
15	bonne	15	30	45	15	30	45	15	30	45			
		>40	40	19.6	>40	39.5	9	>40	40	30.2			
	mauvaise	15	30	45	15	30	45	15	30	45			
		14.2	6	5.2	7.8	6.8	6	5.2	3.8	3			
	combinaison	15	30	45	15	30	45	15	30	45			
		>40	40	19.6	>40	39.5	9	>40	40	30.2			
		15	30	45	15	30	45	15	30	45			
		14.2	6	5.2	7.8	6.8	6	5.2	3.8	3			
		15	30	45	15	30	45	15	30	45			
		>40	40	19.6	>40	39.5	9	>40	40	30.2			
15		30	45	15	30	45	15	30	45				
14.2		6	5.2	7.8	6.8	6	5.2	3.8	3				
15		30	45	15	30	45	15	30	45				
>40		40	19.6	>40	39.5	9	>40	40	30.2				

Tableau III.9.a. Amplitudes enregistrés sur les éprouvettes réparées par tissu de fibre de carbone

Type	15	30	45	60	75	90
Bonne	40	39,83	19,6			
Mauvaise	9,07	5,53	4,73			
Combinée	40	39,6	19,6	12,33	9,73	6,5

Tableau II.9.b. Amplitudes moyennes sur les éprouvettes réparées par tissus de fibre en carbone (pas 15 cm)

La diminution du signal reçu, entre un bon et un mauvais renforcement, varie de 75 % à 86 % pour ces pas de 15 cm. On remarque cette diminution est beaucoup moins sensible à la position du transducteur de réception.

III.2.4. Eprouvettes réparées par du béton

Les résultats des différentes vitesses sur les trois poutres réparées par du béton sont résumés dans le tableau suivant :

Pas de mesure (cm)	Qualité de la réparation	V [cm/μ s]			Vmoy. [cm/μ s]
		T1	T2	T3	
10	bonne	0.339 <i>R²=0.940</i>	0.379 <i>R²=0.991</i>	0.312 <i>R²=0.993</i>	0.343±0.034
	mauvaise	0.194 <i>R²=0.983</i>	0.342 <i>R²=0.969</i>	0.273 <i>R²=0.987</i>	0.270±0.074
	combinée	0.203 <i>R²=0.983</i>	0.203 <i>R²=0.983</i>	0.318 <i>R²=0.989</i>	0.241±0.066
13	bonne	0.375 <i>R²=0.987</i>	0.364 <i>R²=0.998</i>	0.385 <i>R²=0.998</i>	0.375±0.011
	mauvaise	0.220 <i>R²=0.979</i>	0.376 <i>R²=0.999</i>	0.309 <i>R²=0.991</i>	0.302±0.078
	combinée	0.226 <i>R²=0.991</i>	0.226 <i>R²=0.991</i>	0.355 <i>R²=0.989</i>	0.269±0.074
15	bonne	0.315 <i>R²=0.997</i>	0.315 <i>R²=0.997</i>	0.398 <i>R²=0.998</i>	0.343±0.048
	mauvaise	0.214 <i>R²=0.951</i>	0.214 <i>R²=0.951</i>	0.285 <i>R²=0.989</i>	0.238±0.041
	combinée	0.221 <i>R²=0.976</i>	0.221 <i>R²=0.976</i>	0.370 <i>R²=0.989</i>	0.271±0.086

Tableau II.10. Vitesses des ultrasons des éprouvettes réparées par du béton

Les vitesses dans les poutres bien réparées sont supérieures à celles avec une mauvaise réparation. Les différences sont respectivement de 27 %, 24% et 44 % pour les pas de mesure 10 cm, 13 cm et 15 cm. Si pour les premiers pas (10 et 13 cm), l'effet du pas de mesure est le même que les deux réparations avec des fibres de carbone, on a une plus grande différence pour le pas de 15 cm.

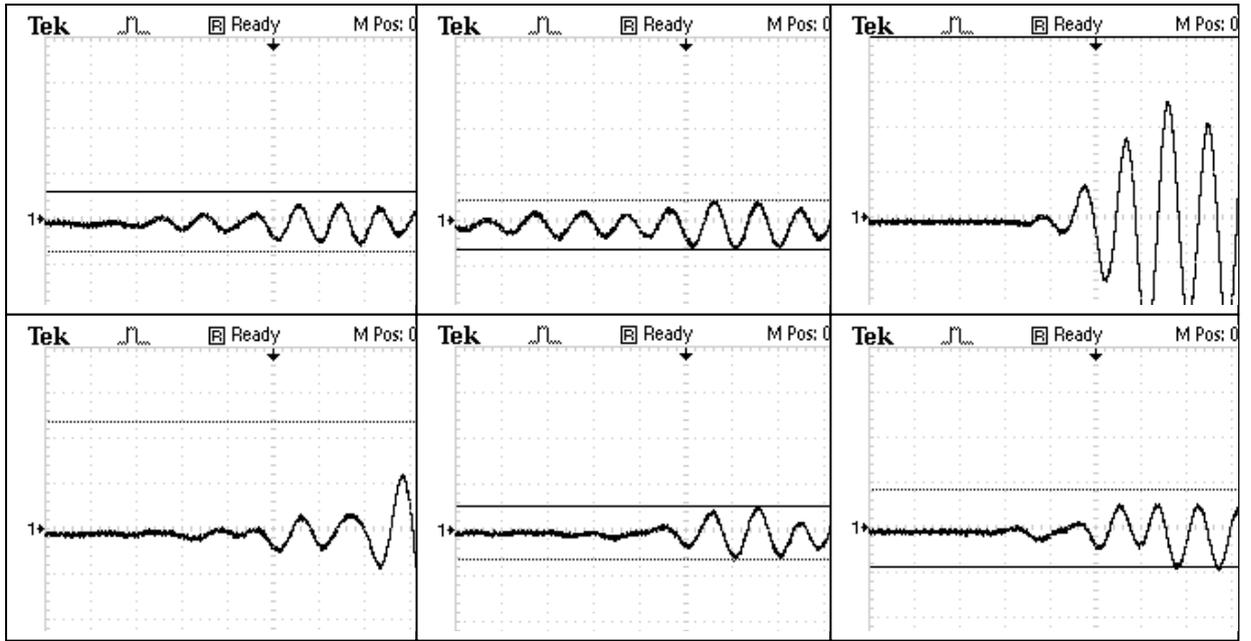


Figure. II. 13 . Signaux enregistrés sur un profil sur les éprouvettes réparées par béton

$\Delta V [v]$																										
T1									T2							T3										
10		20		30		40		10		20		30		40		10		20		30		40				
27		13.4		11.8		9.8		9		6.8		5		4.6		12.8		11.6		4.6		4.6				
10		20		30		40		10		20		30		40		10		20		30		40				
10.4		8		8		7.6		16.2		9.6		9.2		8.8		6.4		5.4		4.8		4.8				
10	20	30	40	50	60	70	80	90	10	20	30	40	50	60	70	80	90	10	20	30	40	50	60	70		
27	13.4	11.8	9.8	8	6	4.6	4.6	3.6	9	6.8	5	4.6	4.6	4.4	3.8	3.8	3.4	12.8	11.6	4.6	4.6	4.4	4.4	3.8		
13		26		39			13	26		39			13	26		39										
40		27.2		16.2			17.2		16.8		13.2			39.6		36.4		19								
13		26		39			13	26		39			13	26		39										
9		7.4		7			33.8		26.8		17.8			6		4		4								
13	26	39	52	65	78	91		13	26	39	52	65	78	91		13	26	39	52	65	78					
40	27.2	16.2	12.2	10.6	9	8.6		17.2	16.8	13.2	11.4	9.2	9.2	7.8		39.6	36.4	19	16.6	10.2	9.6					
15		30		45			15	30		45			15	30		45										
40		23.8		11.6			32.2		12.6		10.2			39.8		23.6		14.8								
15		30		45			15	30		45			15	30		45										
6.6		5.4		4.2			9.2		8.8		8.8			5.4		5		4.4								
15	30	45	60	75		90		15	30	45	60	75	90		15	30	45	60	75	90						
40	23.8	11.6	8.6	7.6		7.2		32.2	12.6	10.6	10.2	10	6.2		39.8	23.6	14.8	13.6	13.6	9.4						

Tableau. III. 11.a. Amplitudes des signaux enregistrés sur les éprouvettes renforcées par du béton

Type	15	30	45	60	75	90
Bonne	37,33	20	12,2			
Mauvaise	7,07	6,4	5,97			
Combinée	37,33	20	12,33	10,8	10,37	7,53
Type	15	30	45	60	75	90
Bonne	37,33	20	12,2			
Mauvaise	7,07	6,4	5,97			
Combinée	37,33	20	12,33	10,8	10,37	7,53

Tableau III.11.b. Amplitudes moyennes sur les éprouvettes réparées par béton (pas 15cm)

La diminution du signal reçu, entre un bon et une mauvaise réparation par du béton, varie de 49 % à 81 % pour les pas de 15 cm. On remarque que même dans la partie bien réparée

l'amplitude du signal diminue. Cet effet est constaté dans la poutre témoin dû au parcours entre l'émission et la réception (absorption et dispersion du signal).

III.2.5. Eprouvettes réparées par tissu de fibres de verre

Les résultats des différentes vitesses sur les trois poutres réparées par du tissu de fibres de verre sont résumés dans le tableau suivant :

Pas de mesure (cm)	Qualité de la réparation	V [cm/μ s] R ²			Vmoy. [cm/μ s]
		T1	T2	T3	
10	bonne	0.388 <i>R</i> ² =0.998	0.361 <i>R</i> ² =0.995	0.363 <i>R</i> ² =0.997	0.371 ±0.015
	mauvaise	0.310 <i>R</i> ² =0.986	0.322 <i>R</i> ² =0.993	0.208 <i>R</i> ² =0.925	0.280 ±0.063
	combinée	0.273 <i>R</i> ² =0.979	0.308 <i>R</i> ² =0.990	0.309 <i>R</i> ² =0.990	0.297 ±0.021
13	bonne	0.341 <i>R</i> ² =0.998	0.328 <i>R</i> ² =0.999	0.363 <i>R</i> ² =0.997	0.344 ±0.018
	mauvaise	0.300 <i>R</i> ² =0.983	0.287 <i>R</i> ² =0.998	0.208 <i>R</i> ² =0.925	0.265 ±0.05
	combinée	0.274 <i>R</i> ² =0.974	0.377 <i>R</i> ² =0.996	0.361 <i>R</i> ² =0.999	0.337 ±0.055
15	bonne	0.336 <i>R</i> ² =0.999	0.356 <i>R</i> ² =0.999	0.368 <i>R</i> ² =0.991	0.353 ±0.016
	mauvaise	0.271 <i>R</i> ² =0.952	0.322 <i>R</i> ² =0.996	0.337 <i>R</i> ² =0.997	0.310 ±0.035
	combinée	0.266 <i>R</i> ² =0.976	0.332 <i>R</i> ² =0.997	0.328 <i>R</i> ² =0.991	0.309 ±0.037

Tableau III.12. Vitesses des ultrasons des éprouvettes réparées par du tissu de fibres de verre

Les vitesses dans les poutres bien réparées sont toujours supérieures aux vitesses dans celles avec une mauvaise réparation. Les différences sont respectivement de 32 %, 30% et 14 % pour les pas de mesure 10 cm, 13 cm et 15 cm. L'effet du pas de mesure conduit à une différence, des vitesses mesurées, 8% pour les poutres bien réparées et 17% pour les poutres mal réparées.

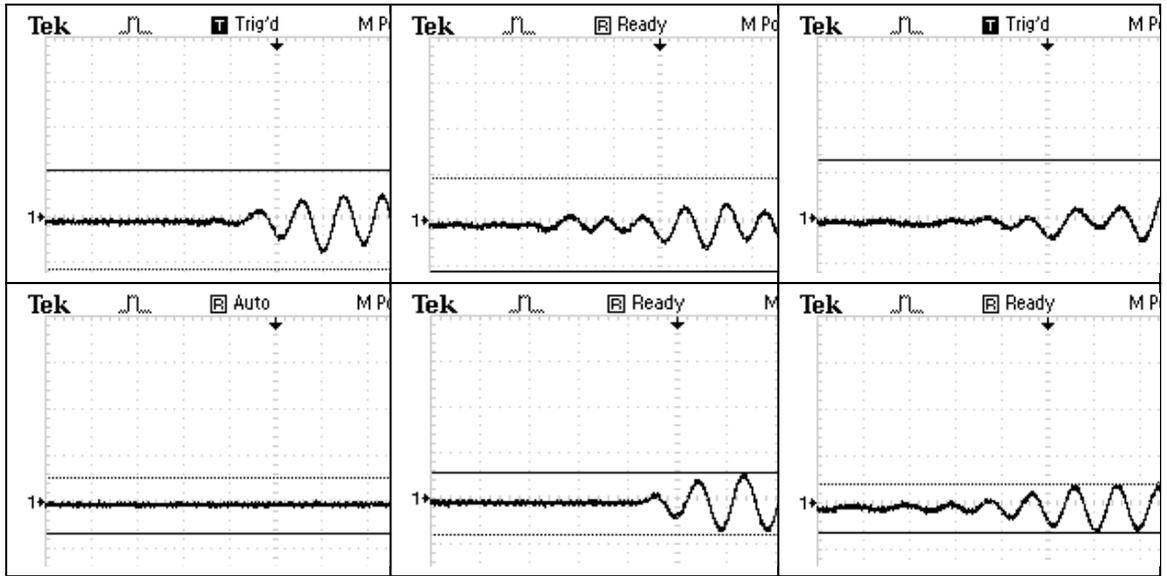


Figure. II. 14 . Exemples des signaux enregistrés sur les éprouvettes réparées par du tissu de fibres de verre

Pas de mesure (cm)	Qualité de la réparation	ΔV [v]																
		T1				T2				T3								
10	bonne	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40					
		>40	11.8	10.2	9.8	37.6	24.4	21	19.6	38	30	25	20					
	mauvaise	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40					
		6	6	00	00	8.8	8.6	6.8	6.8	9.2	8.7	7.2	4.4					
combinée	10	20	30	40	50	60	70	80	90	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	>40	11.8	10.2	9.8	5	3.8	3.8	2.2	2	37.6	24.4	20.4	37.6	20.4	19.6	18	14.8	4.8
13	bonne	13	26	39	13	26	39	13	26	39	13	26	39					
		23.8	12.8	6	>40	>40	29.4	36	29	20.4								
	mauvaise	13	26	39	13	26	39	13	26	39								
		20	15.2	00	23.2	16	4.6	9	7.8	7.2								
combinée	13	26	39	52	65	78	91	13	26	39	52	65	78	91				
	23.8	12.8	6	6	5.2	4.2	3.6	>40	>40	29.4	19.6	19.2	12.4	7.2				
15	bonne	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45					
		11	10.2	5.6	29	20	12	36	25	18.2								
	mauvaise	15	30	45	15	30	45	15	30	45								
		14.6	00	00	19.8	11.8	6.8	7.2	6.3	4.6								
combinée	15	30	45	60	75	90	15	30	45	60	75	90						
	11	10.2	5.6	6.8	4	3.8	29	20	12	7.8	7	4.8						
combinée	15	30	45	60	75	90	15	30	45	60	75	90						
	36	25	18.2	16.6	7.6	4.2	36	25	18.2	16.6	7.6	4.2						

Tableau III.13.a. Amplitudes des signaux enregistrés sur les éprouvettes réparées par du tissu de fibres de verre

Type	15	30	45	60	75	90
Bonne	25,33	18,4	11,93			
Mauvaise	13,87	6,03	5,47			
Combinée	25,33	22,07	11,93	10,04	6,2	4,27

Tableau III.13.b. Amplitudes moyennes sur les éprouvettes réparées par tissu de fibres de verre (pas 15 cm)

Si la bonne réparation présente des amplitudes supérieures à celles de la mauvaise réparation, on remarque que les amplitudes des signaux diminuent plus rapidement avec l'augmentation de la position du récepteur que les autres types de réparation. Il y'a aussi une plus grande dispersion des résultats. On pense que le mode de mise en oeuvre des tissus en fibres de verre influence ces résultats. En plus de la couche de colle sur le support, le tissu est complètement imprégné de résine.

III.3. Essais destructifs : mesure de la force d'arrachement

Type \ Qualité	Lamelles fibres de carbone LFC	Tissu fibres de carbone TFC	béton	Tissu fibres de verre TFV
Bonne	7857 ± 983 N	8593 ± 160 N	6097 ± 690 N	7293 ± 1252 N
Mauvaise	3223 ± 258 N	5133 ± 707 N	5477 ± 546 N	2617 ± 1475 N

Tableau II. 14. Forces moyennes d'arrachement des éprouvettes réparées par différents matériaux

Nous remarquons que les forces d'arrachement dans les poutres bien réparées sont toujours supérieures à celles des poutres dont la réparation a été négligée. Cette différence varie d'un type de réparation à un autre. Le rapport des deux forces est de 2.45 pour les lamelles de fibres de carbone, 1.67 pour les tissus de fibres de carbone, 1.11 pour le béton et 2.77 pour les tissus de fibres de verre.

La différence entre les deux types de réparation est beaucoup plus importante dans le cas de la réparation par les lamelles que dans les autres cas. L'imprégnation des TFC et de TFV par la colle augmente l'adhésion du matériau avec le béton.

La valeur maximale de résistance à l'arrachement est obtenue par la réparation avec du TFC mais les résistances restent voisines pour les trois types de matériaux composites où la différence ne dépasse pas les 18%. La réparation par du béton présente une diminution plus importante (plus de 40% par rapport au TFC).

III.4. Relations entre la vitesse des ultrasons et la force d'arrachement

L'ensemble des résultats des vitesses des ultrasons et des forces d'arrachement est résumé par le tableau III.15.

Qualité	Type	LFC	TFC	Béton	TFV
Bonne	V (m/s)	3993	3717	3537	3560
	F (N)	7857	8593	6097	7293
Mauvaise	V (m/s)	3230	2177	2700	2850
	F (N)	3223	5133	5477	2617

Tableau II.15. Relations entre les vitesses des ultrasons et les forces d'arrachement

Les résultats montrent bien la proportionnalité entre les vitesses des ultrasons et les forces d'arrachement pour les poutrelles bien réparées. Les relations des poutrelles mal réparées présentent des relations beaucoup plus dispersées. La non répétitivité de la mise en œuvre des mauvaises réparations serait la cause, surtout dans le cas des tissus et du béton.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette étude expérimentale pour la contribution au diagnostic des réparations minces des bétons par les ultrasons. Pour atteindre ces objectifs, l'étude a été scindée en deux parties :

La première partie concernant la synthèse bibliographique nous a permis de faire un état des connaissances sur la pathologies et durabilité des ouvrages en béton ainsi que les matériaux composites dans le génie civil et les différentes méthodes de contrôle des ouvrages.

Dans la deuxième partie, nous nous sommes attelées à un travail d'expérimentation sur la relation entre l'évolution des vitesses des ondes de surface ultrasoniques, les atténuations des amplitudes des signaux ainsi que les forces d'arrachement en relation avec la qualité des réparations par quatre types de matériaux (Lamelles en Fibres de Carbone LFC, Tissus en Fibres de Carbone TFC, Tissus en Fibres de Verre TFV et béton).

Les résultats obtenus dans cette étude nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

Les vitesses dans les poutrelles bien réparées par les LFC sont toujours supérieures aux vitesses dans celles avec une mauvaise réparation. Les différences sont respectivement de 31 %, 28% et 10 % pour les pas de mesure 10 cm, 13 cm et 15 cm. L'effet du pas de mesure conduit à une différence maximale, des vitesses mesurées, de 1.5% pour les poutres bien-réparées et 12% pour les poutres mal- réparées. Les poutres réparées par TFC présentent des évolutions des vitesses très similaires à celles avec des LFC.

Les vitesses dans les poutrelles réparées par TFV sont toujours supérieures aux vitesses dans celles avec une mauvaise réparation. Les différences sont respectivement de 32 %, 30% et 14 % pour les pas de mesure 10 cm, 13 cm et 15 cm. L'effet du pas de mesure conduit à une différence, des vitesses mesurées, 8% pour les poutrelles bien réparées et 17% pour les poutres mal réparées.

Dans le cas de réparation par du béton, les différences entre les deux types de réparation sont respectivement de 27 %, 24% et 44 % pour les pas de mesure 10 cm, 13 cm et 15 cm. Si pour les premiers pas (10 et 13 cm), l'effet du pas de mesure est le même que les réparations par les matériaux composites, on a une plus grande différence pour le pas de 15 cm.

On remarque que les amplitudes (ΔV) des signaux sont fortement influencées par la qualité de réparation. La diminution du signal reçu, entre une bonne et un mauvaise réparation dans le cas des LFC, varie de 42 % à 82% pour les pas de 10 cm et de 43 % à 67 % pour les pas de 15 cm. Les signaux reçus le long de toute la poutre (combinée) montre aussi l'effet de la qualité de la réparation. Mais dans cette condition, l'effet du parcours entre l'émission et la réception influe aussi sur la diminution des signaux.

La diminution du signal reçu dans les poutrelles avec TFC, entre une bon et une mauvaise réparation, varie de 75 % à 86 % pour les pas de 15 cm. On remarque cette diminution est beaucoup moins sensible à la position du transducteur de réception.

Si la bonne réparation par TFV présente des amplitudes supérieures à celles de la mauvais réparation, on remarque que les amplitudes des signaux diminuent plus rapidement avec l'augmentation de la position du récepteur que les autres types de la réparation.

La diminution du signal reçu, entre un bonne et une mauvaise réparation par béton, varie de 49 % à 81 % pour les pas de 15 cm. On remarque que même dans la partie bien réparée l'amplitude du signal diminue. Cet effet est constaté dans la poutre témoin dû au parcours entre l'émission et la réception (absorption et dispersion du signal).

Les essais destructifs par arrachement de la réparation confirment la supériorité des forces d'arrachement dans les poutres bien réparées à celles des poutres dont la réparation a été négligé. Cette différence varie d'un type de réparation à un autre. Le rapport des deux forces est de 2.45 pour les lamelles de fibres de carbone, 1.67 pour les tissus de fibres de carbone, 1.11 pour le béton et 2.77 pour les tissus de fibres de verre.

La différence entre les deux types de réparation est beaucoup plus importante dans le cas de la réparation par les lamelles que dans les autres cas. L'imprégnation des TFC et de TFV par la colle augmente l'adhésion du matériau avec le béton. La valeur maximale de résistance à l'arrachement est obtenue par la réparation TFC mais les résistances restent voisines pour les trois types de matériaux composites où la différence ne dépasse pas les 18%. La réparation par béton présente une diminution plus importante (plus de 40% par rapport au TFC). Les résultats montrent aussi que les vitesses des ultrasons et les forces d'arrachement pour les poutrelles bien réparées évoluent dans le même sens. Les relations dans les poutrelles mal réparées présentent des relations beaucoup plus dispersées.

Ce travail expérimental conforte l'aptitude de l'utilisation des vitesses et des amplitudes des signaux ultrasoniques pour caractériser la qualité de la réparation.

Perspectives

Les perspectives envisageables à cette étude concerneront surtout les points suivants :

- ❖ Une étude statistique plus riche (nombre d'éprouvettes testées).
- ❖ Plusieurs variantes pour l'épaisseur de la colle .
- ❖ Variation des bétons (compositions).
- ❖ Influence de l'humidité (milieu environnant).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: V.G. PARADAKIS, M.N. FARDIS and CGVAYENAS, Effet of composition environmental Racteur and ciment- line mortar coating on concrete carbonation materials and structures (1992) pp293-304.
- [2]: GEORGE DREUX, JEAN FESTA, nouveau guide du béton et de ses constituantes 8 éditions EYROLLE p201-202.
- [13]: J. BARON and J-P OLLIVIER EDS : la durabilité des bétons (press national de ponts et chausse 1992). 456pp
- [4]: T.C. POWERS and H.H. STEMOUR, an iterpretation of ruplished researches on the alkali aggregat reaction J. amer inst, (feb 1955) ,51pp.497-516 and (april 1955) pp785-811.
- [5]: HE Vivian, studies in ciment -aggregate reaction: X. the effect on mortar expansion of amount of reactive compenent commenwealth scientifique and industriel research organisation (Melbourne 1950) Bull NO 2569913-20.
- [6]: Rehabilitation du BA dégradé par la corrosion -document scientifique et technique AFGC et CEFRACOR PP11-12.13-14.
- [7]: POINEAU (D) La précontrainte dans les travaux de réparation et de renforcement des ponts annales FEVRIER 1992 ITBTPn° 501 P43-84.
- [8]: P. HAMELIN. Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites. Techniques de l'Ingénieur, 2002, traité Plastiques et Composites.
- [9]: P. BARDONNET. Résines époxydes : composants et propriétés. Techniques de l'ingénieur, 1992, traité Plastiques et Composites.
- [10]: L. WU, S.V. HOA, M.T. TON-THAT. Effects of water on the curing and properties of epoxy adhesive used for bonding FRP composite sheet to concrete. Journal of applied polymer science, 2004, vol.92, pp.2261-2268.
- [11]: F. MICELLI, A. NANNI. Durability of FRP rods for concrete structures. Construction and building materials, 2004, vol.18, pp. 491-503.
- [12]: K.L. LITHERLAND, D.R. OAKLEY, B.A. PROCTOR. The use of accelerated ageing procedures to predict the long term strength of GRC composites. Cement and concrete research, 1981, vol.11, pp. 455-466.
- [13]: J.W. CHIN, K. AOUDI, T. NGUYEN. Effects of environmental exposure on fiber reinforced plastic materials used in construction. Journal of composites technology & research, 1997, vol.19, n°4, pp. 205-213.
- [14]: S. ZHANG, V.M. KARBHARI. Effects of alkaline environment on the durability of e-glass fiber composites for use in civil infrastructure. In : Proceedings of the 14th technical conference, September 27,29 1999, Dayton, USA.
- [15] A.M VAYSBURD. Interfacial bond and surface preparation in concrete repair. The Indian Concrete Journal, janvier 2001.
- [16] A.H CARDON, C.C HIEL. Durability analysis of adhesive joints. In : Colloque RILEM, Adhesion between polymers and concrete - bonding, protection, repair, 16-19 sept. 1986, Aix en Provence, pp. 3-7.
- [17] H. TOUTANJI, G. ORTIZ. The effect of surface preparation on the bond interface between FRP sheets and concrete members. Composite structures, vol.53, 2001, pp 457-462.
- [18] H.R. SASSE, M. FRIEBRICH. Bonding of polymer materials to concrete. Technical Committes, 1983, pp 293-301.

- [19] D. PRIN. Les interactions physico-chimiques des polymères avec les matériaux hydrauliques. Séminaire AFREM, Les matériaux composites pour le renforcement des ouvrages en béton armé et béton précontraint, 21 mars 1996.
- [20] K.S. YEON, Y.S. LEE, K.Y. JI. Adhesion properties of polymer composite materials for concrete repair. In : Colloque RILEM, Adhesion between polymers and concrete, 14-17 sept. 1999, Dresden, Germany, pp. 339-347.
- [21] A.M. PAILLÈRE, J.L. SERRANO, J.L. AGUIAR, R. LAMOURI, Influence de la nature et de la granularité de la charge sur l'adhérence des résines époxydes au béton durci sec et humide. In : Colloque RILEM, Adhesion between polymers and concrete – bonding, protection, repair, 16-19 sept. 1986, Aix en Provence, pp. 484-502.
- [22] D. MAUGIS, M. BARQUINS. Adhésion, collage et mécanique de la rupture. Colloque RILEM, Adhesion between polymers and concrete – bonding, protection, repair 16-19 sept. 1986, Aix en Provence, pp. 41-54.
- [23] Miller G.F., Pursey H., 1955. *On the partition of energy between elastic waves in a semi infinite solid*. Proceeding of the Royal Society, London, Serie A, Vol.233, pp. 55-69.
- [24] : R.Dupain, R.Lanchon, J-C.Saint.Arroman, Editions Casteilla.
- [25] : R. Jones and Facaoaru « Testing of concrete by the ultrasonic pulse method . materials and structures», vol.2,N.10, July-August 1969,P 253-661.
- [26] L.C HOLLAWAY, M.B LEEMING. Strengthening of reinforced concrete structures. Woodhead publishing limited, Cambridge, 1999, 327 pages.

-Bilan financier par rubrique

-Taux de consommation

<i>Intitulés des postes de dépenses par année</i>	1 ^{ère}	2 ^{ème}	Taux de consommation
Frais de séjour scientifique et de déplacement à l'étranger	150000,00	200000,00	20 %
Frais de séjour scientifique et de déplacement en Algérie	50000,00	50000,00	0%
Frais d'organisation de rencontres scientifiques	0,00		
Honoraires des enquêteurs	0,00		
Honoraires des guides	0,00		
Frais de travaux et de prestations	20000,00	10000,00	0%
Matériels et instruments scientifiques	0,00		
Matériel informatique	300000,00		100%
Matériels d'expérience (animaux, végétaux, etc..)	0,00		
Mobilier de bureau et de laboratoire	0,00		
Entretien et réparation	20000,00		0%
Produits chimiques	80000,00	10000,00	100%
Produits consommables	150000,00	90000,00	
Composants électroniques, mécaniques et audio- visuels	200000,00	50000,00	100%
Accessoires et consommables informatiques	30000,00	20000,00	100%
Papeterie et fournitures de bureau	20000,00	10000,00	100%
Périodiques	0,00		
Ouvrages et documentation scientifiques et techniques	30000,00	10000,00	100%
Logiciels	0,00		
Impression et Edition	0,00		
Affranchissements Postaux	0,00		
Communications téléphoniques, Fax, Internet	0,00		
Droits de douanes, Assurances	0,00		
Carburant	0,00		
TOTAL DES CREDITS OUVERTS :	1050000,00	450000,00	72,33%

-Contraintes rencontrées : Retard dans le dégageant du budget, la complexité des opérations d'achat des petits équipements et des matériaux, surtout si les quantités ne sont pas importantes.