



**HAL**  
open science

# Collage structural et matériaux composites pour les structures de génie civil: contributions théoriques et applications

Sylvain Chataigner

► **To cite this version:**

Sylvain Chataigner. Collage structural et matériaux composites pour les structures de génie civil: contributions théoriques et applications. Génie civil. Université de Paris-Est, 2016. tel-01400040

**HAL Id: tel-01400040**

**<https://hal.science/tel-01400040v1>**

Submitted on 21 Nov 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# UNIVERSITÉ — — PARIS-EST

## MEMOIRE

*Présenté pour l'obtention de*  
l'Habilitation à Diriger des Recherches de l'Ecole Doctorale Sciences, Ingénierie,  
Environnement de l'Université Paris-Est

*Spécialité : Génie Civil*

Sujet du mémoire :

## **Collage structural et matériaux composites pour les structures de génie civil : contributions théoriques et applications**

*Présenté par :*  
**Sylvain CHATAIGNER**

Soutenue le 26 Septembre 2016

Composition du jury :

<b>Brahim BENMOKRANE</b>	Rapporteur
<b>Emmanuel FERRIER</b>	Rapporteur
<b>Nathalie GODIN</b>	Rapporteur
<b>Karim BENZARTI</b>	Examineur
<b>Romain CREAC'HCADEC</b>	Examineur
<b>Yvon GICQUEL</b>	Examineur
<b>Frédéric JACQUEMIN</b>	Examineur
<b>Jean-François CARON</b>	Directeur de l'habilitation



# RÉSUMÉ

Ce mémoire présenté pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches est composé de deux parties distinctes : un résumé de ma carrière professionnelle mettant en avant mes activités de recherche dans les différents postes que j'ai pu occuper, et les principales thématiques de recherche auxquelles je m'intéresse ; et une partie scientifique qui décrit plus précisément le contenu de mes recherches dans des domaines liés à l'utilisation des matériaux composites et du collage structural en génie civil et plus récemment au contrôle non destructif et au monitoring des assemblages et des structures. Ce mémoire fait état de projets finalisés, mais décrit également des travaux en cours et préfigure la suite de mes travaux de recherche.

La description de ma carrière professionnelle permet de mettre en relief un des aspects particuliers de mon profil puisque j'ai eu la chance d'être confronté au terrain en étant responsable de programme de contrôle d'opération de renforcements par composites collés d'ouvrages en béton. Cette expérience, et mon insertion au sein de laboratoires réalisant des activités d'essais COFRAC de caractérisation des matériaux du génie civil (béton au laboratoire d'Autun et armatures métalliques à l'IFSTTAR) m'ont permis de mener des travaux de recherche appliqués proches des problématiques rencontrées sur site. Ayant commencé ma carrière de chercheur par un travail de thèse sur la caractérisation et l'optimisation du collage structural au laboratoire Navier (Ecole des Ponts), j'ai eu la chance de pouvoir continuer à développer mes travaux sur ce thème au laboratoire d'Autun pour l'application des renforcements par composites collés de structures en béton mais aussi celle des structures mixtes bois-béton connectées par collage structural. Mon arrivée au laboratoire SMC à l'IFSTTAR m'a ensuite permis de continuer à étudier le thème du renforcement des structures par collage pour le cas des structures métalliques. Ce nouveau poste m'a également permis de commencer à aborder le sujet de l'utilisation des armatures composites en remplacement des armatures métalliques dans le béton, mais aussi de me confronter à l'utilisation de nouvelles méthodes de contrôle non destructif et de monitoring d'assemblages et de structure. Pour chacun de ces sujets, ce mémoire introduit la problématique et les enjeux de mes travaux, décrit les principales investigations menées et leurs résultats et introduit les travaux en cours ou qu'il reste à mener.

*Mots clefs* : Collage structural, Matériaux composites, Assemblages, Génie civil.



# ABSTRACT

This report dedicated to the obtention of the HDR (Habilitation à Diriger des Recherches) is composed of two parts : the first one summarizes my professional experience highlighting my research activities and the main subjects I have been interested in ; the second one is more scientific and describes more precisely the content of my research activities on the use of composite materials and structural adhesive bonding in civil engineering, and more recently, on the topic of nondestructive control and monitoring techniques. This report includes finalized studies, but also research currently in progress and gives some clues on possible future research activities.

My professional experience description allows giving specifications on my profile as I had the chance to lead on site activities on the control of adhesively bonded composite reinforcement on concrete structures. This experience in addition with my insertion in laboratories having activities related to civil engineering material certification (concrete in the laboratory of Autun and steel rebar and strands in IFSTTAR) allowed me to lead research studies directly connected to problems encountered on site. Having started my research experience by a Phd thesis on the characterization and the optimization of structural adhesively bonded joints in the laboratory Navier (Ecole des Ponts), I had the chance to continue working on that topic in the laboratory of Autun for the application of adhesively bonded composite reinforcements on concrete structures and the realization of composite wood to concrete structures connected by bonding. Then, my arrival in the laboratory SMC at IFSTTAR allowed me to continue working on the topic of adhesively bonded composite reinforcement applying the technique on steel structures. It also gave me the chance to start working on the use of composite rebar for the reinforcement of concrete in replacement of classical steel rebars, but also to initiate activities related to the use of new nondestructive control and monitoring techniques on structures and mechanical assembly. For each of these topics, this report introduces the stakes of my activities, describes the main led investigations and their results, and gives insight of the works still in progress or that should be carried out.

*Key words* : Structural adhesive bonding, composite materials, Assembly, Civil engineering.



# Table des matières

<b>I</b>	<b>Introduction générale et parcours professionnel</b>	<b>1</b>
	<b>Introduction générale</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Parcours professionnel</b>	<b>5</b>
1.1	Formation initiale et parcours professionnel . . . . .	6
1.2	Enseignement . . . . .	8
1.3	Structuration de mes activités de recherche . . . . .	9
1.4	Encadrements et publications . . . . .	10
1.5	Participation et animation de projets de recherche . . . . .	13
1.6	Collaboration et participation à des groupements scientifiques . . . . .	14
1.7	Développement, acquisition de matériels d'essais . . . . .	17
1.8	Conclusion et introduction de la partie scientifique . . . . .	18
<b>II</b>	<b>Synthèse scientifique</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>Présentation du collage structural dans le cas d'applications dans le domaine du génie civil</b>	<b>21</b>
2.1	Revue des typologies d'assemblage rencontrées en génie civil . . . . .	22
2.2	Quelques éléments sur le transfert mécanique des efforts par collage structural . .	24
2.2.1	Eléments généraux sur le collage structural . . . . .	24
2.2.2	Transfert des efforts dans le cas d'un comportement élastique . . . . .	25
2.2.3	Transfert des efforts dans le cas d'un comportement non linéaire . . . . .	27
2.2.4	Utilisation des modèles LS1 pour la modélisation des assemblages collés .	29
2.3	Travaux sur l'optimisation de ce transfert d'efforts . . . . .	31
2.3.1	Revue bibliographique des solutions étudiées pour optimiser le transfert des efforts par collage . . . . .	31
2.3.2	Proposition de la géométrie d'ancrage courbe . . . . .	32
2.3.3	Description et résolution d'un modèle de type LS1 développé dans le cas de la géométrie courbe . . . . .	34
2.4	Conclusions et perspectives . . . . .	36

---

<b>3</b>	<b>Le cas du renforcement des structures en béton par composites collés</b>	<b>39</b>
3.1	Etat de l'art sur le renforcement de structures en béton par composites collés . . .	40
3.2	Caractérisation du transfert des efforts . . . . .	42
3.2.1	Présentation du dispositif d'essai à simple recouvrement et des principaux résultats de l'essai . . . . .	42
3.2.2	Proposition de la méthode d'exploitation basée sur l'utilisation d'un modèle de zone cohésive . . . . .	44
3.3	Optimisation de l'ancrage . . . . .	46
3.4	Durabilité du transfert des efforts par collage . . . . .	48
3.4.1	Durabilité environnementale . . . . .	48
3.4.2	Fluage . . . . .	52
3.5	Conclusion et perspectives . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Le cas du renforcement des structures métalliques par composites collés</b>	<b>57</b>
4.1	Etat de l'art sur la thématique . . . . .	58
4.2	Caractérisation du transfert des efforts entre renfort composite et métal . . . . .	60
4.2.1	Influence de la préparation de surface . . . . .	60
4.2.2	Comparaison entre adhérent béton et acier . . . . .	60
4.2.3	Collage sur matériaux anciens et utilisation de renforts composites à haut module . . . . .	62
4.3	Durabilité de l'assemblage . . . . .	63
4.3.1	Durabilité environnementale . . . . .	63
4.3.2	Fatigue . . . . .	65
4.4	Efficacité du renforcement vis-à-vis de la problématique de la fatigue . . . . .	65
4.5	Conclusion et perspectives . . . . .	68
<b>5</b>	<b>Le cas des structures mixtes assemblées par collage</b>	<b>69</b>
5.1	Contexte sur la thématique des structures mixtes assemblées par collage . . . . .	70
5.2	Caractérisation du transfert des efforts par collage entre bois et béton . . . . .	71
5.2.1	Mise au point de l'essai dit Push-Out au laboratoire d'Autun . . . . .	71
5.2.2	Importance de la raideur de la résine structurale utilisée sur le comportement global de la structure mixte . . . . .	73
5.2.3	Réalisation d'essais Push-Out avec différents types de résines d'assemblage . . . . .	74
5.3	Investigations concernant la durabilité de la solution . . . . .	77
5.4	Conclusion et perspectives . . . . .	79
<b>6</b>	<b>Le renforcement du béton par armatures composites</b>	<b>81</b>
6.1	Données générales sur le sujet des armatures composites utilisées pour le renforcement du béton . . . . .	82
6.2	Caractérisation du comportement mécanique des armatures et de l'interface avec le béton . . . . .	84
6.2.1	Observations microscopiques des armatures composites . . . . .	85
6.2.2	Caractérisation thermique des armatures composites . . . . .	85
6.2.3	Caractérisation mécanique du comportement des armatures . . . . .	86

---

6.2.4	Caractérisation du comportement de l'interface entre armature composite et béton . . . . .	87
6.3	Durabilité de cette technique . . . . .	90
6.3.1	Observations microstructurales et température de transition vitreuse . . .	90
6.3.2	Investigations sur le comportement de l'armature seule . . . . .	91
6.3.3	Investigations sur le transfert des efforts entre béton et armature . . . . .	92
6.4	Conclusion et perspectives . . . . .	93
<b>7</b>	<b>Contrôle non destructif et monitoring des structures et applications aux assemblages</b>	<b>95</b>
7.1	L'utilisation de l'émission acoustique pour le monitoring ou en tant que méthode d'instrumentation d'essai . . . . .	96
7.1.1	Investigations sur le suivi de la fissuration du béton avant et après renforcement par composites collés . . . . .	97
7.1.2	Investigations réalisées lors d'un essai de cisaillement de qualification de l'adhérence entre béton et granite . . . . .	100
7.2	Utilisation des acousto-ultrasons pour le contrôle non destructif . . . . .	103
7.2.1	Premières investigations sur le matériau bois pour le suivi de la fissuration	103
7.2.2	Investigations réalisées sur le contrôle non destructif des assemblages collés	105
7.3	Conclusion et perspectives . . . . .	107
	<b>Conclusions et définition des perspectives scientifiques</b>	<b>111</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>127</b>
	<b>Annexes</b>	<b>131</b>

---

# Table des figures

1.1	Organigramme du laboratoire SMC à l'IFSTTAR au 1er Juin 2015 . . . . .	8
2.1	Les techniques d'assemblage selon Schindell-Bidinelli (1992) . . . . .	22
2.2	Profil de cisaillement classique le long d'un joint collé obtenu par la méthode de O. Volkersen . . . . .	26
2.3	Résultats d'investigations expérimentales sur assemblage collé de capacités à rupture en fonction de la longueur collée, Chataigner et al. (2010b) . . . . .	26
2.4	Comparaison de la théorie de Volkersen (1938) et des résultats expérimentaux . .	27
2.6	Schema du joint testé dans et exemple de photos de la déformation locale en cisaillement de la couche de résine obtenue avant et après un cycle de charge-décharge . . . . .	28
2.5	Comparaison de profils de cisaillement obtenus pour une résine élastoplastique par une méthode analytique et une méthode de type éléments finis pour trois charges différentes A, B et C . . . . .	29
2.7	Comparaison des profils de cisaillement après une charge/décharge du joint collé obtenus par la méthode analytique et le calcul de type éléments finis (l'effort appliqué est nul.) . . . . .	29
2.8	Représentation de la modélisation LS1 . . . . .	30
2.9	Résultats en terme de contraintes maximales dans le diagramme p-q pour les trois adhésifs étudiés : à gauche, mise en valeur des trois différents essais ; à droite, tracé de l'enveloppe résultat en adoptant un critère linéaire pour les trois adhésifs étudiés	32
2.10	Schéma et photo du dispositif d'essai . . . . .	33
2.11	Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure pour les deux configurations courbe et plane et avec ou sans frottement en fonction de la longueur de fissure pour une contrainte imposée de 100 MPa . . . . .	34
2.12	Schéma du joint courbe étudié . . . . .	35
3.1	Photos de l'installation d'un plat pultrudé à fibres de carbone à gauche et d'un tissu sec bidirectionnel à fibres de carbone à droite . . . . .	41
3.2	Schéma de la machine de traction à gauche, et zone d'appui du bâti sur la dalle-échantillon à droite . . . . .	42
3.3	Un résultat d'essai en terme de relation effort-déplacement et de profils de déformation axiale le long du renfort . . . . .	43
3.4	Photo d'un échantillon après rupture . . . . .	44

---

3.5	Modèle bilinéaire de zone cohésive . . . . .	44
3.6	Description de l'évolution du profil du cisaillement et de la contrainte axiale dans l'adhérent 1 au cours du chargement . . . . .	45
3.7	Photos de la solution des mèches d'ancrage pour tissu et d'un échantillon de cisaillement après essai LCPC (2006) . . . . .	46
3.8	Schémas des lamelles optimisées et de leur mise en place à la jonction poteau-semelle Sadone (2011) . . . . .	47
3.9	Comparatif des courbes expérimentales obtenues lors des essais de cisaillement sur échantillons collés et échantillons avec ancrage optimisé Sadone (2011) . . . . .	47
3.10	Photos des échantillons de résine à l'état massique utilisés pour les campagnes dites de durabilité . . . . .	49
3.11	Schéma des échantillons utilisés pour les campagnes dites de durabilité . . . . .	49
3.12	Evolution de la température de transition vitreuse pour deux résines époxy étudiées et du comportement à la traction pour une des résines pendant les campagnes de vieillissement . . . . .	50
3.13	Evolution des modes de rupture pour l'essai de cisaillement pour le procédé A et le procédé B étudiés . . . . .	51
3.14	Evolution des profils de déformation mesurés pendant l'essai de cisaillement pour l'essai référence et l'essai après 200 jours de vieillissement pour le procédé B . . . . .	51
3.15	Modèle rhéologique du fluage de Burger et description de la courbe de comportement obtenue Houhou (2012) . . . . .	53
3.16	Courbes maîtresses de fluage obtenues pour un adhésif pour différents niveaux de contrainte Houhou (2012) . . . . .	53
3.17	Schéma et photo du dispositif de fluage sur assemblage collé composite/béton Houhou (2012) . . . . .	54
3.18	Résultats des profils de cisaillement après modélisation aux éléments finis et avec les paramètres de Burgers déterminés expérimentalement pour la résine Houhou (2012) . . . . .	54
4.1	Photos des modes de rupture obtenus pour les trois rugosités étudiées, de gauche à droite, pour le grain fin, le grain moyen et le grain grossier Chataigner et al. (2011d) . . . . .	60
4.2	Photos des modes de rupture obtenus sur adhérent béton et acier Chataigner et al. (2011a) . . . . .	61
4.3	Détermination du modèle bilinéaire de zone cohésive pour le collage sur adhérent béton et acier, et profils de cisaillement ultime associés Chataigner et al. (2011a) . . . . .	62
4.4	Photo des modes de rupture observés et évolution de la capacité de l'assemblage en cisaillement au cours du vieillissement en milieu humide Chataigner et al. (2011d) . . . . .	64
4.5	Evolution des déformations locales près de l'extrémité sur le composite collé sur acier pendant des cycles de charge-décharge après vieillissement Chataigner et al. (2011d) . . . . .	64
4.6	Evolution de la résistance en fatigue d'assemblages collés à double recouvrement en fonction de l'amplitude d'effort appliquée pour deux résines différentes . . . . .	65

4.7	Photo des renforts composites appliqués sur l'ouvrage du Dancourt et de la réalisation des éprouvettes de cisaillement pour l'épreuve de convenance et le suivi (Laboratoire d'Autun) . . . . .	66
4.8	Photos du marquage en fatigue d'une éprouvette avec renforts composites collés au dessus et sans renforts composites collés au-dessous pour un chargement cyclique identique . . . . .	67
4.9	Evolution de la vitesse d'avancée de la fissure en fonction de la longueur fissurée pour des éprouvettes non renforcées et différents types de renforcements étudiés dans le cadre de la thèse d'E. Lepretre . . . . .	67
5.1	Schéma de classement des connecteurs pour les structures mixtes Chataigner et al. (2011c) . . . . .	71
5.2	Schéma et photo des éprouvettes Push-Out étudiées Chataigner et al. (2011c) . .	72
5.3	Photo d'une éprouvette instrumentée pour mesurer 4 glissements locaux à l'interface	72
5.4	Photos de modes de rupture observés d'éprouvettes Push-Out avec de la résine époxy : rupture dans le plan des cernes à gauche et influence d'un noeud présent dans l'adhérent bois sur le mode de rupture à droite Chataigner et al. (2011c) . .	73
5.5	Schéma de la géométrie de poutre mixte étudiée Chataigner et al. (2011c) . . . .	74
5.6	Evolution de la raideur de la poutre en fonction du module élastique de l'adhésif Chataigner et al. (2011c) . . . . .	74
5.7	Evolution des profils de cisaillement dans l'éprouvette Push-Out en régime élastique selon la théorie de O. Volkersen Chataigner et al. (2011c) . . . . .	76
5.8	Déformations de surface selon l'axe horizontal (arrachement) et de cisaillement avant atteinte du maximum en capacité pour l'éprouvette Push-Out avec résine polyuréthane Chataigner et al. (2011d) . . . . .	76
5.9	Déformations de surface selon l'axe horizontal (arrachement) et de cisaillement avant atteinte du maximum en capacité pour l'éprouvette Push-Out avec résine époxy Chataigner et al. (2011d) . . . . .	77
5.10	Evolution des capacités maximales des essais Push-Out après vieillissement en milieu humide Chataigner et al. (2011c) . . . . .	78
6.1	Influence du critère de limitation de l'ouverture de fissure sur le taux d'armatures composites pour différents types d'armatures dans Perier et al. (2013) . . . . .	84
6.2	Observations au microscope électronique à balayage d'une section d'armature composite à fibre de verre à deux grossissements différents Rolland (2015) . . . .	85
6.3	Observations au microscope électronique à balayage d'une section d'armature composite à fibre de carbone à deux grossissements différents Rolland (2015) . .	85
6.4	Comparaison des comportements mécaniques en traction des armatures composites et des armatures acier testées dans Rolland (2015) . . . . .	86
6.5	Photo d'éprouvettes, schéma de l'essai, et photo du dispositif pour les essais d'arrachement Rolland (2015) . . . . .	87
6.6	Caractéristique cisaillement-glissement du modèle de zone cohésive utilisé pour la modélisation du transfert des efforts entre armature et béton Rolland (2015) . . .	88

---

6.7	Caractéristique cisaillement-glisement du modèle de zone cohésive utilisé pour la modélisation du transfert des efforts entre armature et béton Rolland (2015) . . .	89
6.8	Comparaison entre modélisation et mesures par fibres optiques des déformations axiales de l'armature composite le long de l'interface armature-béton Rolland (2015)	89
6.9	Observations au MEB de la section d'armature composite à fibre de verre avant et après 240 jours de vieillissement en milieu alcalin à 60 °C avec (AKC) ou sans enrobage béton (AKS) Rolland (2015) . . . . .	91
6.10	Evolution de la résistance et du module élastique en traction en fonction de la durée de vieillissement en immersion directe en solution alcaline Rolland (2015) .	92
6.11	Modélisation et résultats expérimentaux de l'influence du vieillissement accéléré sur la résistance en traction des armatures étudiées Rolland (2015) . . . . .	92
6.12	Evolution de la capacité maximale atteinte lors des essais d'arrachement exprimée en contrainte moyenne de cisaillement et en fonction des différents vieillissements étudiés Rolland (2015) . . . . .	93
7.1	Illustration d'une salve acoustique . . . . .	97
7.2	Schéma de la poutre de Clerval et de la localisation de l'instrumentation par émission acoustique . . . . .	98
7.3	Résultat des mesures effectuées par émission acoustique en termes de localisation sur la zone étudiée en section S4 à gauche, photo de la zone étudiée avec repérage à posteriori de la fissure apparente à l'oeil nu en rouge à droite . . . . .	99
7.4	Comparaison pour la section S4 des mesures par LVDT en talon de poutre et des mesures par émission acoustique en haut de la fissure apparente avant le renforcement par composites collés à gauche et après le renforcement à droite . .	99
7.5	Photo de la boîte de cisaillement à gauche, et schéma de l'échantillon testé à droite	100
7.6	Photo de l'éprouvette testée avec l'instrumentation mise en place sur un des côtés à gauche, et photo du dessus de l'éprouvette pendant l'essai avec l'instrumentation mise en place en face supérieure à droite . . . . .	101
7.7	Exemple de résultat obtenu pendant un essai de cisaillement en terme d'activité et d'évènements acoustiques détectés en fonction du temps sur une des faces verticales instrumentées . . . . .	101
7.8	Exemple de résultat obtenu pendant un essai de cisaillement en terme de localisation des évènements acoustiques sur les deux faces verticales instrumentées (la couleur de l'évènement correspond au temps d'occurrence) . . . . .	102
7.9	Photo du dispositif d'essai pendant la simulation d'une fissuration par trait de scie	104
7.10	Evolution de l'énergie et du nombre de coups de la salve reçue par méthode directe à gauche et méthode indirecte à droite en acousto-ultrasons . . . . .	104
7.11	De gauche à droite : photo classique d'un renfort composite appliqué sur structure, photo à l'aide d'une caméra thermographique IR après chauffage, autopsie d'une zone auscultée . . . . .	105
7.12	Photo du dispositif expérimental et schéma des défauts étudiés Chataigner et al. (2015b) . . . . .	106

---

7.13 Deux résultats de l'analyse paramétrique effectuée dans Chataigner et al. (2015b) portant sur l'évolution de l'amplitude et de l'évolution du nombre de coups en fonction de l'échantillon étudié . . . . .	106
7.14 Deux résultats de l'analyse par composante principale : à gauche, pour un tiers de vide, et à droite pour une zone avec graisse (les échantillons sains sont représentés en rouge) Chataigner et al. (2015b) . . . . .	107

---

# Liste des tableaux

- 1.1 Synthèse des encadrements effectués . . . . . 11
- 1.2 Synthèse des articles publiés dans des revues scientifiques (le nombre d'articles de rang A est précisé entre parenthèses) . . . . . 12
- 1.3 Synthèse des participations à des conférences (le nombre de conférences avec proceedings est précisé entre parenthèses) . . . . . 13
- 1.4 Synthèse des financements obtenus ou des participations à des projets de recherche financés . . . . . 15
  
- 2.1 Principaux type d'assemblages structuraux utilisés dans les structures de génie civil 23
- 2.2 Résultats des investigations expérimentales sur joints courbes . . . . . 34
  
- 5.1 Principales propriétés des résines étudiées dans le cadre d'essais Push-Out . . . . . 75
- 5.2 Principaux résultats des investigations Push-Out menées avec différents adhésifs 75
  
- 7.1 Synthèse des applications présentées dans l'annexe scientifique et description des travaux réalisés ou en cours pour chacun des trois principaux verrous . . . . . 113

---

Première partie

**Introduction générale et parcours  
professionnel**



Ce mémoire présenté en vue de l'obtention de l'HDR (Habilitation à Diriger des Recherches) retrace mon parcours professionnel et développe les principales activités de recherche que j'ai pu mener au travers de la seconde partie dite "scientifique". Il est le résultat d'un travail de synthèse important ayant pour objectif de montrer mon cheminement scientifique au travers des thématiques que j'ai pu aborder et des moyens que j'ai pu mettre en oeuvre pour les traiter. Il permet également de mettre en valeur les nombreuses collaborations que j'ai pu avoir et que j'ai encore avec divers partenaires qu'ils soient de nature académiques, institutionnels, ou des entreprises privées.

Les technologies du collage structural et des matériaux composites à matrice organique et fibre longues ont connu un essor important dans le domaine de l'aéronautique pendant le siècle dernier en raison des progrès réalisés sur les matériaux polymères et l'élaboration des matériaux composites, des besoins en allègement de structures, et de leurs propriétés mécaniques élevées. Les progrès réalisés dans la maîtrise de ces deux technologies complémentaires (le collage structural est en effet la méthode d'assemblage qui semble la plus adaptée pour le cas des matériaux composites) ont permis d'envisager leur utilisation dans d'autres domaines pour lesquels de nombreux travaux de recherche et de développement sont encore en cours sur ces thématiques. La formulation des matériaux utilisés doit en effet être adaptée aux contraintes du domaine d'application. A titre d'exemple, nous pouvons citer le cas de l'automobile, du naval, et également du génie civil qui m'intéresse plus particulièrement. Pour ce dernier, les deux technologies sont aujourd'hui à des coûts abordables et compétitifs vis-à-vis des technologies classiques en présentant certains avantages relatifs par exemple au poids de la structure finale ou encore à sa durabilité, puisque les matériaux composites ne sont par nature pas soumis aux phénomènes de corrosion. Vis-à-vis des techniques classiques, elles pallient cependant de manière générale d'un manque de référentiel adapté vis-à-vis de la conception et de la mise en oeuvre (dimensionnement des assemblages collés, critères, prise en compte de l'anisotropie des matériaux composites, ...) ainsi que d'un manque de retour d'expérience notamment sur des durées de vie de 100 ans communément adoptées en génie civil (Mouton (2011)). Bien qu'elles semblent proposer des alternatives plus intéressantes, notamment dans des environnements agressifs, ces deux technologies sont peu utilisées et il convient donc de compléter les études les concernant afin de pouvoir proposer des référentiels adaptés pour les différentes situations, et de vérifier leur tenue dans le temps.

L'utilisation de ces deux technologies en génie civil peut intervenir à plusieurs niveaux en ce qui concerne la structure principale :

- La première utilisation du collage structural et des matériaux composites concerne le sujet de la réparation et du renforcement de structures en béton existantes en remplacement de la technique des tôles collées. C'est la raison pour laquelle il s'agit du domaine pour lequel il existe le plus de référentiel technique aujourd'hui, bien qu'il reste certaines questions posées sur ce type d'application. L'utilisation du collage structural pour ce type de problématique est plus ancienne puisqu'elle date de la mise au point de la technique de renforcement par tôle collée. L'utilisation des matériaux composites a ensuite permis de diminuer la difficulté de mise en oeuvre du collage structural sur site et de pouvoir

renforcer des géométries non planes avec l'application de tissu sec imprégné sur site. On notera que si l'utilisation de ces technologies sur structures béton est aujourd'hui communément acceptée, il n'en est pas de même dans le cas des structures métalliques pour lesquelles les enjeux sont souvent différents.

- Le second type d'utilisation de ces deux technologies concerne leur application en remplacement d'éléments de structures classiquement rencontrées en génie civil pour le cas de structures neuves. La France semble peu avancée sur ce sujet en regard d'autres pays comme le Japon ([Karbhari \(1998\)](#)), le Canada, l'Allemagne ou encore les Etats-Unis. Cela inclut par exemple l'utilisation d'armatures composites en remplacement des armatures métalliques à acier carbone, ou encore l'utilisation du collage structural en remplacement des connecteurs locaux de type goujons pour la réalisation des structures mixtes qui sera développée dans ce mémoire. On pourra toutefois noter que certains auteurs ont travaillé sur le remplacement d'assemblages boulonnés ou rivetés par collage structural et qu'il existe certaines structures avec des câbles en matériaux composites comme par exemple, en France, la passerelle de Laroin.
- La troisième utilisation de ces deux technologies est la moins avancée aujourd'hui puisqu'elle concerne la réalisation de structures entièrement en matériaux composites dont les assemblages seraient réalisés par collage structural. Il existe déjà plusieurs structures tests dans le monde ([Julich Saavedra \(2006\)](#)), et en France, le laboratoire Navier travaille sur ce sujet depuis plusieurs années ([Caron et al. \(2009\)](#)).

Le travail développé dans ce mémoire s'inscrit principalement dans ce contexte et aborde surtout l'utilisation de ces deux technologies dans le cadre d'opérations de renforcement et réparation de structures par composites collés (pour des structures en béton mais aussi métalliques), et du remplacement d'éléments de structures par collage structural ou matériaux composites (connexion mixte de structures bois-béton et utilisation d'armatures composites en remplacement des armatures métalliques à acier carbone). On notera toutefois que les études réalisées sur le sujet du transfert des efforts par collage structural peuvent être transposées au cas de la réalisation de structures entièrement en matériaux composites comportant des assemblages collés.

Le premier chapitre sera consacré à la description de mon parcours professionnel en développant notamment mes activités liés à la recherche sur ces deux thématiques, mais aussi sur d'autres sujets auxquels j'ai eu l'occasion de m'intéresser et pour certains sur lesquels je travaille encore. La seconde partie dénommée "partie scientifique" présentera ensuite plus précisément les travaux que j'ai pu réaliser ou auxquels j'ai pu contribuer sur l'application de ces deux technologies dans le domaine du génie civil afin d'aider à leur introduction auprès des acteurs du secteur. La plupart de ces travaux ont été réalisés avec différents collaborateurs (chercheurs, ingénieurs, techniciens, étudiants, entreprises, ...) et comportent des investigations expérimentales importantes souvent associées à des travaux de modélisation.

# Chapitre 1

## Parcours professionnel

### Sommaire

---

1.1	Formation initiale et parcours professionnel . . . . .	6
1.2	Enseignement . . . . .	8
1.3	Structuration de mes activités de recherche . . . . .	9
1.4	Encadrements et publications . . . . .	10
1.5	Participation et animation de projets de recherche . . . . .	13
1.6	Collaboration et participation à des groupements scientifiques . . . . .	14
1.7	Développement, acquisition de matériels d'essais . . . . .	17
1.8	Conclusion et introduction de la partie scientifique . . . . .	18

---

Ce chapitre a pour objectif de présenter mon parcours professionnel en s'appuyant notamment à mettre en valeur mes activités de recherche et d'encadrement de la recherche, de ma formation initiale à aujourd'hui.

Dans un premier temps, je retracerai ma formation initiale et mon parcours professionnel. Il y sera fait état de la teneur des mes formations, de la description des postes que j'ai pu occuper suite à ma thèse, et de mes responsabilités hiérarchiques. Je détaillerai ensuite mes implications dans le domaine de l'enseignement avant d'aborder la structuration de mes activités de recherche. Celle-ci sera découpée en thématiques principales pour pouvoir ensuite étudier par thématique mon implication et la maturation de mes projets. Cette tâche n'est pas aisée et un découpage différent est certainement possible. Je me suis toutefois appuyé sur ce découpage pour proposer un plan pour la suite de ce mémoire. Le paragraphe suivant présentera un résumé de mes encadrements et de mes publications en lien avec ces différentes thématiques. J'aborderai également dans la partie suivante ma participation à des projets de recherche collaboratifs et mes activités d'animation scientifique. Ceci me permettra de détailler les collaborations universitaires et industrielles réalisées dans le cadre de mes activités. Enfin, je développerai un paragraphe spécifique sur le sujet de mes activités dans le cadre de développement, et d'acquisition de matériels d'essais et d'outils d'instrumentation.

On pourra retrouver plus de détails sur l'ensemble de ces sujets dans mon Curriculum Vitae en annexe de ce manuscrit.

## 1.1 Formation initiale et parcours professionnel

Mes premiers contacts avec le monde de la recherche ont eu lieu lors de la fin de ma seconde année d'ingénieur spécialité Génie Civil de l'ENTPE à l'occasion de mon stage de fin d'année. Celui-ci s'est déroulé en 2004 à l'université de Bath en Angleterre et a porté notamment sur l'influence d'un mésalignement de renforcements composites collés sur la capacité en flexion de dalles en béton renforcées. Ce stage s'est extrêmement bien déroulé et j'ai pu d'ailleurs garder contact avec mon encadrant Tim Ibell qui est aujourd'hui président de l'Institution of Structural Engineers en Angleterre.

J'ai ensuite eu la chance d'effectuer la fin de mon cursus ingénieur à l'Imperial College à Londres en préparant un Master of Science sur le sujet des structures en béton et du développement durable de 2004 à 2005. Cette expérience m'a permis de parfaire mon anglais, ainsi que mes connaissances sur les théories associées à l'Eurocode 2. Il m'a également permis de m'ouvrir à une thématique nouvelle à l'époque sur le thème du développement durable en découvrant notamment les concepts de LCC (Life Cycle Cost) et de LCA (Life Cycle Assessment) ou ACV (Analyse de Cycle de Vie). Pendant cette même année, le laboratoire d'Autun (Christophe Aubagnac) qui souhaitait former un ingénieur TPE à la recherche et aux techniques de renforcements par composites collés a pris contact avec moi afin d'envisager la suite de mon cursus. J'ai donc décidé en préfiguration d'un travail de thèse possible d'effectuer mon stage de fin de master et d'études d'ingénieur TPE au sein du LAMI (aujourd'hui

laboratoire Navier) sous la direction de Jean François Caron sur l'exploitation des essais de cisaillement de renforts composites collés sur béton effectués au laboratoire d'Autun. Ce stage m'a permis l'obtention de mes deux diplômes et j'ai même pu obtenir le Gyebi Kufuor Prize de l'Imperial College pour mon année réalisée.

J'ai pu alors commencer fin 2005 mon travail de thèse au sein du LAMI sous la direction de Jean François Caron et avec la participation de Christophe Aubagnac sur le thème du collage structural. Le LAMI disposait déjà d'expérience sur le sujet du collage structural, et le laboratoire d'Autun disposait quant à lui d'applications concrètes en génie civil avec un besoin en terme d'exploitation d'essais sur assemblages collés et de méthodologie de contrôle de ces opérations sur site. Cette expérience m'a permis d'approfondir grandement mes connaissances en terme de mécanique des structures et des matériaux, en terme de modélisation mais aussi d'expérimentations. La possibilité accordée par le laboratoire d'Autun d'effectuer la majorité de mon travail au LAMI pendant mes trois années de thèse m'a en outre permis d'accéder à un environnement riche en sujets de recherche, et de construire des relations professionnelles qui m'ont permis par la suite de réaliser des travaux de recherche collaboratifs fructueux.

A l'issue de ce travail de thèse, j'ai rejoint fin 2008 l'équipe de Christophe Aubagnac au laboratoire d'Autun pour y assurer un rôle d'ingénieur chercheur spécialisé sur la thématique du renforcement des structures par composites collés dans le cadre de l'équipe ressource du RST "Collage et matériaux composites" tout juste créée. La première année, j'y ai occupé le poste de chef de la section "bétons" qui comprenait 5 agents. Outre les activités hiérarchiques, j'avais en charge les missions d'assistance à maîtrise d'oeuvre et d'ouvrage sur le sujet de l'application de renforcements par composites collés, ainsi que l'encadrement de plusieurs activités de recherche de l'équipe majoritairement sur la thématique des renforts composites collés, mais aussi sur le sujet de la formulation du béton ou encore du contrôle non destructif du béton. A partir de ma seconde année au laboratoire d'Autun, le groupe a été réorganisé afin d'afficher davantage la composante en recherche de nos activités. Je suis donc devenu adjoint au responsable de la section "Matériaux Structures Collage et Composites" comprenant 5 agents où j'ai occupé un rôle proche du précédent. Cette expérience m'a été très bénéfique puisqu'elle m'a permis de comprendre les contraintes associées à la mise en oeuvre du collage sur site et d'appréhender les problématiques de contrôle qualité et de durabilité. J'ai pu en outre continuer à travailler en collaboration avec le laboratoire Navier et commencer à collaborer avec le LCPC, notamment sur le sujet des renforcements par composites collés avec Marc Quiertant et Karim Benzarti. Les travaux de recherche que j'ai pu y mener nous ont permis avec Christophe Aubagnac d'élaborer un protocole pour la création d'une Equipe de Recherche Associée au LCPC "Collage et Composites" qui a été labellisée en 2011.

J'ai décidé début 2011 de quitter la région Autunoise pour la région Nantaise en intégrant le LCPC tout juste devenu IFSTTAR suite à sa fusion avec l'INRETS. J'y occupe toujours actuellement un poste d'ingénieur chercheur sur les thématiques des assemblages et de l'utilisation des matériaux composites.

Dans le cadre de ce nouveau poste, il m'a été nécessaire de me former sur le sujet du matériau métallique et de ses modes d'assemblage (soudage, rivetage et boulonnage) pour pouvoir

proposer des sujets de recherche pertinents avec les activités scientifiques du laboratoire SMC que j'ai intégré. J'ai pu toutefois continuer à travailler sur la thématique de l'utilisation du collage structural et des matériaux composites en orientant davantage mes recherches vis-à-vis des préoccupations et des moyens expérimentaux du laboratoire SMC. Ceci s'est concrétisé par la création au sein de laboratoire d'un pôle "Assemblages et Composites" en Mars 2013 auquel deux agents étaient affectés, qui est devenu le pôle "Comportement des matériaux et des assemblages" en Janvier 2014. J'ai donc pu sur certains sujets continuer mes collaborations antérieures, et en amorcer de nouvelles avec des chercheurs présents au sein de ce laboratoire : à savoir Laurent Gaillet sur les questions de corrosion et de contrôle non destructif, Lamine Dieng sur la thématique des assemblages métalliques et de leur modélisation, et Virginie Périer sur la thématique de l'analyse du cycle de vie.

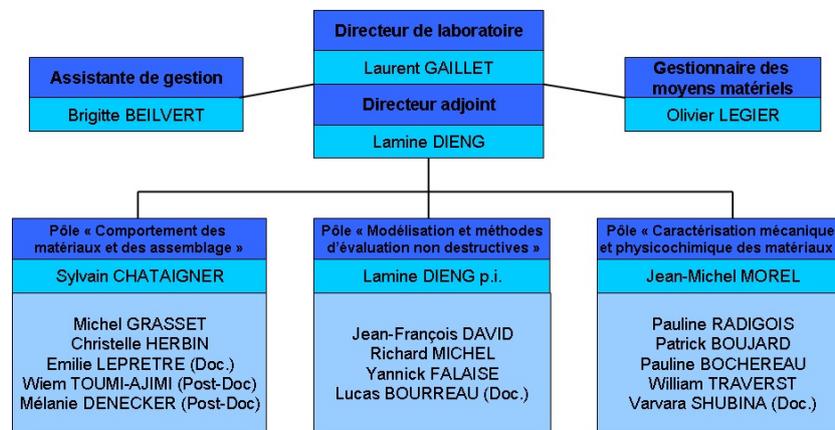


FIGURE 1.1: Organigramme du laboratoire SMC à l'IFSTTAR au 1er Juin 2015

## 1.2 Enseignement

Bien que mon statut d'ITPE (Ingénieur des Travaux Publics de l'Etat) ne soit pas en lien direct avec ce type d'activité, j'ai pu pendant l'ensemble de mon cursus pratiquer des actions d'enseignement à différents niveaux au sein de différents établissements :

- Pendant ma thèse, j'ai eu la chance de pouvoir encadrer différents TDs et TP à l'Ecole des Ponts en lien avec mes travaux de recherche : des TP de réalisation de matériaux composites (cuisson d'empilements sous vide), des TP d'essais de caractérisation de matériaux composites en traction d'empilements selon différentes directions, des TP de caractérisation d'acier en torsion/traction, et des TP de caractérisation d'acier sous fissuration en mode I, des TDs de modélisation numérique par éléments finis sous le code commercial Abaqus (formation au logiciel pendant un semestre, cours sur la modélisation du pressage des poudres de céramique et rôle de référent sur le logiciel). J'ai également pu participer à l'encadrement d'un séminaire commun Ecole des Ponts/Ecole Nationale Supérieure d'Architecture sur une semaine dénommée "séminaire Design".
- Pendant mon poste au laboratoire d'Autun, j'ai pu continuer à encadrer le TD de mo-

délisation numérique sous Abaqus du pressage des poudres dans le cadre du cours de Céramique et à intervenir encore quelques années sur l'encadrement du "séminaire Design".

- Suite à mon arrivée à Nantes, je n'ai maintenu mon intervention que dans le cadre du TD de modélisation du pressage des poudres à l'école des Ponts. J'ai cependant pu nouer de nouveaux contacts locaux sur la région avec l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes et l'ICAM. Dans le premier établissement, je participe à l'encadrement d'un cours sur le comportement des structures pendant le premier semestre (responsabilité de TDs numériques sur le logiciel RDM6, encadrement de TPs et réalisation de quelques cours en amphî). Dans le second établissement, j'ai pu dispenser quelques cours en salle sur les thématiques des matériaux et structures de génie civil.

### 1.3 Structuration de mes activités de recherche

La rédaction d'une Habilitation à Diriger des Recherches permet de prendre du recul sur ses activités scientifiques et d'en trouver le sens. Pour ce faire, j'ai décidé d'identifier les grandes thématiques auxquelles j'ai pu contribuer et qui ont fait l'objet d'articles et/ou de communications. L'exercice a permis de relever les sujets principaux suivants abordés pendant mon parcours professionnel (classés dans l'ordre chronologique de démarrage du sujet) :

1. *Renforcement des structures en béton par composites collés ;*
2. *Modélisation du transfert des efforts par collage structural et optimisation ;*
3. *Renforcement des structures métalliques par composites collés ;*
4. *Structures mixtes bois-béton assemblées par collage ;*
5. *Contrôle non destructif du béton ;*
6. *Utilisation d'armatures composites pour le renforcement interne du béton ;*
7. *Assemblages soudés et fatigue ;*
8. *Contrôle non destructif par méthodes acoustiques ;*
9. *Comportement des armatures métalliques sous différentes températures ;*

Le travail effectué sur chacune de ces thématiques n'est pas équivalent et je le détaillerais dans les paragraphes suivants. Il est toutefois important de noter que plusieurs idées clés sont communes à ces sujets. Les majoritaires sont à mon avis les suivantes :

- le transfert des efforts dans les structures de génie civil ;
- l'utilisation du collage structural en génie civil ;
- l'utilisation des matériaux composites en génie civil ;

La majorité de mes travaux s'attache donc à comprendre comment les efforts peuvent se transmettre au sein d'une structure au niveau des assemblages, là où la mécanique des milieux continus prouve ses limites. S'il est vrai que de nombreux travaux sur le sujet des assemblages dans le cas des structures métalliques ou des structures en béton existent déjà, l'utilisation du collage structural et des matériaux composites en génie civil a renouvelé les besoins en la matière, et c'est sans doute une des raisons qui explique pourquoi autant de mes travaux se sont

attachés à l'étude de ces deux techniques Je n'ai pas encore pu étudier l'ensemble des assemblages présents dans le domaine du génie civil, mais j'ai tout de même eu la chance d'avoir pu travailler sur de nombreux matériaux du génie civil : les matériaux composites et les résines de collage structural bien entendu mais aussi le métal (depuis mon intégration au sein du laboratoire SMC de l'IFSTTAR), le béton (Master of Sciences sur le domaine des structures en béton, responsabilité de la section Bétons-Composites-Construction et nombreux travaux associés à l'étude du collage sur béton), ou encore le bois lamellé collé utilisé en construction (dans le cadre de mes collaborations sur les structures mixtes bois-béton et sur le contrôle non destructif du bois). Ces expériences m'ont permis d'acquérir des connaissances et des compétences sur ces différents matériaux qui étaient nécessaires pour la compréhension des mécanismes de transfert des efforts et des préoccupations liées à leur durabilité.

La plupart de mes travaux sont des travaux de recherche appliqués qui s'appuient très souvent sur des investigations expérimentales importantes et dès que possible sur des travaux de modélisation (de type analytique, ou utilisant des modèles aux éléments finis). La nature appliquée de mes travaux résulte de mon statut puisque je suis Ingénieur des Travaux Publics de l'Etat, corps du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie mais aussi de mon expérience de chargé de programme de contrôle extérieur au laboratoire d'Autun. Ce positionnement peu classique dans le monde de la recherche m'a permis de pouvoir cotoyer différents acteurs du génie civil Français, qu'ils soient gestionnaires d'ouvrage, entreprises du BTP, experts du domaine et universitaires. C'est une des raisons pour lesquelles j'ai pu participer à de nombreux projets ayant des niveaux de TRL (Technology Readiness Level) plus ou moins élevés.

## 1.4 Encadrements et publications

La liste complète des encadrements et des publications que j'ai pu effectuer est donnée en annexe. Cependant, afin de mettre en relief l'évolution de mon activité en lien avec les thématiques prédéfinies dans le paragraphe suivant, je propose dans cette partie des synthèses sous forme de tableaux.

En ce qui concerne mes activités d'encadrement, une synthèse est donnée dans le tableau 1.1. Il conviendra de noter qu'il s'agit de co-encadrement dans certains cas pour les stagiaires M1/M2, et pour tous les doctorants et post-doctorants. La totalité des étudiants que j'ai pu accueillir en stage L1/L2 ou M1/M2 ont pu finaliser leur stage dans de bonnes conditions. Trois des doctorants que j'ai co-encadré ont soutenu leur thèse, parmi lesquels deux continuent aujourd'hui à exercer dans un domaine d'activité en lien avec leur thématique de recherche : N. Houhou qui a trouvé un emploi dans le secteur privé dans le domaine des matériaux de construction, et A. Rolland, en tant qu'ingénieur TPE, qui a rejoint un poste technique au laboratoire de Lille au CEREMA.

J'ai également tenté de synthétiser mes publications dans des revues scientifiques et mes communications dans les tableaux 1.2 et 1.3.

En ce qui concerne les publications dans des revues, les publications de rang A sont également indiquées. La majorité de mes publications actuelles concernent le domaine du transfert des efforts par collage soit de manière générale, soit de manière appliquée au domaine du génie civil. Les autres thématiques étant plus récentes, je n'ai pas encore pu valoriser mes travaux dans des

Thématique	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1. Collage béton/composite			F. Rizart N. Houhou	M. Guillot N. Houhou	N. Houhou	N. Houhou			
2. Transfert par collage et optimisation	G. Bayart	A. Thibon	A. Brosse	H. Chafi	H. Chafi	H. Chafi	H. Chafi	H. Chafi	
3. Collage composites/acier							E. Lepretre E. Lepretre	E. Lepretre	E. Lepretre
4. Collage bois/béton			A. Guyot	Y. Benkdhija L. Loulou	L. Loulou	L. Loulou	L. Loulou		
5. CND du béton				A. S. Lamarre					
6. Armatures composites						O. Boudarene A. Pruvost			
7. Assemblages soudés et fatigue						A. Rolland	A. Rolland	A. Rolland	A. Rolland
8. CND par méthodes acoustiques						K. Guiot	V. Bernoala		D. Amine M. Denecker
9. Armatures métalliques et température						L. Vallee	T. Colombe		
								N. Martin-Barribaud	C. Martelot
									W. Toumi-Ajimi

Stage L1/L2



Stage M1/M2



Doctorant



Post-doctorant



TABLE 1.1: Synthèse des encadrements effectués

revues de rang A. On constate une année avec moins de publications qui correspond en fait à l'année postérieure à mon changement de poste. Certaines de ces publications sont données en annexe à ce manuscrit.

En ce qui concerne les communications, les communications avec actes sont précisées. On constate de nouveau que la majorité de mes communications sont liées à des travaux sur le sujet du transfert des efforts par collage structural, et à l'application de cette technique à différentes thématiques relevant du génie civil. Plus récemment, j'ai pu communiquer sur trois autres thématiques sur lesquelles j'ai démarré des travaux : les armatures composites pour le renforcement du béton, les assemblages soudés et leur fatigue, le contrôle non destructif par méthodes acoustiques. Ces travaux ont fait part de communications et ils seront valorisés prochainement sous forme d'articles de revues scientifiques.

Dans les deux tableaux présentés, deux thématiques apparaissent faire part de peu de publications et/ou de communications, à savoir le sujet du contrôle non destructif du béton et celui de la dépendance du comportement des armatures métalliques vis-à-vis de la température. Pour le premier, j'ai pu travailler sur cette thématique lors de mon poste au laboratoire d'Autun. Le travail réalisé était de qualité puisqu'un article de rang A a pu être réalisé. Mon changement de poste ne m'a toutefois pas permis de poursuivre mes travaux sur cette thématique. Je ne la détaillerais donc pas dans la suite de ce mémoire. Pour le second, la thématique est récente pour moi et elle devrait faire l'objet de communications sous peu. Elle ne sera donc pas non plus détaillée dans le reste de mon mémoire.

Thématique	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total
1. Collage béton/composite	0	0	0	1(1)	1	1.5(1.5)	1	0	2(1)	0	6.5(3.5)
2. Transfert par collage et optimisation	0	0	0	2(1)	1(1)	3(3)	3(2)	0	1	0	10(7)
3. Collage composites/acier	0	0	0	0	0	1.5(0.5)	1	0	0	0	2.5(0.5 + 1 en préparation)
4. Collage bois/béton	0	0	0	0	0	0	0	0	1(1)	0	1(1)
5. CND du béton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1(1)	1(1)
6. Armatures composites	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2(2 en préparation)
7. Assemblages soudés et fatigue	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
8. CND par méthodes acoustiques	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9. Armatures métalliques et température	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	0	0	0	3(2)	2(1)	6(5)	5(2)	1	5(2)	2(1)	24(13 + 3 en préparation)

TABLE 1.2: Synthèse des articles publiés dans des revues scientifiques (le nombre d'articles de rang A est précisé entre parenthèses)

Il convient également de retenir que j'ai pu contribuer à d'autres publications en lien avec mes thématiques de recherche et de nature plus appliquée dont les plus significatives sont les

Thématique	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total
1. Collage béton/composite	1	2	5.5(4.5)	6(1)	3(3)	3(2)	2(2)	2.5(2.5)	2(2)	1(1)	28(18)
2. Transfert par collage et optimisation	1(1)	1(1)	1(1)	5(3)	1	0	0	1(1)	1(1)	0	11(8)
3. Collage composites/acier	0	0	0.5(0.5)	0	0	0	2(1)	0.5(0.5)	1(1)	1	5(3)
4. Collage bois/béton	0	0	0	0	2	2(2)	2(1)	1	0	0	7(3)
5. CND du béton	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6. Armatures composites	0	0	0	0	0	0	0	4(3)	4(2)	1(1)	9(6)
7. Assemblages soudés et fatigue	0	0	0	0	0	0	0	2(1)	2(1)	1(1)	5(3)
8. CND par méthodes acoustiques	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2(1)	4(1)
9. Armatures métalliques et température	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	2(1)	3(1)	7(6)	11(4)	6(3)	5(4)	6(4)	12(8)	11(7)	6(4)	69(42)

TABLE 1.3: Synthèse des participations à des conférences (le nombre de conférences avec proceedings est précisé entre parenthèses)

suivantes : un brevet sur un concept d'ancrage par collage optimisé, le guide de l'AFGC sur le renforcement de structures en béton par composites collés, la méthode d'essai des Laboratoires des Ponts et Chaussées concernant la pratique de l'essai à simple recouvrement, un guide du réseau scientifique et technique du ministère concernant le contrôle des opérations de renforcement par composites collés de structures en béton.

## 1.5 Participation et animation de projets de recherche

La plupart de mes travaux ont bien entendu été intégré à des opérations de recherche interne du réseau scientifique et technique du ministère, pilotées par le LCPC, puis depuis 2013 co-pilotées par l'IFSTTAR et le CEREMA. Ces diverses opérations de recherche m'ont permis de collaborer avec de nombreuses personnes de ces organismes dont la liste est trop longue pour toutes les citer ici.

Au niveau de l'IFSTTAR, je viens d'être nommé co-animateur avec Jean-François Caron d'un des 13 axes de recherche et de développement du département MAST (Matériaux et Structures). Cet axe s'intitule "Structures et matériaux innovants" et est intégré au thème concernant les infrastructures de transport innovantes. Il devrait s'agir d'un lieu d'échange scientifique important du département en vue de montage de projets collaboratifs.

Outre les projets de recherche internes financés sur fond propre du ministère, je souhaite développer ici mes participations à des projets externes financés par des organismes régionaux, nationaux, voire européens, ou par des entreprises privées dans le cadre de contrats de collaboration après la soutenance de ma thèse en 2008. La liste de ces projets et leur historique est donnée dans le tableau 1.4. On peut y constater que la plupart des axes principaux de mes recherche ont

été alimentés par des financements extérieurs provenant de sources diverses (contrat industriel avec SIKA, ou TOTAL ; participation à des projets ANR, Région ou plus récemment Européen ; convention de collaboration avec financement partiel avec la SNCF, ou l'ASFA dans le cadre du Projet Clerval).

Si pour les premiers projets, j'étais surtout responsable de la réalisation des tâches confiées à mon équipe, pour les projets plus récents (notamment depuis mon arrivée à l'IFSTTAR), j'ai la plupart du temps participé au montage des dossiers (rédaction des conventions, définition des contenus et des demandes budgétaires, suivi). Ceci m'a permis dans le cadre du dernier projet financé par l'Europe lors de l'appel Infravation (Projet FASSTBridge) d'être identifié comme correspondant de l'IFSTTAR du projet, et correspondant scientifique et technique de l'ensemble du projet.

Je n'ai bien sûr pas mentionné les réponses à appel à projets infructueuses bien qu'il y en ait eu quelques unes. Comme la plupart de mes travaux s'appuient sur des investigations expérimentales plus ou moins conséquentes, il est important de souligner que ces financements sont importants pour mes activités. Je souhaite également noter que je n'ai pas fait part dans ce tableau des collaborations hors convention ou projets de recherche qui ont également été nombreuses, notamment pour la fourniture de matériaux pour la réalisation d'essais.

## 1.6 Collaboration et participation à des groupements scientifiques

Cette partie est en lien direct avec la partie précédente, mais elle me permet de lister les collaborations que j'ai pu avoir au cours de ces dernières années dans le domaine scientifique. Je vais faire cet exercice par thématique et par type de collaboration. Pour ce qui concerne les entreprises et organismes regroupant ces entreprises, je peux citer les collaborations principales suivantes :

1. *Renforcement des structures en béton par composites collés* : Freyssinet (fourniture de matériaux pour le renforcement), Sika (fourniture de matériaux pour le renforcement), Etandex/SPPM (fourniture de matériaux pour le renforcement), ASFA (projet Clerval).
2. *Modélisation du transfert des efforts par collage structural et optimisation* : Sika (fourniture de matériaux).
3. *Renforcement des structures métalliques par composites collés* : SNCF (contrat dans le cadre de la thèse d'E. lepretre), Fyfe (fourniture de matériaux), Freyssinet (fourniture de matériaux), SIKA (fourniture de matériaux), ADS (opérations de rivetage), Collanti (Projet FASSTBridge), Tecnalia (Projet FASSTBridge), Altavista (Projet FASSTBridge), LAP (projet FASSTBridge), Dragados (Projet FASSTBridge).
4. *Structures mixtes bois-béton assemblées par collage* : entreprise FARGEOT (fourniture de lamellé-collé), LAFARGE (fourniture de BFUP), SIKA (fourniture de résine).
5. *Contrôle non destructif du béton* ;
6. *Utilisation d'armatures composites pour le renforcement interne du béton* : Pulltrall (fourniture d'armatures et accueil pour visite de leurs locaux), GBF Basalt Fiber Co. (fourniture d'armatures), SIREG (fourniture d'armatures), Fibex (fournitures d'armatures et

Thématique	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
1. Collage béton/composite	Contrat SIKA, sous-traitance de l'ANR IN-PERMISE	Contrat SIKA, sous-traitance de l'ANR IN-PERMISE	Contrat SIKA				Projet de développement MACICO	Projet de développement MACICO	Projet de développement MACICO
2. Transfert par collage et optimisation									
3. Collage composites/acier							Contrat SNCF	Contrat SNCF, Projet Européen FASST-Bridge	Contrat SNCF, Projet Européen FASST-Bridge
4. Collage bois/béton									
5. CND du béton									
6. Armatures composites				Contrat TOTAL	Contrat TOTAL				
7. Assemblages soudés et fatigue					Projet Région PdL FON-DEOLE	Projet Région PdL FONDEOLE	Projet Région PdL SURFFEOL	Projet Région PdL SURFFEOL	Projet Région PdL SURFFEOL
8. CND par méthodes acoustiques					Stage financé par ECND PdL		Projet CLERVAL, Sous-traitance du projet CIBEPHY	Projet CLERVAL, Sous-traitance du projet CIBEPHY	Projet CLERVAL
9. Armatures métalliques et température							Projet ANR MACENA	Projet ANR MACENA	Projet ANR MACENA

TABLE 1.4: Synthèse des financements obtenus ou des participations à des projets de recherche financés

accueil pour visite de leurs locaux), TOTAL (contrat de collaboration), AFCAB (présentation lors d'une matinale), APA (présentation lors d'une AG).

7. *Les assemblages soudés et leur fatigue* : MIC (opérations de grenailage de précontrainte), Meliad (mesures de contraintes résiduelles par rayons X), STX (Projets Fondeole et SURFFEOL).
8. *Le contrôle non destructif par méthodes acoustiques* : ASFA (Projet CLERVAL), EDF (Projet CIBEPHY).
9. *Le comportement des armatures métalliques sous différentes températures* : EDF (Projet MACENA), IRSN.

Outre les nombreuses collaborations internes à l'IFSTTAR, j'ai également pu collaborer avec des organismes académiques sur les différentes thématiques. Ces collaborations ont la plupart du temps permis de réaliser des communications communes. Je ne cite ci-dessous que les collaborations principales qui se sont concrétisées par des actions communes finalisées ou en cours :

1. *Renforcement des structures en béton par composites collés* : Ecole des Ponts (J.F. Caron et G. Foret, France), LGCIE (E. Ferrier et L. Michel, France).
2. *Modélisation du transfert des efforts par collage structural et optimisation* : Ecole des Ponts (J.F. Caron et G. Foret), CIMAV (A. Diaz Diaz, Mexique) .
3. *Renforcement des structures métalliques par composites collés* : Ecole des Ponts (G. Foret), GeM (F. Jacquemin), Université de Stuttgart (Projet FASSTBridge).
4. *Structures mixtes bois-béton assemblées par collage* : Ecole des Ponts (R. Leroy, S. Care).
5. *Contrôle non destructif du béton*.
6. *Utilisation d'armatures composites pour le renforcement interne du béton* : Université de Sherbrooke (B. Benmokrane).
7. *Les assemblages soudés et leur fatigue* : Université de Nantes (C. Lupi).
8. *Le contrôle non destructif par méthodes acoustiques* : ESB (F. Lanata), IUT Tarbes (M. Perrin), ICAM (E. Le Gal La Salle).
9. *Le comportement des armatures métalliques sous différentes températures* : Université de Toulouse (A. Sellier).

En ce qui concerne la participation à l'animation scientifique, au niveau du Réseau Scientifique et Technique du ministère (IFSTTAR et CEREMA), je participe à l'animation de la recherche en intervenant depuis la fin de ma thèse au sein de plusieurs opérations de recherche. Celles-ci sont pour la plupart dédiées à l'étude de l'utilisation des matériaux composites dans les structures de génie civil. Elles me permettent de valoriser les résultats de mes recherches, et de cotoyer les collègues de l'IFSTTAR et du CEREMA pour échanger nos expériences, nos compétences, et éventuellement collaborer sur des sujets particuliers. Je participe en outre régulièrement aux JOA (Journées Ouvrages d'Art) organisées par le RST tous les ans en tant qu'intervenant (10 communications depuis 2007).

En ce qui concerne ma participation aux réseaux professionnels et académiques régionaux et nationaux, je suis membre adhérent de l'AFGC (Association Française du Génie Civil) depuis

2010 et je participe à ce titre au groupe de travail de l'AFGC sur le sujet du renforcement par composites collés. Je participe également fréquemment aux Journées GC organisées par ce réseau tous les deux ans (4 communications depuis 2011). Je suis également membre de l'AMAC (Association pour les MATériaux Composites) depuis 2007 et je participe assez fréquemment aux JNC (6 communications depuis 2007).

Enfin, au niveau International, je suis membre suppléant du comité de management de l'action COST TU 1207 (Composites in construction) et membre de l'IIFC (International Institute for FRP in Construction) depuis 2008. Je participe régulièrement au congrès CICE organisé tous les deux ans par cette association (8 communications depuis 2008). Je ferais d'ailleurs partie du comité d'organisation du congrès CICE 2018 qui aura lieu à Paris (organisation conjointe Ecole des Ponts-IFSTTAR-LGCIE).

## 1.7 Développement, acquisition de matériels d'essais

Etant donné ma dominante expérimentale dans la plupart de mes travaux, le développement de mes compétences, l'acquisition de matériels d'essais et d'instrumentation, et la mise au point de protocoles expérimentaux ont été pour moi des sujets conséquents.

Lors de mon expérience au laboratoire d'Autun, j'ai ainsi pu contribuer aux aspects expérimentaux suivants :

- mettre au point la procédure de l'essai de cisaillement sur assemblage collé composite-béton à simple recouvrement (avec rédaction d'une procédure du réseau et intégration de l'essai au guide rédigé par l'AFGC) ;
- me former sur une centrale d'acquisition multivoies (notamment pour des instrumentations par jauges de déformation et extensomètres LVDT) ;
- me former sur les techniques expérimentales associées à la DSC et à la DMA et co-organiser l'acquisition de ces deux matériels au sein du laboratoire ;
- adapter différents matériels d'essais pour la réalisation d'essais de traction sur haltères de résine, d'essais de cisaillement interlaminaire, d'essais Push-Out (bois-béton) ;
- participer au projet de développement MACICO destiné à réaliser un matériel d'essai de cisaillement de composites collés sur béton pour le chantier.

Lors de mon expérience au laboratoire SMC à Nantes, j'ai pu contribuer aux aspects expérimentaux suivants :

- mettre au point la procédure de l'essai pull-out dans le cadre du contrat Total et du projet MACENA (avec système de chauffage) ;
- mettre au point les essais de traction sur armatures composites (dans le cadre du contrat Total) ;
- mettre au point les essais de traction et de relaxation sur armatures métalliques avec chauffage (dans le cadre du projet MACENA) ;
- organiser l'acquisition d'un système de surveillance acoustique CASC2 et l'augmentation du nombre de voies d'un système d'émission acoustique de MISTRAS, ainsi que me former sur ces deux techniques d'instrumentation ;
- me former sur une instrumentation en fatigue innovante proposée par l'entreprise Strainstall (projet SURFFEOL) ;

- participer à différentes problématiques expérimentales du laboratoire (création de programmes de pilotage des presses, instrumentation, réorganisation des locaux avec aménagement d'un local pour la réalisation du collage).

## 1.8 Conclusion et introduction de la partie scientifique

Ce chapitre avait pour objectif de montrer les principales composantes de mon parcours, mes compétences et mon évolution. Le découpage de mes activités en thématiques principales permet de mieux cerner les thématiques dominantes de mon parcours. Au vu de cette analyse, j'ai décidé ci-après de ne développer que 6 des 9 thématiques identifiées (celles qui ont fait l'objet de davantage de valorisation et qui sont suffisamment matures) dans la suite de mon mémoire.

Je commencerais donc par un premier chapitre dédié à la modélisation du transfert des efforts par collage et à son optimisation car il est en lien direct avec d'autres thématiques. Je développerais ensuite les travaux que j'ai pu mener sur le sujet du renforcement des structures par collage de matériaux composites. Tout d'abord, je me concentrerais sur le cas des structures en béton, puis j'aborderais le cas des structures métalliques. J'aborderais ensuite l'utilisation du collage structural et des matériaux composites pour la réalisation de nouvelles structures du génie civil. Dans un premier temps, je développerais les travaux que j'ai pu mener sur le sujet des structures mixtes bois-béton, puis j'approfondirais le sujet de l'utilisation des armatures composites en tant que renforcement interne du béton. Enfin, je terminerais par un dernier chapitre dédié à des travaux plus récents et qui sont encore en cours concernant le contrôle non destructif et le monitoring de structures qui intégrera la thématique du contrôle par méthodes acoustiques.

J'ai donc choisi de ne pas aborder le sujet du contrôle non destructif du béton car j'ai peu travaillé sur le sujet et que mon changement de poste ne m'a pas permis de continuer à approfondir cette thématique. Je parlerais également peu de mes travaux sur les assemblages soudés et sur le comportement des armatures métalliques vis-à-vis de la température car ils sont plus récents et donc moins aboutis.

Deuxième partie

**Synthèse scientifique**



## Chapitre 2

# Présentation du collage structural dans le cas d'applications dans le domaine du génie civil

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Revue des typologies d'assemblage rencontrées en génie civil . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>2.2</b>	<b>Quelques éléments sur le transfert mécanique des efforts par collage structural . . . . .</b>	<b>24</b>
2.2.1	Eléments généraux sur le collage structural . . . . .	24
2.2.2	Transfert des efforts dans le cas d'un comportement élastique . . . . .	25
2.2.3	Transfert des efforts dans le cas d'un comportement non linéaire . . . . .	27
2.2.4	Utilisation des modèles LS1 pour la modélisation des assemblages collés . . . . .	29
<b>2.3</b>	<b>Travaux sur l'optimisation de ce transfert d'efforts . . . . .</b>	<b>31</b>
2.3.1	Revue bibliographique des solutions étudiées pour optimiser le transfert des efforts par collage . . . . .	31
2.3.2	Proposition de la géométrie d'ancrage courbe . . . . .	32
2.3.3	Description et résolution d'un modèle de type LS1 développé dans le cas de la géométrie courbe . . . . .	34
<b>2.4</b>	<b>Conclusions et perspectives . . . . .</b>	<b>36</b>

---

En génie civil comme en mécanique, la théorie bien établie des milieux continus se heurte à la présence de discontinuités ou d'assemblages. Ce sont donc bien souvent ces zones qui présentent des difficultés d'appréhensions lors de la conception ou du recalcul d'ouvrages existants, et pour lesquelles il manque cruellement de connaissances et d'outils adaptés (Wolfgang Pauli : "Dieu a créé les volumes, le diable la surface"). Ce chapitre s'intéresse à répertorier les technologies d'assemblage disponibles en génie civil et à approfondir le sujet de la technologie du collage structural qui est encore peu utilisée dans ce domaine.

Il présentera dans un premier temps une classification des différentes typologies d'assemblage que nous pouvons rencontrer en génie civil. Il se penchera ensuite davantage sur la technologie de l'assemblage par collage structural et les modélisations possibles associées du transfert des efforts. Enfin, il présentera une revue de travaux qui ont consisté à optimiser celui-ci via l'utilisation de combinaisons de matériaux plus adaptées ou encore de géométries adéquates.

## 2.1 Revue des typologies d'assemblage rencontrées en génie civil

La norme DIN 8580 dont une partie est reprise dans [Schindell-Bidinelli \(1992\)](#) tente de donner une classification des méthodes d'assemblage rencontrées dans le domaine de l'industrie. Celle-ci est reprise en figure 2.1. Il en résulte la distinction de trois grandes familles d'assemblage : l'assemblage mécanique, l'assemblage thermique, et l'assemblage physico-chimique dans lequel on retrouve le collage structural.

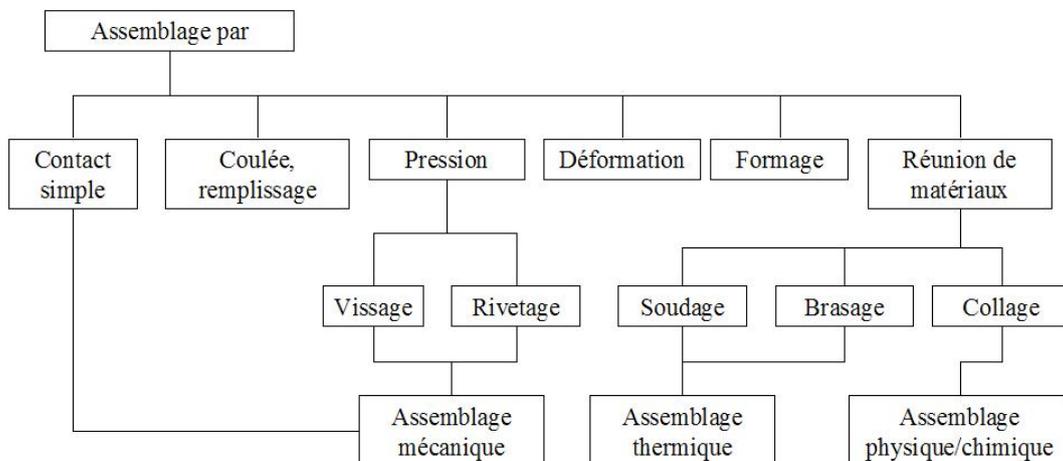


FIGURE 2.1: Les techniques d'assemblage selon [Schindell-Bidinelli \(1992\)](#)

Il est possible de tenter de répertorier au sein de ces trois familles d'assemblages les principaux assemblages rencontrés dans le domaine du génie civil (hors structures en maçonneries). Ceci a été réalisé dans le tableau 2.1. Il est important de noter que cette classification n'est pas aisée car certaines techniques peuvent relever de plusieurs familles. Dans le cas du transfert des efforts entre armatures passives et actives et béton et/ou coulis par exemple, il a été décidé de ne faire apparaître que la composante mécanique de l'adhérence bien qu'une partie physico-chimique existe également.

On constate que pour la majorité des structures de génie civil, les techniques d'assemblage

mécaniques sont les plus couramment utilisées. Pour le cas particulier des structures métalliques, les aciers actuels permettent cependant de recourir le plus souvent à des assemblages par soudage et donc à des assemblages dits "thermiques". Si les opérations de reprise de bétonnage, de clavage peuvent relever de l'assemblage physique/chimique, l'utilisation du collage structural moderne avec polymère est plus récente et donc moins rencontrée en génie civil.

Pour le cas des méthodes d'assemblages plus traditionnelles rencontrées en génie civil, un référentiel conséquent a aujourd'hui été construit sur le sujet des dispositions nécessaires pour le dimensionnement et l'exécution de ces opérations d'assemblages ([Eurocode 2 \(2006\)](#), [Eurocode 3 \(2007\)](#), [Eurocode 4 \(2006\)](#), et [Eurocode 5 \(2005\)](#) et les fascicules du CCTG, principalement [Fascicule 65 \(2012\)](#), et [Fascicule 66 \(2012\)](#)). Ce référentiel n'est pas aussi abouti dans le cas des techniques faisant appel au collage structural en génie civil et c'est une des raisons qui en limite aujourd'hui son utilisation.

Type de structure	Assemblage mécanique	Assemblage thermique	Assemblage physique/chimique
Structures en béton	Transfert des efforts entre armature passive et béton, Transfert des efforts entre armatures de précontrainte et béton ou coulis, Dispositifs d'ancrage des armatures de précontrainte, Dispositifs de rabotage d'armatures (manchons), Reprise de bétonnage ou clavage		Reprise de bétonnage ou clavage, Utilisation de renforts collés
Structures métalliques	Rivetage à chaud, Boulonnage précontraint	Soudage	Utilisation de renforts collés
Structures en bois	Assemblages par contacts (exemple : enture ou embrèvement, tenon et mortaise), Boulonnage, Goujons, Tirefonds, Vis, Clous, Pointes		Fabrication du lamellé-collé, Utilisation de renforts collés
Connexion dans les structures mixtes	Goujons soudés à la structure métallique pour les structures acier-béton, Connexions par entailles, ou connecteurs locaux dans le cas des structures bois-béton	Goujons soudés à la structure métallique	Connexion par collage (peu utilisée) dans les deux cas acier-béton et bois-béton, Collage possible des connecteurs locaux dans le bois pour le cas des structures bois-béton

TABLE 2.1: Principaux type d'assemblages structuraux utilisés dans les structures de génie civil

On pourra se reporter à [Barquins and Fadel \(1999\)](#) pour obtenir davantage d'informations sur l'historique de l'utilisation du collage structural. Il convient toutefois de retenir que son utilisation connaît un essor conséquent depuis environ 30 ans, [CETIM \(2006\)](#), et que dans le domaine du génie civil, il est utilisé en France depuis moins de vingt ans principalement pour le renforcement de structures par composites collés, [Hamelin \(2006\)](#). On dispose donc d'un retour d'expérience relativement faible sur l'utilisation de cette technologie en regard de la durée de vie des structures de génie civil (100 ans pour les ponts). Cette méthode présente toutefois de nombreux avantages vis-à-vis des techniques d'assemblages usuels (assemblage multi-matériaux, relative facilité de mise en oeuvre, meilleure répartition des efforts, réduction du poids des structures, [Cognard \(2002\)](#)). Il convient donc de se pencher sur les potentialités offertes par cette technologie d'assemblage dans le domaine du génie civil.

## 2.2 Quelques éléments sur le transfert mécanique des efforts par collage structural

Avant de décrire le transfert des efforts par collage structural, une première partie sera consacrée à des éléments généraux de cette technologie : la définition de cette technique d'assemblage, un bref descriptif des principales résines utilisées, les principales théories de l'adhésion, et les modes préférentiels de sollicitation. Ceci nous permettra ensuite d'aborder la description du transfert des efforts par collage qui est encore souvent mal appréhendée et est pourtant nécessaire à la compréhension des méthodes de dimensionnement de ce type d'assemblage mais aussi de ses limites.

### 2.2.1 Eléments généraux sur le collage structural

Nous retiendrons la définition du collage structural suivante proche de celle donnée dans [Cognard \(1994\)](#) : le collage permet d'assembler des substrats au moyen de substances adhésives (colles, adhésifs) et il est structural dès lors qu'il confère à l'assemblage considéré une résistance mécanique suffisante dans les conditions environnementales de service. La notion de résistance mécanique suffisante est assez subjective, et c'est la raison pour laquelle certains auteurs ont quantifié une résistance minimale de l'adhésif structural : 10-12 MPa en traction dans [Bretton and Villoutreix \(2005\)](#) et 7 MPa dans [Couvrat \(1992\)](#). Dans le cas du génie civil, il est possible de noter que le collage peut être dit structural lorsqu'il est mis en oeuvre dans une partie de la structure critique du point de vue de son fonctionnement mécanique.

On retiendra que les principaux adhésifs structuraux font partie des colles dites à durcissement chimique (à l'inverse des colles à durcissement physique), [Chataigner \(2008\)](#). Ce sont également le plus souvent des polymères thermodurcissables car la majorité des polymères thermoplastiques n'ont pas les propriétés mécaniques suffisantes pour être qualifiés de structuraux. Les cinq principaux types d'adhésifs utilisés pour des applications structurales sont les suivants, [Bruneaux \(2004\)](#) :

- Les résines polyuréthanes : résines thermodurcissables très souples mais ayant des capacités mécaniques ultimes relativement faibles.
- Les adhésifs acryliques : comprennent les cyanoacrylates, les adhésifs anaérobies et les acryliques modifiés. Cette dernière famille d'adhésifs est plus récente et présente de bonnes propriétés de souplesse.
- Les adhésifs phénoliques : résines ayant un comportement relativement fragile.
- Les polyimides : résines coûteuses résistant à haute température et donc principalement utilisées dans le domaine de l'aéronautique.
- Les adhésifs époxy : résines aujourd'hui les plus utilisées qui peuvent se présenter sous la forme de mono ou bi-composant et qui peuvent polymériser à froid comme à chaud. Elles présentent des résistances en traction élevées mais peuvent souffrir de faiblesse en pelage.

Dans [CETIM \(2006\)](#), les auteurs décrivent les avantages des résines époxy qui en font aujourd'hui la famille de résine structurale la plus utilisée en génie civil : leur performance mécanique, leur relative facilité de mise en oeuvre, leur coût, et leur relative stabilité dans le temps. On

notera que les résines formulées peuvent en outre être chargées pour en modifier leurs propriétés que ce soit pour en améliorer leur mise en oeuvre (viscosité, temps de polymérisation, ...) ou leurs performances mécaniques. On pourra se reporter à [Kinloch \(1987\)](#) pour plus de détails.

Lorsqu'on réalise un collage structural, on utilise donc une de ces résines avec deux substrats. Ce sont les efforts dits d'adhésion qui permettent à l'ensemble de fonctionner. Ils peuvent être de nature diverse et plusieurs théories s'attachent à les décrire (théorie de l'ancrage mécanique, théorie de l'adsorption, théorie électrostatique, théorie de la diffusion, théorie de la liaison chimique, [Kinloch \(1987\)](#)). Bien que de nombreux travaux sont encore en cours sur ces aspects, on retiendra que l'adhésion résulte en général de plusieurs phénomènes (mécanique et physico-chimique dans la plupart des cas) et qu'elle dépend fortement de la préparation des surfaces réalisée. Les différentes opérations de préparation de surface disponibles sont données dans [CETIM \(2006\)](#) et ont pour objectif d'oter les couches faibles superficielles, de modifier la rugosité pour optimiser l'accrochage mécanique, d'éventuellement modifier la composition chimique du substrat en surface, et de modifier son énergie de surface (augmentation de sa mouillabilité, [Lebris \(2003\)](#)). Il est commun de reconnaître que ces efforts d'adhésion sont suffisants pour l'application visée dès lors que le mode de rupture de l'assemblage sous une sollicitation mécanique représentative intervient dans l'un des deux adhérents ou dans la résine d'assemblage. L'étude des modes de rupture et en particulier l'identification de sa localisation est donc primordiale dans le cas d'essais sur assemblages.

En ce qui concerne les modes de sollicitations des assemblages collés, il est courant d'en distinguer quatre principaux dans les guides de dimensionnement : la traction/compression, le cisaillement, le clivage et le pelage. Afin d'éviter les modes de rupture fragiles, il est toutefois conseillé de dimensionner des assemblages collés pour qu'ils fonctionnent en cisaillement et/ou en compression. C'est la raison pour laquelle, la suite de ce chapitre est dédiée à la compréhension du fonctionnement de l'assemblage collé en cisaillement.

### 2.2.2 Transfert des efforts dans le cas d'un comportement élastique

Les méthodes de dimensionnement initiales s'appuyaient sur la détermination d'une contrainte de cisaillement moyenne obtenue en divisant la capacité de l'assemblage par sa surface. Ceci implique, pour que le résultat obtenu soit représentatif des capacités de l'assemblages, que la contrainte de cisaillement soit identique sur l'ensemble de la surface collée. Or, ceci n'est vrai que dans le cas des résines souples, donc non structurales.

Il existe en fait des concentrations de contrainte de cisaillement aux extrémités de l'assemblage. Ce phénomène a été décrit pour la première fois par O. Volkersen grâce à son modèle analytique dit du "Shear Lag", [Volkersen \(1938\)](#) et illustré en figure 2.2. Il a été ensuite plus largement investigué à l'aide de modèles plus étoffés intégrant la déformation en cisaillement des adhérents [Tsai et al. \(1998\)](#), ou encore la contrainte d'arrachement qui est également présente à l'interface [Hadj-Ahmed \(1999\)](#). Une bonne revue de ces modèles élastiques est disponibles dans [Chataigner \(2008\)](#) et [Da Silva and Ochsner \(2008\)](#).

Les niveaux de concentration de contrainte dans ce modèle élastique sont pilotés par les raideurs des deux adhérents (module d'Young et épaisseur) et la raideur de la couche de colle (module de cisaillement et épaisseur). La transmission de l'effort en cisaillement est donc effec-

tuée sur des zones plus ou moins importantes aux deux extrémités de l'assemblage sollicité en cisaillement. Il est possible d'associer ce phénomène de localisation à l'existence d'une longueur d'ancrage caractéristique de l'assemblage étudié (matériaux et géométries). Cette longueur d'ancrage correspond plus concrètement à une longueur optimale au delà de laquelle l'augmentation de capacité de l'assemblage ne sera pas significative. Expérimentalement, nous avons pu observer son existence à de nombreuses reprises. Un exemple des résultats expérimentaux de nos investigations est donné en figure 2.3.

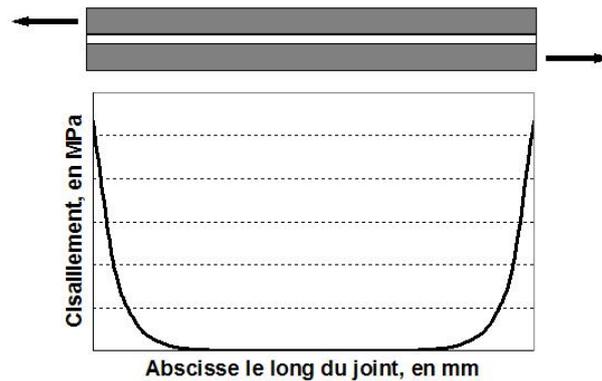


FIGURE 2.2: Profil de cisaillement classique le long d'un joint collé obtenu par la méthode de O. Volkersen

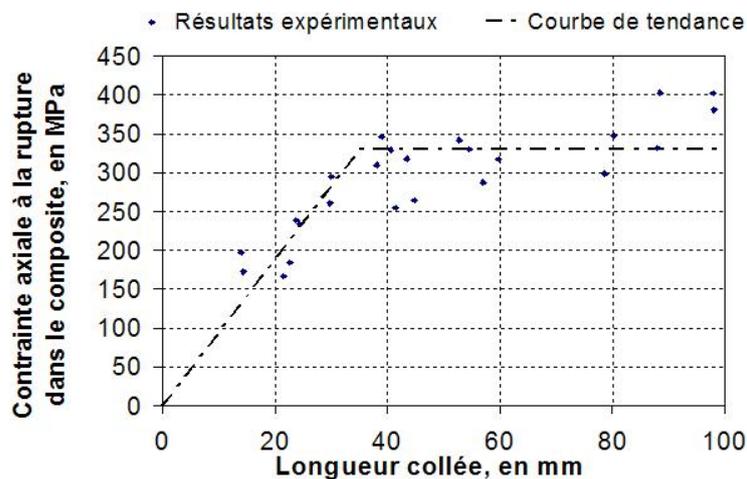


FIGURE 2.3: Résultats d'investigations expérimentales sur assemblage collé de capacités à rupture en fonction de la longueur collée, [Chataigner et al. \(2010b\)](#)

A partir de la théorie de O. Volkersen, il est possible d'exprimer cette longueur d'ancrage  $L_c$  dans le cas d'un comportement élastique. C'est ce que nous avons fait dans [Chataigner \(2008\)](#) en fonction d'un paramètre  $\xi$  qui correspond à l'efficacité recherchée (en général 95 %)(equation

2.1).

$$L_c = \frac{1}{\lambda} \cdot \left( \frac{1}{1-\xi} \left( \xi M + \sqrt{1 + \xi^2 \cdot (M^2 - 1)} \right) \right) \quad (2.1)$$

avec  $E_1$  et  $E_2$  les modules élastiques en traction respectifs de l'adhérent 1 et 2,  $G_c$  le module élastique de cisaillement de l'adhésif,  $e_1$  et  $e_2$  les épaisseurs respectives de l'adhérent 1 et 2,  $e_c$  l'épaisseur de la couche de colle,  $M$  le minimum de  $\frac{E_2 e_2}{E_1 e_1}$  et de  $\frac{E_1 e_1}{e_2 E_2}$ , et  $\lambda = \sqrt{\frac{G_c}{e_c} \cdot \left( \frac{1}{e_1 \cdot E_1} + \frac{1}{e_2 \cdot E_2} \right)}$ .

Cette équation basée sur la théorie de O. Volkersen permet dans la plupart des cas pour des matériaux ayant un comportement élastique (adhérents et résine) et pour des modes de rupture similaires de bien appréhender les phénomènes de concentration de contraintes et de capacités des assemblages étudiés comme nous avons pu le constater lors de nombreux essais dont des essais avec une résine élastique fragile (Etacol 492) représentés dans la figure 2.4. Nous avons également effectué des essais avec des matériaux ayant un comportement non linéaire (par exemple, la résine élastoplastique DP460 en figure 2.4) et avons pu constater dans ce cas que la théorie de O. Volkersen n'était plus adaptée. Le paragraphe suivant s'intéresse donc au transfert des efforts dans le cas de comportements non linéaires.

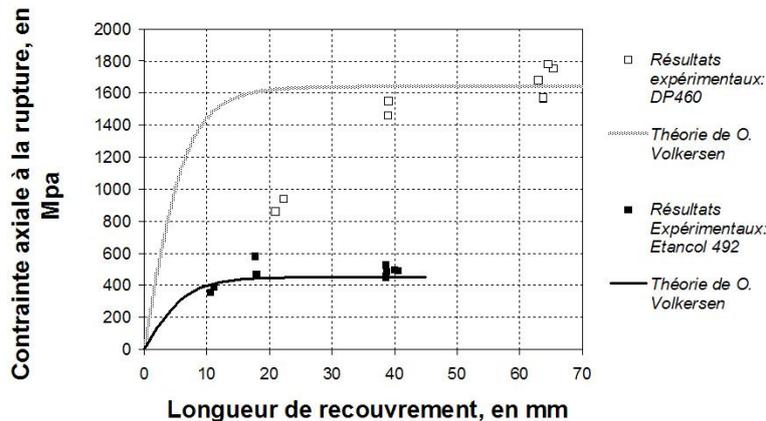


FIGURE 2.4: Comparaison de la théorie de Volkersen (1938) et des résultats expérimentaux

### 2.2.3 Transfert des efforts dans le cas d'un comportement non linéaire

Si pour certains cas, la théorie de O. Volkersen nous permettait de pouvoir prédire la longueur d'ancrage et donc de bien représenter la façon dont les efforts sont transférés par cisaillement via l'assemblage collé, nous en avons rencontré certains pour lesquels cette approche n'était pas quantitative (en particulier dans le cas du renforcement de structures par composites collés et dans le cas de l'utilisation d'une résine élastoplastique). Les cas du collage de renforcements composites sur support béton et sur support métallique seront abordés dans les chapitres suivants et ne seront donc pas développés ici. Nous allons donc nous intéresser dans cette partie au cas de l'utilisation d'une résine élastoplastique et de son incidence sur le transfert des efforts.

Nous avons réalisé de nombreuses investigations tant expérimentales que numériques sur le sujet (Chataigner et al. (2011b), Chataigner et al. (2010b), Duong et al. (2011), Alvarez-Lima et al. (2012), Mendoza et al. (2012), De los Rios et al. (2009)). Nous pouvons en retenir les éléments suivants :

- L'utilisation d'une colle ayant un comportement élastoplastique en traction permet d'augmenter la longueur d'ancrage caractéristique en cisaillement de l'assemblage collé. Dans Chataigner et al. (2010b), nous avons même proposé un nouveau critère de rupture intégrant l'existence d'une longueur plastique critique  $L_p$  de l'assemblage à ajouter à la longueur d'ancrage élastique pour obtenir la longueur caractéristique finale (figure 2.5).
- La plastification de la couche de colle en cisaillement peut être visible après un cycle de charge-décharge de l'assemblage (figure 2.6). Nous l'avons fait dans Chataigner et al. (2011b) et avons pu comparer nos mesures aux résultats de plusieurs outils de modélisation.
- Il est possible de modéliser ce phénomène par éléments finis avec des éléments finis solides classiques mais aussi avec des éléments finis de type plaque layerwise LS1 (ou modèles M4) qui seront détaillés dans le paragraphe suivant (Duong et al. (2011), Alvarez-Lima et al. (2012), Mendoza et al. (2012), De los Rios et al. (2009)). On notera que l'utilisation de ces derniers permet de limiter le nombre de mailles et donc le temps de calcul, ils permettent également de s'affranchir des problèmes de singularités numériques présents aux extrémités des interfaces.
- Enfin, il est important de noter que l'élastoplasticité de l'adhésif entraîne la création de contraintes de cisaillement résiduelles internes après des cycles de charge-décharge dont le niveau peut être appréhendé grâce aux modèles décrits dans (Duong et al. (2011), Alvarez-Lima et al. (2012), Mendoza et al. (2012), De los Rios et al. (2009)) mais aussi grâce à un modèle analytique moins riche développé dans Thibon (2008) (figure 2.7).

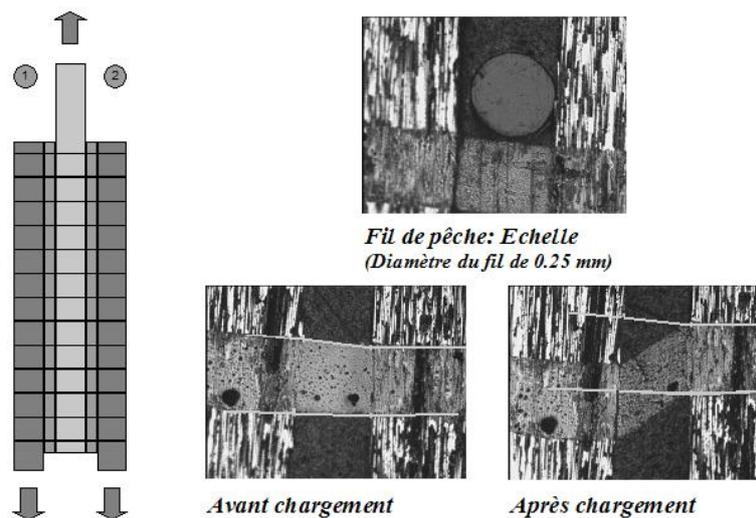


FIGURE 2.6: Schema du joint testé dans et exemple de photos de la déformation locale en cisaillement de la couche de résine obtenue avant et après un cycle de charge-décharge

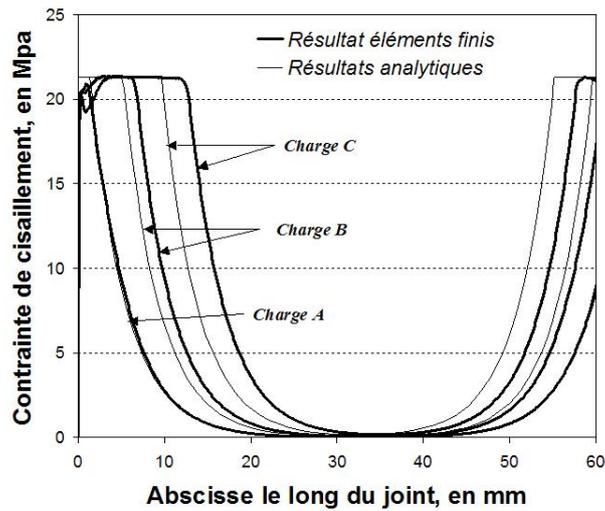


FIGURE 2.5: Comparaison de profils de cisaillement obtenus pour une résine élastoplastique par une méthode analytique et une méthode de type éléments finis pour trois charges différentes A, B et C

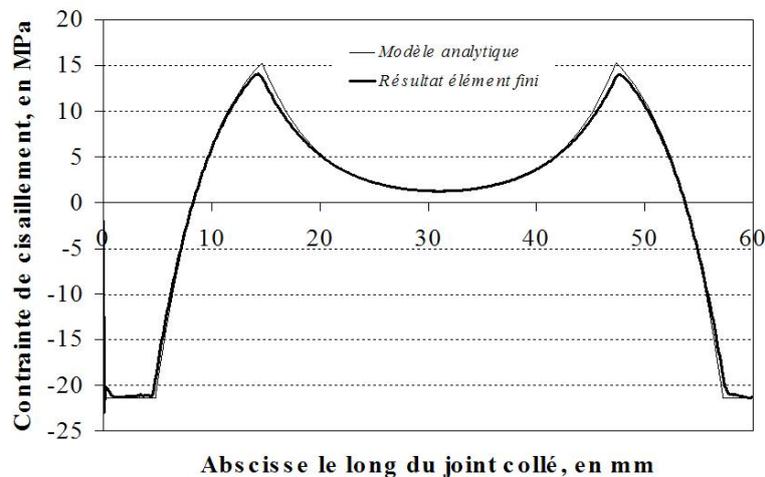


FIGURE 2.7: Comparaison des profils de cisaillement après une charge/décharge du joint collé obtenus par la méthode analytique et le calcul de type éléments finis (l'effort appliqué est nul.)

#### 2.2.4 Utilisation des modèles LS1 pour la modélisation des assemblages collés

Dans le cadre de mes travaux, j'ai pu également modestement contribuer au développement et à l'utilisation des modèles LS1 (anciennement M4) pour la modélisation du transfert des efforts dans les assemblages collés. La résolution de ce type de problème se confronte en effet à l'existence de singularités mathématiques aux extrémités de l'assemblage qui complexifie l'utilisation de modèles éléments finis classiques et l'expression de critères de rupture robustes et reproductibles (Caron et al. (2015)).

Les modèles LS1 ont été développés au laboratoire Navier pour le calcul des multicouches et s'avèrent adaptés au calcul d'assemblages collés. Ils consistent à définir une cinématique équivalente par couche considérée. Chaque couche est approchée par une plaque de Reissner pour laquelle des efforts intérieurs et des déformations généralisés sont définis (efforts normaux, moments et efforts tranchants) (Naciri et al. (1998), Carreira et al. (2002)). Les couches sont liées les unes aux autres par des interfaces auxquelles sont également associés des efforts et des déformations généralisés (cisaillements et arrachement). Un exemple de simplification d'un problème multicouche où les couches minces sont approchées par une interface équivalente par les modèles LS1 est donné en figure 2.8. On notera que les interfaces peuvent également correspondre à des zones d'épaisseur physique nulle entre les couches (zone interfaciale) (ceci dépend du choix du modélisateur). Il est possible d'associer différents types de comportement à ces interfaces : élastique dans le cas d'une interface parfaite, avec discontinuité dans le cas d'un délaminage par exemple, ou encore avec plasticité (De los Rios et al. (2009)).

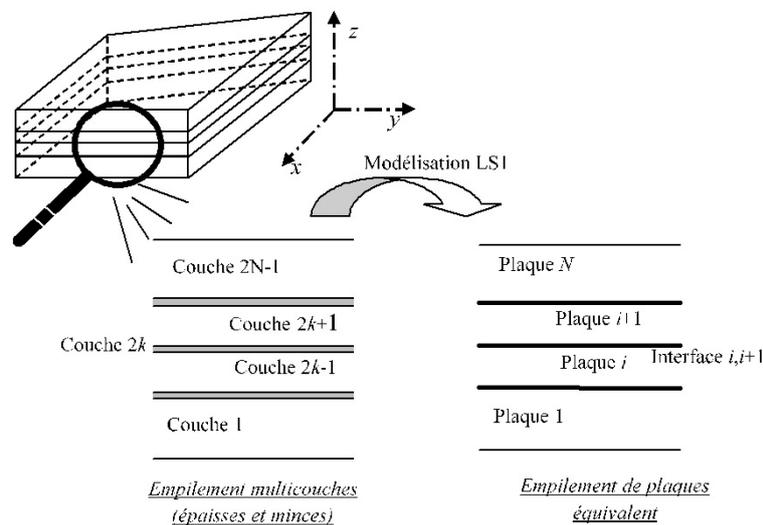


FIGURE 2.8: Représentation de la modélisation LS1

Pour certains cas particuliers, notamment dans le cas des assemblages collés pour lequel seulement deux couches peuvent parfois être considérées, il est possible en effectuant certaines hypothèses sur la distribution des contraintes au sein des couches de résoudre analytiquement le problème (Hadj-Ahmed (1999)). Ceci permet de fournir pour des cas simples un modèle permettant d'accéder à des valeurs de contraintes aux interfaces finies et donc de pouvoir exprimer des critères de rupture pertinents. C'est de cette manière que le modèle MacLam a été construit pour résoudre analytiquement le transfert des efforts dans le cas d'un empilement symétrique, d'un comportement élastique avec des conditions de chargement spécifiques décrites dans Diaz-Diaz et al. (2002) (<http://maclam.cimav.edu.mx/maclam3.htm>).

Ces modèles ont également été récemment implémentés dans un code aux éléments finis dédié MPFEAP (Multiparticle Finite Element Analysis Program) (Nguyen and Caron (2006)) et ceci nous a permis de comparer des approches classiques par éléments finis volumiques aux approches LS1 développées notamment pour le cas des interfaces collées ayant un comportement plastique

(Duong et al. (2011), Mendoza et al. (2012), Alvarez-Lima et al. (2012)). Ceci a permis de démontrer la précision de ces modèles, leur gain en terme de maillage et donc de temps de calcul (qui peut atteindre un facteur supérieur à 30), et enfin la possibilité d’expression de critères de rupture quantitatifs puisqu’ils permettent de s’affranchir des singularités (Caron et al. (2015)). Ils nous ont également permis de vérifier les longueurs d’ancrage déterminées expérimentalement.

## 2.3 Travaux sur l’optimisation de ce transfert d’efforts

Les investigations précédentes ont montré que dans le cas d’une résine ayant un comportement élastique, ou élasto-plastique, nous disposons de moyens satisfaisants de modélisation permettant d’appréhender le transfert des efforts par cisaillement d’un assemblage collé et de déterminer la longueur d’ancrage caractéristique d’un assemblage, élément essentiel pour sa conception.

La majorité des concepteurs sont également intéressés à l’augmentation de la capacité de leurs assemblages et de nombreuses études se sont donc attachées à proposer des solutions en ce sens. C’est l’objet de ce paragraphe dans lequel nous allons effectuer une revue non exhaustive des solutions proposées et présenter les travaux que nous avons pu réaliser sur cet aspect. Pour une revue plus exhaustive des solutions étudiées, on pourra se reporter à DaSilva and Adams (2007b).

### 2.3.1 Revue bibliographique des solutions étudiées pour optimiser le transfert des efforts par collage

Les premiers auteurs qui se sont intéressés à l’amélioration des capacités des assemblages collés ont bien entendu travaillé sur les extrémités de l’assemblage, lieu des concentrations de contrainte de cisaillement dans la couche de colle. Dans Adams and Peppiatt (1974), les auteurs ont ainsi étudié l’influence de la géométrie du bourrelet de colle et du profilage des adhérents aux extrémités pour des comportements d’adhérents et de résine linéaires. L’assouplissement des adhérents aux extrémités permet en effet de diminuer la valeur maximale de la contrainte de cisaillement dans la couche de colle et donc la capacité de l’assemblage. Pour obtenir cet assouplissement, il est également possible de travailler sur l’épaisseur des adhérents (Maravegias and Triantafillou (1996), Adams and Peppiatt (1973)) mais aussi sur leur raideur en utilisant par exemple des matériaux à propriétés graduées (Apalak and Gunes (2005), Boss et al. (2003)).

De manière similaire, certains auteurs ont proposé l’utilisation de différentes résines au sein d’un même assemblage pour obtenir une couche adhésive à propriété graduée et de ce fait diminuer les concentrations de contrainte (Fitton and Broughton (2005), Pires et al. (2003), DaSilva and Adams (2007a)). Enfin, dans certains cas et pour des comportements élastiques, il est possible de proposer un profil d’adhérent optimisé afin d’approcher un profil de cisaillement constant le long du joint de colle. C’est ce qui a été proposé dans Hadj-Ahmed et al. (2001) mais ceci n’a pas encore été vérifié expérimentalement.

### 2.3.2 Proposition de la géométrie d'ancrage courbe

Pour notre part, partant du constat que la majorité des guides de conception recommandait le fonctionnement des assemblages collés en cisaillement ou en compression, nous avons décidé de travailler sur une géométrie modifiée de l'assemblage avec des épaisseurs d'adhérents et de colle constantes permettant un travail mixte de l'assemblage selon ces deux modes de sollicitation.

Nous avons dans un premier temps travaillé à la caractérisation de la capacité ou de la limite élastique de certains adhésifs pour étudier l'influence de la contrainte de compression sur les capacités en cisaillement (réalisation d'essais de traction simple, d'essai brésilien et d'essai de compression simple). Un exemple de résultat obtenu est donné en figure 2.9. Ces résultats ont été comparés à des résultats de caractérisation sur assemblages par des essais de torsion-compression dans [Chataigner \(2008\)](#) et une bonne corrélation a été constatée. Ils sont également cohérents avec les observations d'autres études de la littérature ([Creac'hcadec et al. \(2014\)](#)). On remarque que la contrainte hydrostatique a une influence importante sur les capacités de la résine en cisaillement que ce soit dans le cas d'une résine élastique (Sikadur 330 et Etancol 492) ou d'une résine élastoplastique (DP460). Ceci explique en particulier pourquoi les contraintes locales d'arrachement en extrémité d'assemblage sont néfastes (sollicitations de pelage et de clivage à éviter) et vient en appui de notre proposition de géométrie courbe pour l'optimisation de l'ancrage par collage.

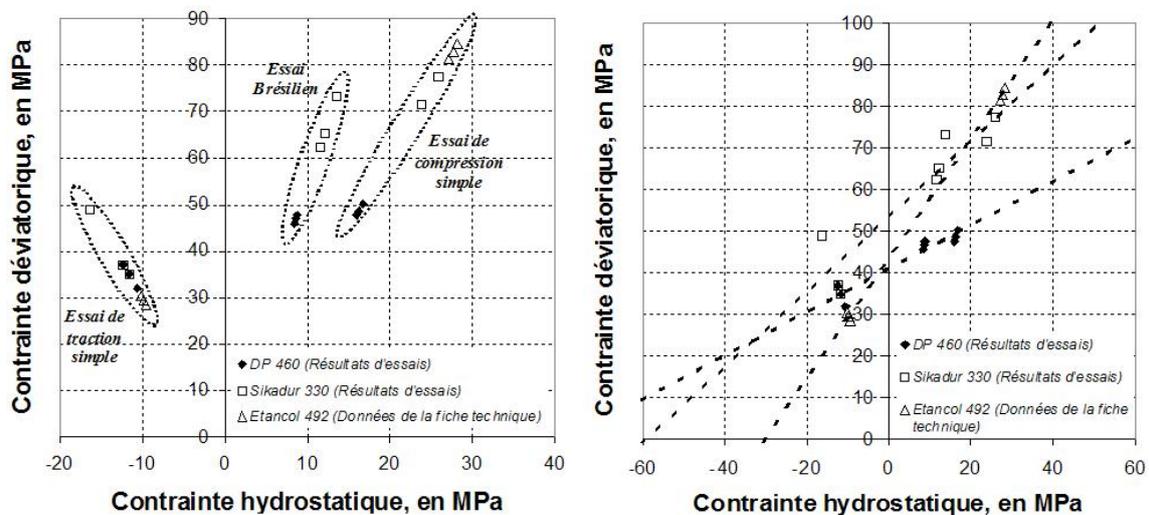


FIGURE 2.9: Résultats en terme de contraintes maximales dans le diagramme p-q pour les trois adhésifs étudiés : à gauche, mise en valeur des trois différents essais ; à droite, tracé de l'enveloppe résultat en adoptant un critère linéaire pour les trois adhésifs étudiés

Dans [Chataigner \(2008\)](#) et [Chataigner and Caron \(2011\)](#), nous avons présenté les différentes investigations que nous avons ensuite réalisées sur la géométrie du joint courbe pour le cas d'un adhésif composite collé sur un adhésif métallique. Celles-ci incluent des travaux de modélisation qui s'appuient sur :

- le développement d'un modèle analytique de type LS1 formulé en coordonnées cylin-

driques pour la résolution dans le cas élastique des champs de contrainte au niveau de l'adhésif. Davantage de détails sur ce modèle seront donnés dans le paragraphe suivant.

- l'utilisation du code aux éléments finis Abaqus pour la résolution des champs de contrainte dans le cas d'un comportement élastique, et élasto-plastique.

Dans le cas d'un comportement élastique, les deux méthodes ont permis d'obtenir des résultats très proches en terme de champs de contrainte, validant ainsi l'approche analytique proposée. Dans le cas du comportement élasto-plastique, la méthode des éléments finis nous a permis de comprendre le gain possible en terme de capacité via cette géométrie d'assemblage.

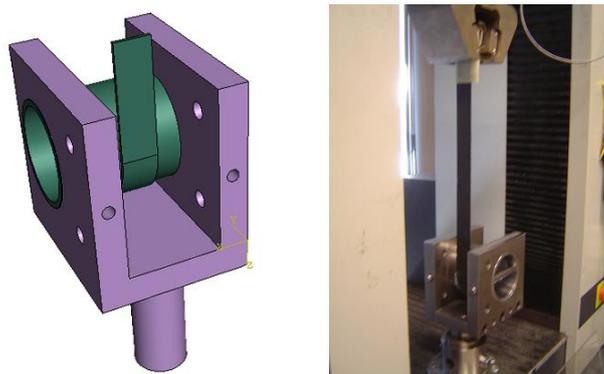


FIGURE 2.10: Schéma et photo du dispositif d'essai

Des investigations expérimentales ont également été réalisées grâce à des dispositifs spécifiques de réalisation et d'essais des assemblages (figure 2.10). Le tableau 2.2 reprend les principaux résultats obtenus lors de ces investigations pour lesquelles les assemblages étaient collés sur une longueur d'ancrage identique pour tous les échantillons (80 mm) et supérieure à leur longueur d'ancrage élastique. Les ancrages courbes étaient collés sur un cylindre de rayon 100 mm et nous avons pour certains ajouté une longueur de frottement entre l'adhérent composite et l'adhérent métallique. Nous avons pu constater dans tous les cas une augmentation de la capacité ultime de l'assemblage pouvant atteindre plus de 340 % dans le meilleur des cas. A la suite de ces investigations, un brevet sur cette géométrie d'ancrage a été déposé, [Caron and Chataigner \(2008\)](#).

Dans le cadre de la thèse de H. Chafi, nous travaillons actuellement sur l'amélioration en fatigue apportée par cette géométrie courbe. En effet, des investigations de modélisation ont pu mettre en relief l'apport possible de cette géométrie sur le comportement en fatigue des assemblages collés [Chataigner \(2008\)](#). La figure 2.11 présente ainsi l'évolution du taux de restitution d'énergie déterminée par éléments finis pour les deux géométries planes et courbes et en prenant en compte ou non un coefficient de frottement après fissuration. On constate que la prise en compte de ce coefficient de frottement après fissuration permet une stabilisation de la fissuration puisqu'un maximum en terme de taux de restitution d'énergie est observé. Bien que nous devons vérifier expérimentalement l'amélioration apportée, les premiers essais sont très concluants et devraient être prochainement publiés.

Procédé	Adhésif	Configuration	Lieu de rupture	Capacité	Ecart-type
				en MPa	en %
Plat carbone	DP 460	Plan	Joint de colle	641	13
		Courbe	Joint de colle	785	23
		Courbe et frottement	Joint de colle	1167	4
Plat carbone	Sikadur 330	Plan	Joint de colle	656	13
		Courbe	Renfort	2242	5
		Courbe et frottement	Renfort	1935	8
Tissu carbone	Sikadur 330	Plan	Joint de colle	283	25
		Courbe	Renfort	349	6
		Courbe et frottement	Renfort	374	6

TABLE 2.2: Résultats des investigations expérimentales sur joints courbes

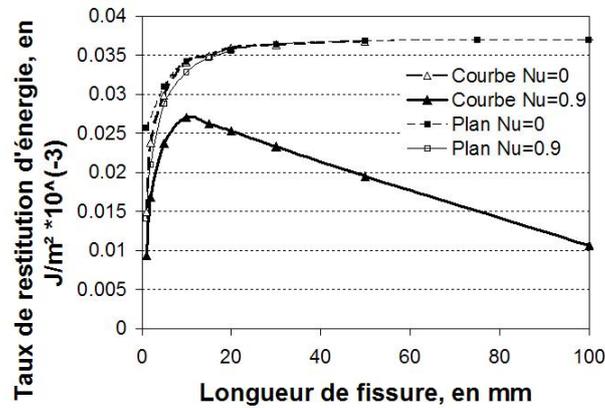


FIGURE 2.11: Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure pour les deux configurations courbe et plane et avec ou sans frottement en fonction de la longueur de fissure pour une contrainte imposée de 100 MPa

### 2.3.3 Description et résolution d'un modèle de type LS1 développé dans le cas de la géométrie courbe

Nous avons formulé un modèle analytique en adoptant la démarche des modèles LS1 présentées au début du chapitre pour le joint courbe présenté en figure 2.12 afin d'accéder au champ de contrainte d'arrachement et de cisaillement dans l'adhésif dans le cas d'un comportement élastique. Pour ce faire, le second adhérent a été considéré comme infiniment rigide et le problème a été formulé en coordonnées cylindriques. On s'est également placé dans le cas des plaques minces afin de pouvoir négliger l'effort tranchant (hypothèse de Love-Kirchhoff).

Pour la couche correspondant à l'adhérent 1, il a donc été possible de formuler les efforts généralisés correspondants en coordonnées cylindriques :

$$N_{\alpha\beta}(\theta, z) = \int_R^{R+e_1} \sigma_{\alpha\beta}(r, \theta, z) dr \quad M_{\alpha\beta}(\theta, z) = \int_R^{R+e_1} r \cdot \sigma_{\alpha\beta}(r, \theta, z) dr \quad (2.2)$$

avec  $N$  et  $M$  respectivement les efforts normaux et les moments généralisés, les indices grecs parcourant les coordonnées cylindriques  $r$  et  $\theta$ .

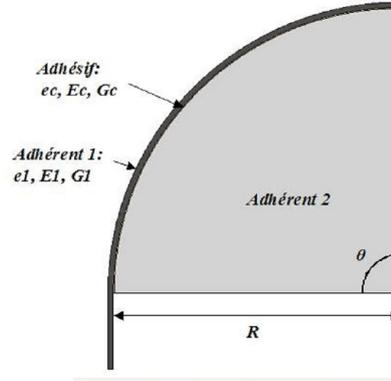


FIGURE 2.12: Schéma du joint courbe étudié

En écrivant les équations d'équilibre généralisées, et en se plaçant en contraintes planes, il est alors possible d'obtenir les équations différentielles en coordonnées cylindriques qui relient l'effort normal de l'adhérent 1 aux efforts d'interface :

$$\nu_c(\theta) = \frac{1}{R} \cdot \left( \frac{e_1}{2R - e_1} N_{\theta\theta, \theta\theta} - N_{\theta\theta} \right) \quad N_{\theta\theta, \theta} = \left( R - \frac{e_1}{2} \right) \cdot \tau_c(\theta) \quad (2.3)$$

avec  $\nu_c$  et  $\tau_c$  l'arrachement et le cisaillement dans le joint de colle,  $N_{\theta\theta, \theta}$  et  $N_{\theta\theta, \theta\theta}$  respectivement la dérivée première et seconde de  $N_{\theta\theta}$  par rapport à la variable  $\theta$ .

En prenant en compte les équations de comportement des matériaux, les conditions limites et la compatibilité des déformations, il est possible d'obtenir une troisième équation différentielle nécessaire à la résolution du problème. L'équation est du type :

$$N_{\theta\theta} = A\tau_{c, \theta}(\theta) + B\tau_{c, \theta\theta\theta}(\theta) + C\nu_{c, \theta\theta}(\theta) + D\nu_c(\theta) \quad (2.4)$$

avec  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  des constantes dépendant uniquement des paramètres géométriques et de comportement mécanique élastique des matériaux (cf. [Chataigner \(2008\)](#) pour plus de détails).

L'équation différentielle finale obtenue en combinant les trois équations précédemment énoncées est la suivante :

$$\left( \frac{B}{R - \frac{e_1}{2}} + \frac{Ce_1}{R(2R - e_1)} \right) N_{\theta\theta, \theta\theta\theta\theta} + \left( \frac{A}{R - \frac{e_1}{2}} \frac{C}{R} + \frac{De_1}{R(2R - e_1)} \right) N_{\theta\theta, \theta\theta} - \left( 1 + \frac{D}{R} \right) N_{\theta\theta} = 0 \quad (2.5)$$

La solution à cette équation différentielle s'exprime alors par une combinaison de fonction cosinus hyperbolique et sinus hyperbolique. Elle est détaillée dans [Chataigner \(2008\)](#). Elle a été

confrontée à des solutions existantes pour le cas plan (cas où  $R$  tend vers l'infini) et aux résultats d'un calcul aux éléments finis sous Abaqus indiquant une bonne concordance des différentes approches. Ce modèle nous a permis de vérifier que le joint courbe n'avait pas d'incidence dans le cas d'un comportement élastique sur la longueur d'ancrage caractéristique de l'assemblage et sur la valeur de la contrainte de cisaillement maximale au niveau de la couche de colle. En revanche, il a permis de vérifier que la géométrie permettait la création d'une importante composante de compression en extrémité d'assemblage, et que celle-ci augmentait avec la diminution du rayon de courbure. Nous n'avons pas développé ce modèle pour le cas d'une résine ayant un comportement non linéaire, mais il s'agit là d'une perspective de travail intéressante.

## 2.4 Conclusions et perspectives

Ce chapitre nous a permis de donner des éléments généraux sur la thématique du collage structural qui constitue aujourd'hui une des méthodes d'assemblage disponibles pour les concepteurs en génie civil et pour laquelle nous disposons de plus en plus de retour d'expérience pour des applications terrain qui seront détaillées dans les chapitres suivants. On retiendra que dans le cas du collage structural, le choix de la résine mais aussi la préparation de surface sont des éléments essentiels à la bonne tenue de l'assemblage. La préparation de surface permettra en effet de créer les efforts d'adhésion nécessaires à l'obtention d'un mode de rupture cohésif dans un des adhérents ou dans l'adhésif.

Nous avons détaillé dans ce chapitre le transfert des efforts par cisaillement dans le cas d'un adhésif ayant un comportement élastique fragile et dans le cas d'un adhésif ayant un comportement élastoplastique. Nous avons également abordé la notion de longueur d'ancrage caractéristique et détaillé comment le comportement de la résine pouvait affecter cette longueur d'ancrage. Cette partie est associée à un travail important concernant les outils de modélisation et la définition de critères de ruptures adaptés à la problématique de l'assemblage par collage, notamment sur le sujet de l'utilisation et du développements de modèles de type LS1 (qui permettent de s'affranchir des singularités) qu'ils soient analytiques, ou accessibles sur des codes aux éléments finis. Ces outils de modélisation ont vocation à être diffusés auprès des bureaux d'étude pour simplifier la conception des assemblages par collage. C'est la raison pour laquelle nous travaillons pour chaque cas à la définition de modèles simples de résolution du transfert des efforts. Il reste encore un travail important à fournir sur ce point notamment dans le cas de comportements de colle non linéaires et de l'ancrage courbe.

Enfin, nous avons revu brièvement les moyens d'augmenter la capacité des assemblages collés en jouant notamment sur la raideur ou les épaisseurs des adhérents et/ou de l'adhésif ou sur la géométrie de l'assemblage comme nous l'avons proposé avec la géométrie courbe. Bien que des travaux additionnels sont en cours sur ce sujet, notamment sur la problématique de la fatigue, nous avons pu montrer que cette géométrie avait un intérêt pour des applications futures de type ancrage de hauban plat par exemple ([Chataigner \(2008\)](#)). Nous continuons à travailler sur cette thématique avec le laboratoire Navier notamment dans le cadre de la thèse d'Haitham Chafi pour laquelle nous nous sommes fixés comme objectif de vérifier nos prévisions théoriques par des investigations expérimentales en fatigue des assemblages collés dits courbes et de proposer des critères adaptés.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser à une application actuelle du collage structural en génie civil, à savoir le renforcement de structures en béton par composites collés.



## Chapitre 3

# Le cas du renforcement des structures en béton par composites collés

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Etat de l'art sur le renforcement de structures en béton par composites collés</b>	<b>40</b>
<b>3.2</b>	<b>Caractérisation du transfert des efforts</b>	<b>42</b>
3.2.1	Présentation du dispositif d'essai à simple recouvrement et des principaux résultats de l'essai	42
3.2.2	Proposition de la méthode d'exploitation basée sur l'utilisation d'un modèle de zone cohésive	44
<b>3.3</b>	<b>Optimisation de l'ancrage</b>	<b>46</b>
<b>3.4</b>	<b>Durabilité du transfert des efforts par collage</b>	<b>48</b>
3.4.1	Durabilité environnementale	48
3.4.2	Fluage	52
<b>3.5</b>	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>55</b>

---

La première application du collage structural en génie civil a consisté à la fin des années 1960 au renforcement de structures en béton par tôles collées [Theillout \(1983\)](#). Cette technique a ensuite été remplacée par la technique des composites collés à la fin des années 1980 avec des premières applications en France à la fin des années 1990. Il s'agit donc d'une technique relativement récente en génie civil pour laquelle nous acquérons de plus en plus de retour d'expérience. Cette technique tend à être de plus en plus utilisée en France en raison de la tendance à prolonger la durée de vie des ouvrages existants (réparation de l'ouvrage suite à une observation de dégradation ou adaptation à de nouvelles conditions d'exploitation), ou à les mettre en sécurité vis-à-vis des risques naturels, sismiques, ou technologiques.

Ce chapitre s'attache à décrire dans un premier temps la méthode de renforcement par composites collés, puis à détailler les études que nous avons pu mener pour améliorer la connaissance du transfert des efforts entre composite et béton, et les préconisations nationales sur ce sujet. Nous aborderons tout d'abord la caractérisation du transfert des efforts entre renfort et béton, son optimisation pour des cas particuliers, et enfin nos travaux s'attachant à étudier la durabilité de ce transfert d'efforts.

### 3.1 Etat de l'art sur le renforcement de structures en béton par composites collés

On pourra trouver un état de l'art exhaustif sur le sujet du renforcement de structures en béton par composites collés dans [FIB \(2001\)](#). On retiendra qu'en Europe et en France, il n'existe pas pour le moment de recueil normatif sur le sujet. L'AFGC a cependant édité un guide de recommandations en 2001 remis à jour en 2011 sur le sujet [AFGC \(2011\)](#), et a également publié un guide spécifique concernant son application pour le cas des renforcements sismiques en 2015 [AFGC \(2015\)](#).

La technique consiste à appliquer sur une structure en béton existante un matériau composite qui sera associé par collage structural en vue d'augmenter la capacité portante d'une structure (renforcement à la flexion, à l'effort tranchant, au poinçonnement, en compression), ou de la réparer après endommagement ou détection d'un déficit d'armatures passives ou encore de la mettre en sécurité vis-à-vis de risques naturels ou technologiques comme le séisme par exemple. En France, on parle de "procédé de renforcement". Celui-ci associe un matériau composite à une résine structurale. Il existe deux grandes familles de procédés utilisés :

- Les plats pultrudés uni-directionnels collés sur site avec une résine époxy bi-composant polymérisant à froid. Ceux-ci sont le plus souvent utilisés dans le cas de renforcements à la flexion.
- Les tissus secs uni ou bi-directionnels imprégnés sur site avec la même résine que celle qui servira au transfert des efforts par collage. Celle-ci est le plus souvent de nature époxy et bi-composante polymérisant à froid. Ils sont plus souples que les plats pultrudés et sont le plus souvent utilisés dans le cas de renforcement de surfaces non planes (confinement de poteaux, renfort à l'effort tranchant).

Des photos de ces deux procédés sont données en figure 3.1. Un troisième type de procédé moins utilisé, consiste à appliquer des tissus pré-imprégnés sur site avec des matrices polymérisant à chaud. Ces procédés sont plus lourds à mettre en oeuvre et il n'existe pas d'application en génie civil à notre connaissance en France.



FIGURE 3.1: Photos de l'installation d'un plat pultrudé à fibres de carbone à gauche et d'un tissu sec bidirectionnel à fibres de carbone à droite

Il existe différentes fibres et différentes matrices utilisées pour la réalisation des composites de renforcement de structures. Les trois principaux types de fibres pour lesquels il existe des procédés sont le verre, l'aramide et le carbone. En France, on utilise majoritairement des composites à fibre de carbone pour cette application. Les trois principaux types de matrices sont les résines époxy, les résines vinylesters, et les résines polyesters. Dans le cas du renforcement de structures en béton par collage, on utilise le plus souvent des matrices époxy qui ont en général de meilleures propriétés à long terme que les autres matrices [FIB \(2001\)](#). On retiendra que les composites utilisés en renforcement dans le cas des structures en béton ont en général un module élastique en traction dans le sens des fibres situé entre 150 et 210 GPa pour les plats pultrudés, et entre 30 et 120 GPa dans le cas des tissus secs.

Comme expliqué dans le chapitre précédent, le choix de l'adhésif et la préparation de surface sont des aspects essentiels du collage structural. Dans le cas des renforcements de structures en béton par composites collés, la documentation technique associée au procédé doit imposer une résine structurale et doit préciser la teneur des opérations de préparation de surface à réaliser avant application. Le contrôle de ces éléments fait partie des missions de contrôle intérieur et extérieur. Afin de faciliter ces opérations, nous avons rédigé, lors de mon expérience au laboratoire d'Autun, un guide de recommandations qui précise leur teneur [RLPC \(2010\)](#).

La capacité des renforcements par composites collés est bien souvent limitée par la capacité de l'assemblage par collage. En outre, en raison du peu de retour d'expérience à long terme sur la technique, de nombreuses interrogations subsistent sur sa durabilité, notamment sur la durabilité du transfert des efforts par collage. C'est la raison pour laquelle nous avons concentré nos travaux sur la caractérisation et l'optimisation du transfert des efforts entre béton et composite et sur l'étude de la durabilité du collage structural dans ce cas.

## 3.2 Caractérisation du transfert des efforts

Le transfert des efforts entre renfort composite collé et béton est un des éléments clés de la technologie. Il est donc important de disposer d'outils expérimentaux dédiés à sa caractérisation. De nombreux auteurs se sont intéressés à cet aspect et une classification des différents essais est donnée dans Yao et al. (2005). Pour notre part, nous avons surtout travaillé sur l'essai de cisaillement sur assemblage à simple recouvrement.

Une machine d'essai spécifique de ce type a en effet été développée pour la caractérisation du transfert des efforts entre tôle collée et béton (Theillout (1983)) et a ensuite été adaptée par J.P. Sudret au laboratoire d'Autun pour pouvoir caractériser le transfert des efforts entre composites collés et béton en laboratoire LCPC (2006). Nous avons pris la suite de ses travaux pour améliorer le dispositif expérimental existant, travailler sur les méthodes d'exploitation des résultats et la compréhension des phénomènes et proposer un protocole d'essai.

### 3.2.1 Présentation du dispositif d'essai à simple recouvrement et des principaux résultats de l'essai

Un schéma du dispositif d'essai est donné en figure 3.2. On y distingue un vérin équipé d'un système de mors plats autobloquants qui permettent de se fixer sur l'extrémité du renfort composite. L'ensemble est en appui sur la partie en béton de l'éprouvette afin d'assurer une sollicitation de traction dans l'axe du renfort et de limiter les efforts de pelage parasites. On pourra trouver plus de détails sur ce dispositif dans Chataigner et al. (2009). On notera que pour une réalisation satisfaisante de l'essai, il convient de débiter le collage du renfort à plusieurs centimètres du bord afin d'éviter les phénomènes de rupture en coin que nous avons étudié dans Benzarti et al. (2011b).

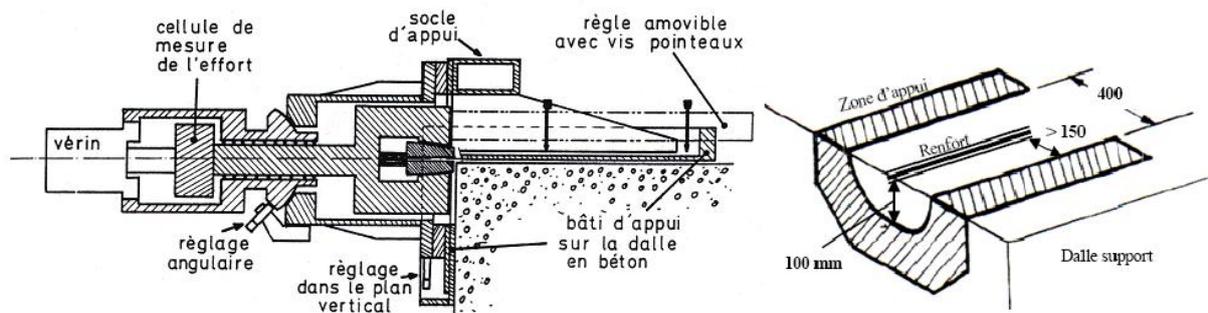


FIGURE 3.2: Schéma de la machine de traction à gauche, et zone d'appui du bâti sur la dalle-échantillon à droite

Pendant l'essai, que l'on pilote en général à incrément de déplacement de l'extrémité du renfort constant, on enregistre l'évolution de l'effort en fonction du temps. Un exemple de résultat est donné en figure 3.3. On y constate deux phases : une première d'augmentation quasiment linéaire de l'effort, puis une phase de stabilisation liée à la propagation d'une fissure dans le béton près de l'interface. Il est également possible d'instrumenter la surface supérieure du renfort à

l'aide de jauges de déformation pour s'intéresser de plus près au transfert local des efforts. Un exemple de résultat d'enregistrement de ce type de profil de déformation est également donné en figure 3.3. On constate plusieurs phases pendant l'essai sur ces relevés de profils de déformation : une première phase pendant laquelle on vérifie le transfert des efforts selon la théorie du Shear Lag avec une longueur d'ancrage élastique, une seconde pendant laquelle on commence à avoir de l'endommagement et une augmentation de la longueur de transfert, et enfin une dernière pendant laquelle la fissure se propage.

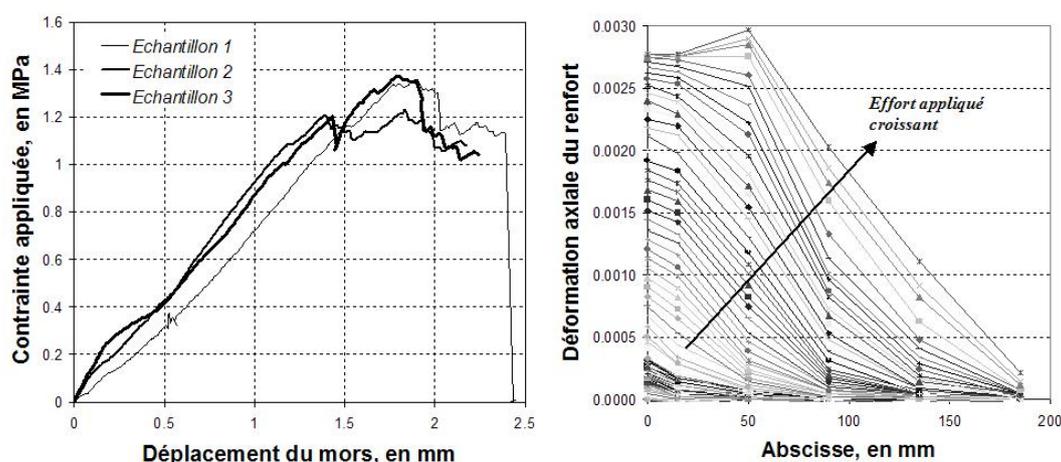


FIGURE 3.3: Un résultat d'essai en terme de relation effort-déplacement et de profils de déformation axiale le long du renfort

A l'issue de l'essai, il est possible d'obtenir plusieurs résultats. Le premier concerne le mode de rupture. Dans le cas du collage de renforcements composites sur béton, il est usuel d'obtenir sans vieillissement un mode de rupture cohésif dans le béton près de la couche de colle (figure 3.4). Ceci démontre que la préparation de surface a été adéquate et que le choix de la résine était judicieux. A ce titre, des préconisations particulières sur le béton en surface avant application du renfort sont requises [AFGC \(2011\)](#) (contrôle des défauts de surface, résistance au pastillage, et préparation de la surface par sablage ou ponçage). Le second résultat relevé correspond bien entendu à la capacité de l'assemblage qui conditionnera le taux de fonctionnement du renfort dans la phase de conception. Le troisième résultat concerne la longueur d'ancrage nécessaire pour pouvoir transmettre cet effort. Plusieurs exploitations sont possibles sur cet aspect. En France, on utilise la méthode préconisée dans le guide de l'AFGC [AFGC \(2011\)](#) dans laquelle nous avons inclus une partie concernant l'essai à simple recouvrement. Enfin, il est possible de définir un comportement d'interface à partir de l'essai. Pour cet aspect, plusieurs méthodes existent également. Deux de ces méthodes sont détaillées dans le protocole d'essai du LCPC que nous avons rédigé : la méthode préconisée par le guide de l'AFGC et une méthode basée sur l'utilisation d'un modèle de zone cohésive [Chataigner et al. \(2010a\)](#).



FIGURE 3.4: Photo d'un échantillon après rupture

### 3.2.2 Proposition de la méthode d'exploitation basée sur l'utilisation d'un modèle de zone cohésive

Nous allons détailler dans ce paragraphe la seconde méthode d'exploitation qui n'est pas intégrée au guide de recommandations de l'AFGC mais qui est développée dans la méthode d'essai du LCPC, et qui est basée sur l'utilisation d'un modèle de zone cohésive bilinéaire pour l'interface. Cette méthode est également intégrée au guide de recommandation Italien sur le sujet du renforcement de structures en béton par composites collés [CNR \(2004\)](#). On notera que certains auteurs développent actuellement des modèles en mode mixte qui permettent de prendre en compte l'influence de l'arrachement sur l'endommagement ([De Lorenzis and Zavarise \(2008\)](#)).

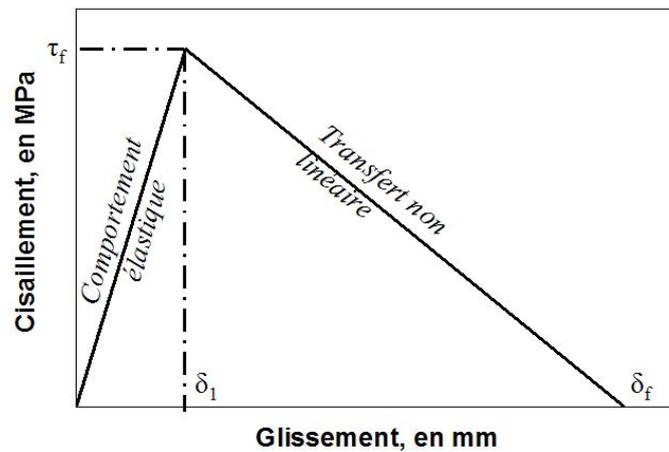


FIGURE 3.5: Modèle bilinéaire de zone cohésive

$$\begin{aligned}
 \tau(\delta) &= \tau_f \cdot \frac{\delta}{\delta_1} (\delta \leq \delta_1) \\
 \tau(\delta) &= \tau_f \cdot \frac{\delta_f - \delta}{\delta_f - \delta_1} (\delta_1 < \delta \leq \delta_f) \\
 \tau(\delta) &= 0 (\delta > \delta_f)
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Le modèle consiste à adopter pour une interface équivalente (qui correspond à la couche de colle et aux deux interfaces) un modèle de comportement à deux pentes reliant la contrainte de cisaillement au glissement local (équivalent de la déformation de cisaillement) (figure 3.5 et équations 3.1). La première partie du comportement est linéaire élastique jusqu'à la contrainte de cisaillement maximale  $\tau_f$ , et la seconde correspond à un endommagement local menant à la fissuration jusqu'au glissement maximal  $\delta_f$ . Le résultat de l'adoption de ce type de modèle est donné en figure 3.6. On y retrouve les trois phases identifiées à partir de mesures par jauges de déformation : une phase élastique correspondant aux résultats du modèle de O. Volkersen, une phase avec endommagement, puis une phase de propagation de la fissure. Il est possible de déterminer les champs de contrainte de cisaillement avec une approche analytique reposant sur les hypothèses de O. Volkersen à partir de ce comportement d'interface. Davantage de détails sur l'expression analytique de la contrainte axiale et de la contrainte de cisaillement avec ce modèle sont donnés dans Chataigner (2008) et des comparaisons avec des résultats expérimentaux sont présentés dans Chataigner et al. (2011a).

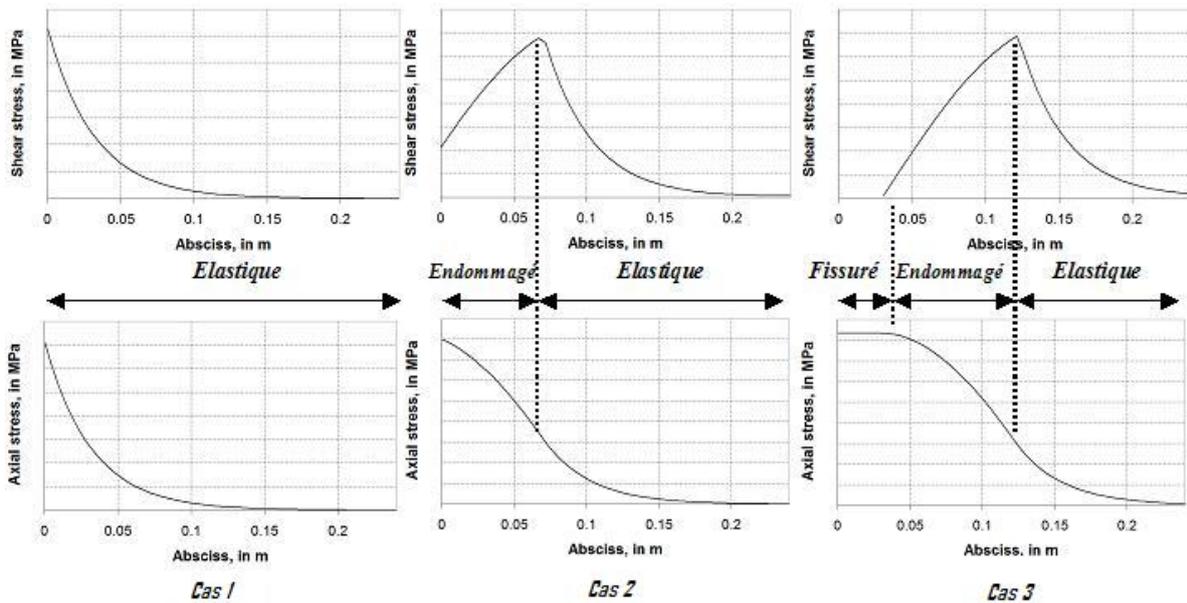


FIGURE 3.6: Description de l'évolution du profil du cisaillement et de la contrainte axiale dans l'adhérent 1 au cours du chargement

La détermination de cette loi de comportement nécessite la connaissance de trois paramètres. Dans Chataigner et al. (2010a), nous recommandons pour ce faire l'utilisation des propriétés du béton pour la détermination de la contrainte de cisaillement ultime  $\tau_f$ , des propriétés élastiques des matériaux et de la géométrie de l'assemblage pour la détermination de la pente initiale  $\frac{\tau_f}{\delta_1}$  et enfin de la capacité ultime pour la détermination du glissement maximal  $\delta_f$ . Il est possible ensuite à partir de ces paramètres de déterminer la longueur d'ancrage caractéristique de l'assemblage qui est composée de la longueur d'ancrage élastique  $L_{elast}$  (equation 3.2) et de la longueur d'ancrage de la partie endommagée  $L_{anc,end}$  (equation 3.3). On pourra retenir que pour des procédés

de renforcement usuels à fibre de carbone, la longueur d'ancrage totale sans vieillissement est d'environ 100 à 150 mm dans le cas des tissus secs et d'environ 200 mm dans le cas des plats pultrudés [Chataigner \(2008\)](#).

$$L_{elast} = \frac{1}{1 - \xi} \cdot \sqrt{\frac{t_a t_f E_f}{G_a}} \quad (3.2)$$

avec  $t_a$  l'épaisseur de la couche de colle,  $t_f$  l'épaisseur du renfort composite,  $E_f$  le module élastique du renfort composite,  $G_a$  le module de cisaillement de la couche de colle,  $\xi$  le paramètre d'efficacité généralement fixé à 0,95.

$$L_{anc,end} = \sqrt{\frac{E_f t_f (\delta_f - \delta_1)}{\tau_f}} \cdot \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{\delta_f}{\delta_1} - 1} \right) \quad (3.3)$$

### 3.3 Optimisation de l'ancrage

Dans certains cas, l'effort maximal que peut transférer l'assemblage collé ou la longueur d'ancrage disponible sur la structure peuvent s'avérer insuffisants. Certains auteurs ont donc travaillé à l'augmentation de la capacité des ancrages notamment dans le cas des renforts de structures à l'effort tranchant ou encore de renforcement à la flexion de poteaux. Nous avons pu au laboratoire d'Autun travailler sur deux solutions proposées par les fabricants pour augmenter la capacité de l'assemblage.

La première a été testée par J.P. Sudret et les résultats sont donnés dans [LCPC \(2006\)](#). Il s'agissait d'une solution de mèche d'ancrage pour tissu proposée par l'entreprise Freyssinet (figure 3.7). Celles-ci se sont révélées satisfaisantes puisqu'elles ont permis d'atteindre la capacité à rupture du renfort composite lors de l'essai de cisaillement. Bien qu'elles soient plus longues à mettre en oeuvre, elles permettent de limiter la longueur nécessaire pour le transfert des efforts et d'augmenter la capacité de l'assemblage notamment pour des renforcements à l'effort tranchant.



FIGURE 3.7: Photos de la solution des mèches d'ancrage pour tissu et d'un échantillon de cisaillement après essai [LCPC \(2006\)](#)

La seconde solution que nous avons pu tester correspond à une solution d'ancrage pour des systèmes de types plats pultrudés proposées par Freyssinet pour la jonction entre des poteaux et des poutres notamment dans le cadre de renforcement de piles de pont pour des raisons sismiques AFGC (2015). Ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de R. Sadone Sadone (2011). Un schéma du dispositif final est donné en figure 3.8. Celui-ci est réalisé grâce à une dépultrusion du système plat pour recréer un profilé circulaire ancrable dans la semelle après perçage. Il permet de modifier le transfert des efforts en extrémité du composite et nous avons réalisé des essais de cisaillement à simple recouvrement pour en estimer l'efficacité. La plupart des résultats sont donnés dans Sadone (2011) et Sadone et al. (2010). Un exemple de résultat est donné en figure 3.9. On peut y constater deux améliorations importantes : la première concerne bien entendu l'augmentation de la capacité maximale de l'assemblage, la seconde concerne l'augmentation de la ductilité de l'assemblage. Ce dernier paramètre est très important dans le cadre du renforcement sismique.

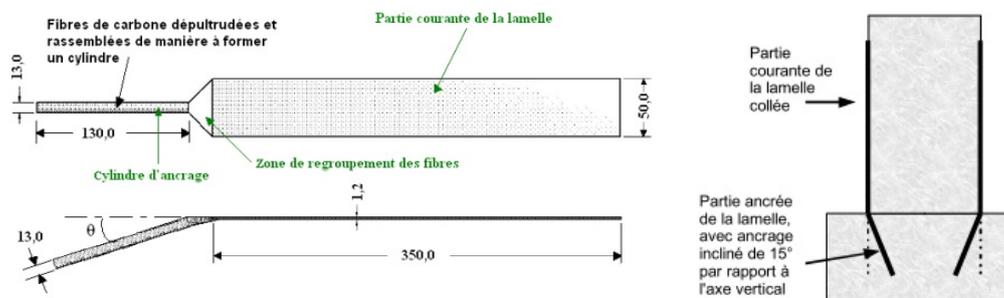


FIGURE 3.8: Schémas des lamelles optimisées et de leur mise en place à la jonction poteau-semelle Sadone (2011)

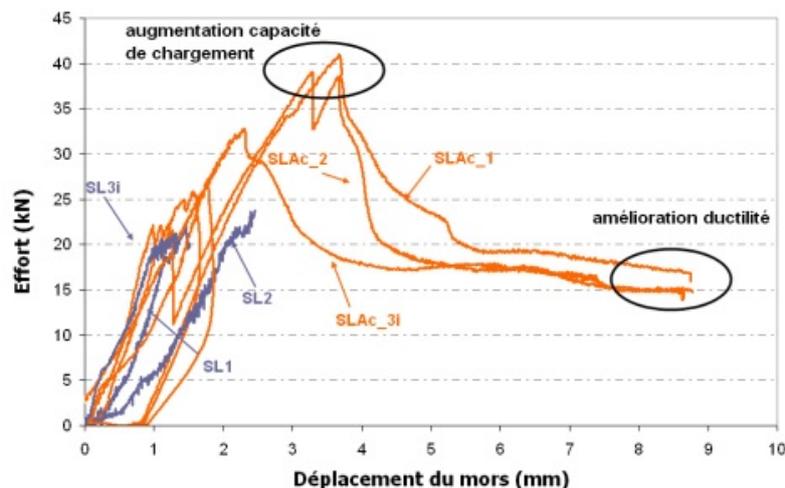


FIGURE 3.9: Comparatif des courbes expérimentales obtenues lors des essais de cisaillement sur échantillons collés et échantillons avec ancrage optimisé Sadone (2011)

### 3.4 Durabilité du transfert des efforts par collage

Un des derniers freins à l'utilisation de la technique de renforcement de structures en béton par composites collés concerne la connaissance de la durabilité de ces procédés. Bien qu'il existe certaines études sur ce sujet, elles sont malheureusement bien souvent adaptées à un type de procédé et un ou plusieurs types de conditions environnementales. Il reste donc à travailler sur ce point pour pouvoir estimer l'impact du vieillissement sur les procédés et éventuellement proposer des procédures expérimentales évaluant les performances des différents procédés. Dans les codes de dimensionnement existants, des coefficients de sécurité additionnels sont actuellement pris en compte sur cet aspect [Gangarao et al. \(2006\)](#). Il convient également de les vérifier et de les ajuster.

D'après [Karbhari et al. \(2003\)](#), dans le cas des renforcements par composites collés, l'agression des polymères par l'humidité est un des phénomènes les plus critiques qu'il convient donc d'étudier en priorité. C'est la raison pour laquelle nous avons travaillé en collaboration avec des entreprises détentrices de procédés en France sur ce sujet. Dans un premier temps, nous présenterons les travaux que nous avons réalisés sur le sujet du vieillissement en milieu humide seul, puis nous présenterons les travaux réalisés sur la thématique du fluage.

#### 3.4.1 Durabilité environnementale

En collaboration avec le LCPC, et plusieurs entreprises détentrices de procédés de renforcement (SIKA, et Etandex), nous avons ainsi mis au point et mené des campagnes dites d'évaluation de la durabilité sous humidité de renforcements collés sur béton lors de mon expérience au laboratoire d'Autun. Ces campagnes expérimentales consistaient à suivre l'évolution des propriétés d'assemblages collés et des matériaux mis en jeu pendant leurs stockages en conditions de vieillissement dites "accélérées". L'accélération des processus de dégradation des polymères en jeu par l'humidité a été réalisée en utilisant une température de stockage de 40 °C (cette température reste inférieure à la température de transition vitreuse des résines étudiées) et un milieu de stockage saturé en humidité à plus de 95 %.

En ce qui concerne les suivis réalisés sur les matériaux seuls, il a été décidé de :

- Procéder à un suivi des capacités en compression du béton pendant la durée du vieillissement sur des carottages réalisés dans les échantillons.
- Procéder à un suivi de plusieurs propriétés des adhésifs utilisés (figure 3.10) : à savoir, leur prise de masse sur des échantillons à l'état massique, leurs propriétés en traction sur éprouvettes massiques normalisées, et leurs propriétés thermiques et plus particulièrement leur température de transition vitreuse par calorimètre différentiel à balayage modulée et visco-analyseur (on pourra trouver davantage de détails sur ces méthodes dans [Michel et al. \(2015\)](#) et [Menard \(2008\)](#)). On notera que la température de transition vitreuse correspond à la température pour laquelle le polymère passe d'un état vitreux donc rigide à un état caoutchoutique. Il s'agit donc d'une propriété essentielle utilisée pour déterminer les températures de service acceptables dans le cas d'un collage structural et donc d'un renforcement par composites collés. Le guide de l'AFGC conseille à ce titre de limiter la température de service à 10 °C sous la température de transition vitreuse.
- Procéder à un suivi des propriétés en traction des renforts composites.

- En ce qui concerne les suivis réalisés sur assemblages, deux types de suivis ont été effectués :
- Un suivi par essais dits "de pastillage" qui consistent à tester la capacité de l'assemblage en traction et qui est normalisé par l'EN 1542.
  - Un suivi par essais de cisaillement à simple recouvrement décrits dans les paragraphes précédents.

Une géométrie d'éprouvette spécifique a donc été adoptée afin de pouvoir réaliser l'ensemble des investigations. Chaque campagne d'essais comportait 13 échéances (1 référence et 12 échéances après vieillissement) et chacun des essais était répété entre 3 et 5 fois en fonction du référentiel de la méthode adoptée. On pourra trouver davantage de détails sur ces investigations dans [Benzarti et al. \(2011a\)](#) et [Chataigner et al. \(2010c\)](#). Nous ne détaillerons pas l'ensemble des résultats dans ce document, mais seulement les conclusions principales qu'il convient de retenir de ces investigations.



FIGURE 3.10: Photos des échantillons de résine à l'état massique utilisés pour les campagnes dites de durabilité

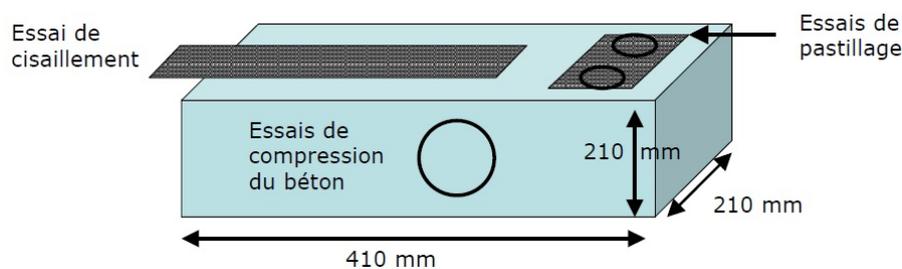


FIGURE 3.11: Schéma des échantillons utilisés pour les campagnes dites de durabilité

En ce qui concerne les propriétés des matériaux seuls, on notera que peu d'évolution a été relevée pour le comportement à la traction du renfort composite seul. En ce qui concerne le béton, bien que les renforts collés aient été appliqués après 28 jours de cure du béton en conditions humides et à 20 °C, l'hydratation du ciment a été favorisée par les conditions de vieillissement et nous avons donc pu observer une légère augmentation de sa résistance à la compression (environ 15 %). Enfin, en ce qui concernent les résines utilisées, plusieurs éléments se sont révélés intéressants. Tout d'abord, en fonction des systèmes époxy, l'évolution de la température de transition vitreuse est différente (figure 3.12). Nous avons pu constater dans un cas un phénomène

de post-réticulation de la résine permettant une augmentation de la température de transition vitreuse de celle-ci et donc de la température de service admissible. Dans le second cas, nous avons constaté une cinétique de diffusion de l'humidité plus importante et donc un phénomène de plastification prédominant par rapport à la post-réticulation [Yang et al. \(2008\)](#). Ceci se traduit par une chute de la température de transition vitreuse au début de la phase de vieillissement. Pour les deux résines, le vieillissement a conduit à une modification du comportement à la traction qui était initialement élastique fragile à un comportement élastoplastique (diminution de la raideur élastique, augmentation de la déformation maximale et présence d'un plateau). Tout comme pour la transition vitreuse, la cinétique de dégradation a été plus importante pour la résine notée B.

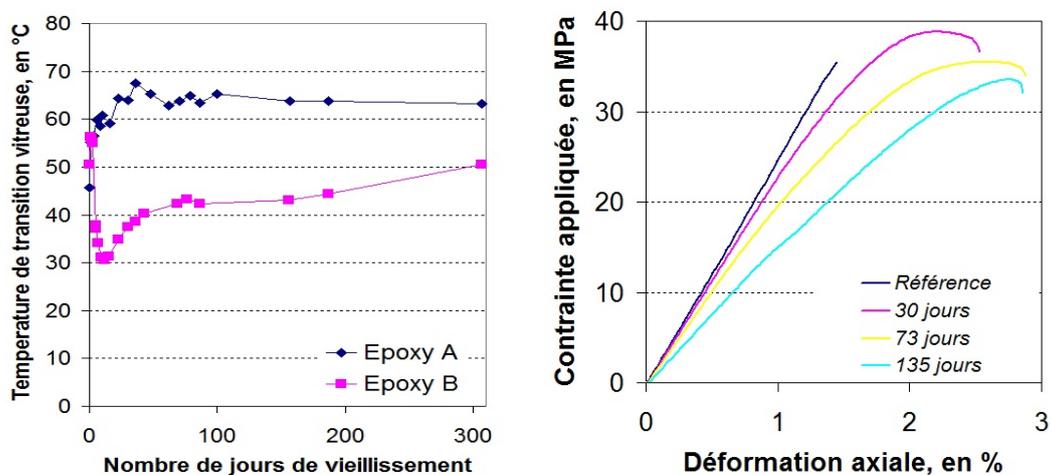


FIGURE 3.12: Evolution de la température de transition vitreuse pour deux résines époxy étudiées et du comportement à la traction pour une des résines pendant les campagnes de vieillissement

En ce qui concerne l'évolution du comportement des assemblages, dans le cas de l'essai de pastillage, sur la période étudiée, nous avons pu remarquer une diminution de la capacité à rupture de l'assemblage dans le cas de la résine dont la cinétique d'absorption d'eau était la plus importante. Cette diminution de capacité était associée à une modification des modes de rupture de l'assemblage passant de 100 % cohésive dans le béton à un mode mixte cohésif dans le béton - cohésif dans la colle et/ou adhésif. Dans le cas de la résine dont la cinétique de dégradation était moins importante, nous n'avons pas observé de dégradation du comportement lors des essais de pastillage. Dans le cas de l'essai de cisaillement, dans le cas de la résine la moins affectée par l'humidité, une légère augmentation de la capacité de l'assemblage en cisaillement a pu être observée. Dans le cas de la seconde résine, nous avons observé peu d'évolution de celle-ci. Les résistances au pastillage et au cisaillement ne sont donc pas directement corrélées. Pour les deux résines cependant, nous avons observé des évolutions des modes de rupture de 100 % cohésif dans le béton à majoritairement cohésif dans la colle et/ou adhésif (figure 3.13). Il existe donc bien une dégradation localisée à l'interface qui, à l'échelle de notre étude, n'a pas eu d'impact sur la capacité de l'assemblage.

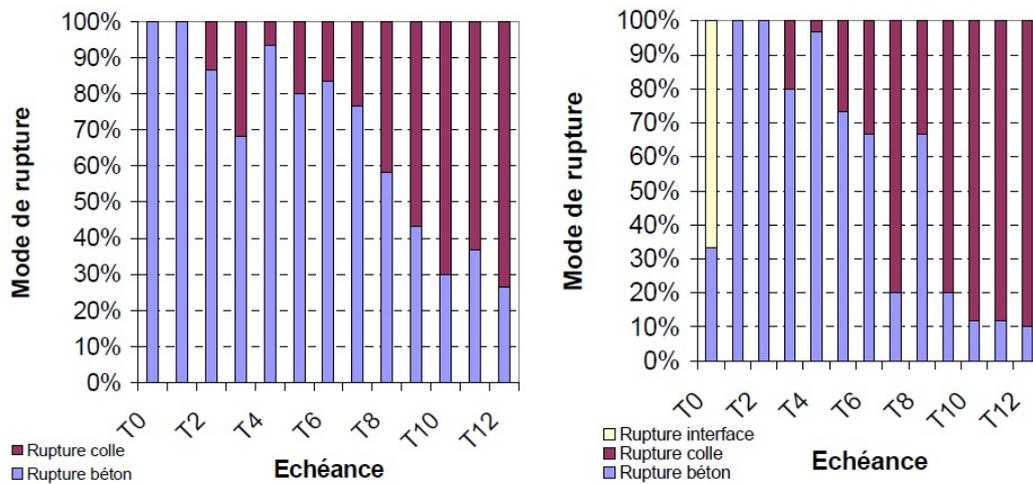


FIGURE 3.13: Evolution des modes de rupture pour l'essai de cisaillement pour le procédé A et le procédé B étudiés

Dans le cas de l'essai de cisaillement, il est également possible de s'intéresser à l'évolution du transfert des efforts comme expliqué dans les paragraphes précédents. Ceci a été fait et un des résultats obtenus est donné en figure 3.14. On constate que la longueur d'ancrage élastique est plus importante après vieillissement de la résine. Ceci est cohérent avec les observations effectuées sur l'évolution du comportement mécanique de la résine seule (assouplissement) et peut permettre d'expliquer pourquoi, bien qu'une évolution claire des modes de rupture ait été observée, peu d'évolution de la capacité de l'assemblage en cisaillement a été relevée. L'assouplissement de la résine permet en effet dans notre cas de contrebalancer la diminution locale de résistance de l'interface.

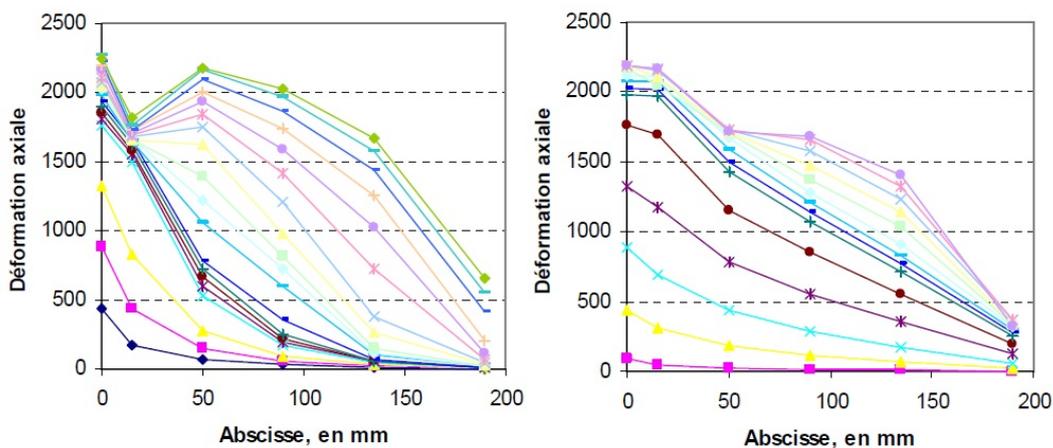


FIGURE 3.14: Evolution des profils de déformation mesurés pendant l'essai de cisaillement pour l'essai référence et l'essai après 200 jours de vieillissement pour le procédé B

On pourra donc retenir de ces investigations les éléments suivants :

- les résines époxy utilisées sont sensibles à l’humidité qui tend à plastifier le réseau et peut diminuer ses caractéristiques mécaniques et sa température de transition vitreuse. Cette sensibilité peut être évaluée en étudiant les cinétiques de prise de masse des adhésifs. On notera que dans nos investigations les phénomènes sont accélérés de manière importante et qu’il conviendra de comparer ces résultats à des résultats de vieillissement réel sur site.
- l’essai de pastillage ne semble pas être le plus adapté à l’étude du vieillissement de l’assemblage, et ses résultats ne sont pas corrélés à ceux de l’essai de cisaillement.
- l’essai de cisaillement a révélé que la dégradation de l’adhésif avait lieu près de l’interface béton mais qu’elle n’entraînait pas de diminution des capacités de l’assemblage, dans un premier temps, pour peu qu’une longueur d’ancrage suffisamment importante ait été mise en oeuvre. Il est donc important d’ajouter une longueur d’ancrage additionnelle en prévision du vieillissement de l’assemblage lors de la conception.

### 3.4.2 Fluage

Les investigations du paragraphe précédent ont été effectuées sans chargement pendant le vieillissement ce qui n’est pas représentatif de la réalité. Nous avons donc commencé à travailler sur l’aspect du comportement sous charge dans le cadre de la thèse de N. Houhou [Houhou \(2012\)](#) en abordant dans un premier temps le fluage de l’assemblage collé avant de commencer des investigations sur le vieillissement de l’assemblage sous charge qui sont encore en cours.

Nous avons pu montrer dans [Houhou et al. \(2014a\)](#) et à partir de la bibliographie [Yang et al. \(2006\)](#) que pour une contrainte constante le comportement en fluage d’un adhésif peut être décrit par le modèle de fluage de Burger avant le stade de fluage tertiaire (figure 3.15 et équation 3.4). Les paramètres du fluage dépendent alors bien entendu de la température appliquée, mais il est possible d’utiliser le principe de superposition temps-température développé dans [Leaderman \(1943\)](#) et [Tobolsky and Andrews \(1945\)](#) pour déterminer une courbe maîtresse à une température référence du fluage. Ceci a été réalisé sur un adhésif pour plusieurs niveaux de contrainte en utilisant un viscoanalyseur dans [Houhou et al. \(2014a\)](#). Les courbes maîtresses résultantes sont données dans la figure 3.16. On constate bien que le niveau de contrainte a une influence sur le comportement de fluage et un modèle de Burger modifié a donc été proposé dans [Houhou \(2012\)](#) pour prendre en compte cet aspect (dépendance vis-à-vis de  $\sigma_0$  des paramètres  $E_2$ ,  $\eta_1$  et  $\eta_2$  dans l’équation du comportement de Burgers). La mise au point de cette procédure nous a permis d’effectuer des études plus précises sur l’influence par exemple des charges présentes dans les résines époxy qui ne seront pas détaillées ici. On pourra se reporter à [Houhou \(2012\)](#) et [Houhou et al. \(2013\)](#) pour plus de détails.

$$\epsilon(t) = \sigma_0 \left( \frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left( 1 - \exp\left(\frac{-E_2 \cdot t}{\eta_2}\right) \right) \right) \quad (3.4)$$

Un dispositif d’essai spécifique de fluage d’assemblage collé composite/béton a ensuite été conçu afin d’observer son comportement. Ce dispositif est plus précisément décrit dans [Houhou et al. \(2014b\)](#) et consiste en un assemblage symétrique à double recouvrement au sein duquel

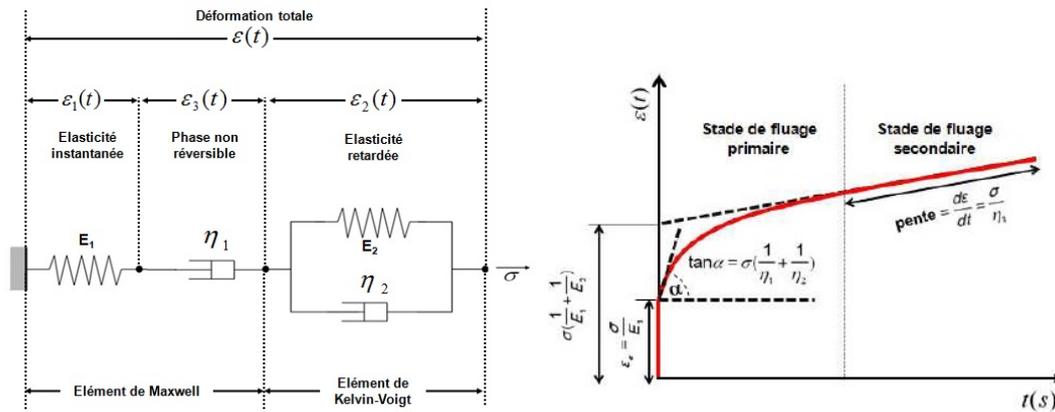


FIGURE 3.15: Modèle rhéologique du fluage de Burger et description de la courbe de comportement obtenue Houhou (2012)

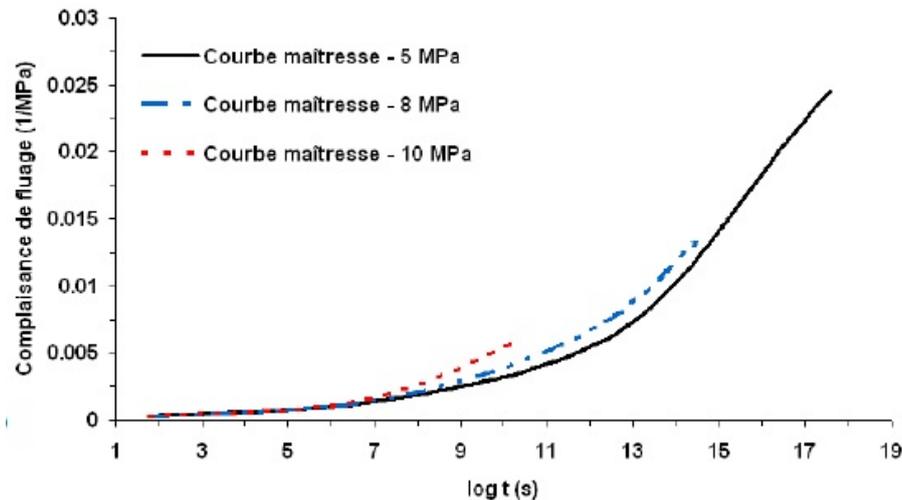


FIGURE 3.16: Courbes maîtresses de fluage obtenues pour un adhésif pour différents niveaux de contrainte Houhou (2012)

est interposé un vérin plat dont la mise en pression sollicite les assemblages (figure 3.17). Celui-ci s'est inspiré des travaux existants dans la bibliographie sur ce sujet et permet de pouvoir envisager la réalisation d'essais de cisaillement sur assemblage à simple recouvrement après vieillissement sous charge. Nous avons dans un premier temps effectué un essai de fluage à 20 °C sous humidité relative ambiante pendant un mois. La charge appliquée correspondait à 30 % de la capacité initiale en cisaillement de l'assemblage. Peu d'évolution significative a pu être démontrée après 1 mois de fluage, outre une légère redistribution du transfert des efforts sur une distance plus importante. Ce phénomène a pu être démontré également par modélisation en utilisant les paramètres de Burgers déterminés précédemment. Les résultats sont montrés en figure 3.18. On constate que le fluage conduit à une diminution des surcontraintes de cisaille-

ment (accentuée quand on prend en compte la dépendance du modèle de Burger vis-à-vis de la contrainte appliquée, modèle de fluage non linéaire) et donc à une légère augmentation (d'environ 10 % dans notre cas) de la longueur élastique d'ancrage. L'effet du fluage est donc plutôt bénéfique dans ce cas et on constate que la caractérisation sur l'adhésif semble en accord avec les observations sur l'assemblage collé.

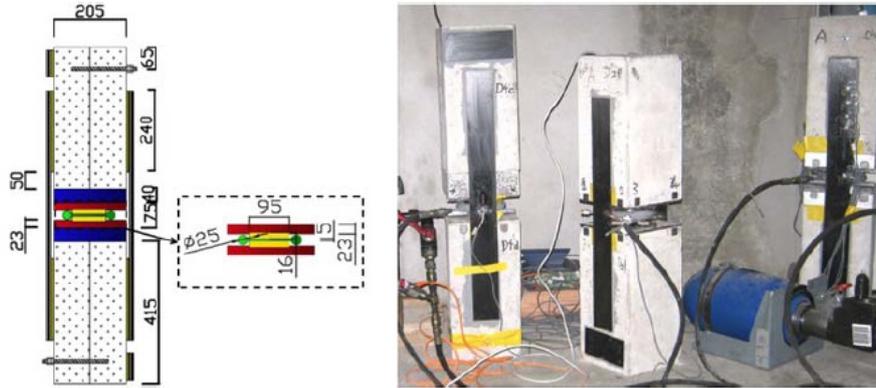


FIGURE 3.17: Schéma et photo du dispositif de fluage sur assemblage collé composite/béton Houhou (2012)

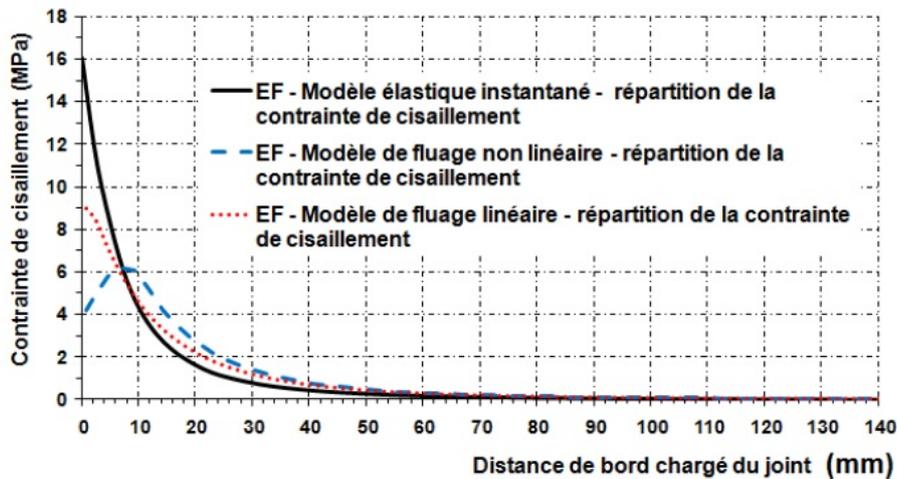


FIGURE 3.18: Résultats des profils de cisaillement après modélisation aux éléments finis et avec les paramètres de Burgers déterminés expérimentalement pour la résine Houhou (2012)

Afin de déterminer l'influence d'un couplage entre fluage et présence d'humidité, des campagnes expérimentales importantes ont ensuite été menées au laboratoire d'Autun avec le dispositif de fluage conçu dans les salles de vieillissement à 40 °C et plus de 95 % d'humidité relative. Les essais sont encore en cours de dépouillement et des essais additionnels doivent être réalisés, mais il semblerait que la présence d'humidité accélère de manière conséquente la cinétique de

fluage. Il reste un travail important à fournir sur cette problématique mais la majorité des outils nécessaires sont aujourd’hui disponibles pour tenter d’apporter des réponses à la question du couplage entre vieillissement humide et fluage.

### 3.5 Conclusion et perspectives

Ce chapitre a présenté l’ensemble de nos travaux sur la thématique du transfert des efforts par collage structural dans le cas du renforcement ou de la réparation de structures en béton par composites collés. Après avoir réalisé un rapide état de l’art sur la problématique, nous avons présenté nos travaux portant sur la caractérisation du transfert des efforts par cisaillement. Ceux-ci nous ont permis de mettre au point une procédure d’essai aujourd’hui publiée et utilisée (Chataigner et al. (2010a)) et d’intégrer notre géométrie d’essai au guide de l’AFGC (AFGC (2011)). Bien qu’elle ne soit pas intégrée à ce dernier, nous avons également proposé une méthode d’exploitation de cet essai basée sur l’utilisation d’un modèle de zone cohésive bilinéaire que nous avons également décrit dans cette partie.

Lors de mon expérience au laboratoire d’Autun, étant en lien constant avec les opérations de contrôle sur site de ce type d’application, et en s’appuyant sur nos travaux de laboratoire, nous avons également rédigé un guide de recommandations sur la teneur des contrôles à effectuer dans ce cas RLPC (2010). En continuité de cette action, je travaille aujourd’hui avec le laboratoire d’Autun et le CECP de Rouen à la mise au point d’un appareil d’essai de cisaillement facilement transportable sur site pour la réalisation des épreuves de convenance sur ouvrage (projet MACICO).

Cette partie présente également des travaux de recherche auxquels nous avons participé sur les thématiques de l’optimisation de l’ancrage des renforts composites notamment dans le cas des renforcements sismiques (AFGC (2015)) et sur la durabilité du transfert des efforts par collage. Nous nous sommes penchés sur deux aspects : le vieillissement en milieu humide et le fluage, et avons initié des travaux sur le couplage de ces deux phénomènes. Bien qu’il reste des travaux à mener sur cette question, il convient de retenir que :

- les résines époxyes n’ont pas toutes la même sensibilité et qu’en particulier leur teneur en charge et le type de charges utilisées ont un impact sur celle-ci.
- dans un premier temps, les deux phénomènes sont bénéfiques et tendent à redistribuer les efforts sur une longueur plus importante. Il convient donc de prendre en compte une marge de sécurité sur la longueur d’ancrage pendant la phase de conception.
- l’essai de cisaillement et l’essai de pastillage ne sont pas toujours corrélés. Les résultats de ce dernier, plus simple à mettre en oeuvre sur site, doivent donc être considérés avec précaution.
- les cinétiques de dégradation observées notamment dans le cas du vieillissement en milieu humide sont beaucoup plus importantes que sur site et nous ne connaissons pas encore les facteurs de corrélation.
- pour le cas du fluage, le modèle de Burger modifié et la prise en compte du principe de superposition temps température doivent permettre de rendre compte du fluage de l’adhésif, et de l’assemblage.



## Chapitre 4

# Le cas du renforcement des structures métalliques par composites collés

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Etat de l'art sur la thématique</b>	<b>58</b>
<b>4.2</b>	<b>Caractérisation du transfert des efforts entre renfort composite et métal</b>	<b>60</b>
4.2.1	Influence de la préparation de surface	60
4.2.2	Comparaison entre adhérent béton et acier	60
4.2.3	Collage sur matériaux anciens et utilisation de renforts composites à haut module	62
<b>4.3</b>	<b>Durabilité de l'assemblage</b>	<b>63</b>
4.3.1	Durabilité environnementale	63
4.3.2	Fatigue	65
<b>4.4</b>	<b>Efficacité du renforcement vis-à-vis de la problématique de la fatigue</b>	<b>65</b>
<b>4.5</b>	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>68</b>

---

Le succès du renforcement par composites collés sur structures en béton a favorisé la réflexion de sa transposition au domaine des structures métalliques. Les structures métalliques, bien que moins nombreuses que les structures en béton représentent en effet un patrimoine important dont la part peut varier en fonction du pays. Ainsi, si environ 15% des ponts du réseau routier national français sont métalliques ou mixtes, plus de 30% des ponts américains sont métalliques. La plupart de ces ouvrages sont en outre relativement anciens et certains sont réalisés avec des matériaux fragiles (fer puddlé) rendant les opérations de réparation ou de renforcement par soudage délicates [Kuhn et al. \(2008\)](#). Outre les besoins d'augmentation des capacités des ouvrages, le collage de matériaux composites peut également être utilisé pour pallier aux deux principales pathologies affectant les structures métalliques : la corrosion (remplacement de section corrodée) et la fatigue (renforcements locaux de zones de concentration de contraintes, ou pontage de fissures). Les premières applications sur site de cette technique ont eu lieu à la fin des années 1990 en Angleterre et au début des années 2010 en France.

Ce chapitre présentera donc dans un premier temps des données générales sur le renforcement par composites collés de structures métalliques, puis il décrira nos apports sur cette thématique. Dans un premier temps, la caractérisation du transfert des efforts entre composite et différents supports métalliques sera abordée, puis nous présenterons les travaux menés et en cours sur le sujet de la durabilité de ce transfert. Enfin, nous présenterons les investigations réalisées et en cours sur la problématique du renforcement vis-à-vis de la fatigue.

## 4.1 Etat de l'art sur la thématique

Si l'utilisation de la technique de réparation d'éléments métalliques par composites collés est assez bien maîtrisée et connue dans le domaine de l'aéronautique, son application au domaine du génie civil est beaucoup plus récente et le référentiel est par conséquent très réduit pour les concepteurs et maîtres d'ouvrage. Au niveau Français, il n'existe aucun référentiel dédié à cette problématique. Au niveau international, il n'existe pas à notre connaissance de document réglementaire concernant la conception ou la mise en oeuvre de cette technique. Il existe cependant quelques guides de recommandations au niveau international ([Moy \(2001\)](#), [Cadei et al. \(2004\)](#), [Schnerch et al. \(2007\)](#), [CNR \(2007b\)](#)) dont un guide assez récent édité par le DNV pour le cas des structures métalliques Off-Shore qui prouve l'intérêt de ce type d'application [DNV \(2012\)](#). On pourra également trouver dans ces différents guides une bonne bibliographie des applications effectuées et des thématiques abordées.

Les techniques et matériaux utilisées pour le renforcement par composites collés sont assez proches du cas des structures en béton développé dans le chapitre suivant. Il existe cependant quelques spécificités dont on pourra retenir les suivantes :

- On pourra retenir que, dans le cas des structures métalliques, les problématiques auxquelles peut répondre l'application de composites collés peuvent être différentes. Si il est possible de renforcer des éléments de structures métalliques en traction, en flexion ou en compression, il est également possible de les renforcer vis-à-vis de la fatigue, seconde pathologie la plus rencontrée après la corrosion par ce type de structures. Ceci est d'autant plus important que ce phénomène était peu connu pour le cas des structures métalliques anciennes fabriquées avec des matériaux plus fragiles tels que le fer puddlé par exemple.

- On notera en outre que l'utilisation de cette technique en alternative aux techniques utilisées actuellement dans ce domaine (ajout de tôle métallique additionnelle par soudage, boulonnage ou rivetage) peut permettre de pallier aux difficultés posées par ces méthodes d'assemblage traditionnelles (difficultés de soudage des matériaux métalliques anciens, concentrations de contraintes induites) (Kuhn et al. (2008)).
- Une seconde spécificité liée à l'application des renforts composites sur structures métalliques vient des rapports entre les rigidités des matériaux. En effet, comme le matériau de renforcement est associé au matériau de structure par collage, leurs déformations sont liées. Le taux de travail du renforcement sera donc d'autant plus important que sa raideur sera plus élevée que celle du matériau de la structure renforcée et/ou réparée. Dans le cas des structures en béton, le renfort composite est bien souvent plus raide que le support béton. Dans le cas des structures métalliques en revanche, la rigidité des matériaux composites de renforcement classiquement utilisée est en général un peu plus faible que celle du métal de la structure. Ceci a conduit à la recherche d'utilisation de composites à plus haut module pour ce type d'application. Ces composites sont produits à partir de fibre carbone à haut module et ont un module élastique de traction dans le sens des fibres pouvant atteindre 460 GPa (Schnerch et al. (2007)). D'autres auteurs ont également travaillé sur la possibilité de mettre en précontrainte les renforts à module classique afin d'augmenter le taux de travail du renfort. Ceci implique la mise en oeuvre de procédés de mise en précontrainte adaptés nécessitant le plus souvent des ancrages spécifiques.
  - La troisième spécificité liée à l'application des renforts composites collés sur adhérent métallique est liée aux capacités du collage structural. En effet dans ce cas, le point faible de l'assemblage en cisaillement ne peut pas être l'adhérent métallique si la préparation de surface a été adéquate. Le collage structural nécessite donc dans ce cas la création d'efforts d'adhésion aux interfaces plus importants pour obtenir une rupture cohésive dans la résine ou dans le renfort composite. Il nécessite également un traitement soigneux de la géométrie aux extrémités des renforts afin de limiter les concentrations de contrainte (notamment pour les contraintes d'arrachement, Chataigner and Gagnon (2011)) et donc d'optimiser le renforcement. Il est en général conseillé de chanfreiner les extrémités du renfort composite ou d'ajouter des systèmes d'ancrage aux extrémités additionnels (Rizkalla et al. (2008)). La problématique de la durabilité de l'assemblage est également différente puisque les mécanismes de dégradation et de transfert au sein de l'assemblage sont modifiés.

C'est dans cette optique que nous avons développé nos travaux sur cette thématique en abordant dans un premier temps la caractérisation de l'ancrage par collage entre composites et support métallique que ce soit sur matériau récent ou plus ancien comme le fer puddlé, puis en initiant des travaux sur sa durabilité. Enfin, nous avons commencé des études concernant les aptitudes en fatigue de ce type de renforcement, notamment dans le cadre de la thèse d'E. Lepretre, qui sont encore en cours et dont nous ne présenterons par conséquent que des résultats préliminaires.

## 4.2 Caractérisation du transfert des efforts entre renfort composite et métal

Afin de pouvoir travailler sur le sujet de la caractérisation du transfert des efforts entre composite collé et support métallique, nous avons adapté notre dispositif d'essai à simple recouvrement existant pour l'adhérent béton à la réalisation d'essais sur adhérent acier. Davantage de détails sur cet aspect sont disponibles dans [Chataigner and Gagnon \(2011\)](#). Tout comme dans le cas de l'essai sur adhérent béton, il est utile d'étudier le mode de rupture, la capacité, la longueur d'ancrage et éventuellement de tenter de formuler un modèle de comportement d'interface.

### 4.2.1 Influence de la préparation de surface

Nous avons dans un premier temps étudié l'influence que pouvait avoir la préparation de surface et plus précisément sa rugosité sur la capacité d'assemblages collés en cisaillement. Trois rugosités classiquement utilisées en anti-corrosion ont été utilisées :  $7\ \mu\text{m}$  pour le grain dit fin,  $10\ \mu\text{m}$  pour le grain dit moyen (NF EN ISO 8503) et  $13\ \mu\text{m}$  pour le grain dit grossier. Celles-ci ont été obtenues par grenailage et un degré de soin Sa2.5 a été demandé (classiquement requis en travaux de préparation de surface pour des revêtements anti-corrosion). Tous les échantillons ont été collés sur une longueur de 85 mm, longueur d'ancrage déterminées lors d'essais préliminaires (pour un renfort de module élastique axial de 160 Gpa et d'épaisseur 1.4 mm).

La figure 4.1 présente les photos de certains échantillons après rupture. On constate que tous les modes de rupture obtenus sont identiques et de nature cohésive dans la résine. Ceci indique que ce type de préparation de surface est adéquate et que le degré de rugosité ne semble pas avoir d'influence sur celui-ci. Il n'en a pas non plus sur la capacité de l'assemblage qui était identique pour l'ensemble des éprouvettes et sur le comportement global de l'interface [Chataigner et al. \(2011d\)](#).

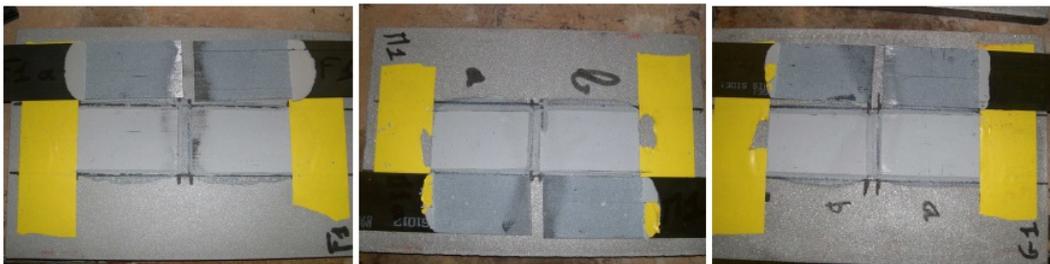


FIGURE 4.1: Photos des modes de rupture obtenus pour les trois rugosités étudiées, de gauche à droite, pour le grain fin, le grain moyen et le grain grossier [Chataigner et al. \(2011d\)](#)

### 4.2.2 Comparaison entre adhérent béton et acier

Afin de bien comprendre comment le transfert des efforts est affecté par le support, nous avons décidé dans [Chataigner et al. \(2011a\)](#) de comparer des essais de cisaillement réalisés avec les mêmes renforts collés (des plats pultrudés d'épaisseur 1.4 mm et de module élastique axial

de 160 GPa) mais avec deux adhérents différents : un béton et un adhérent métallique. Nous ne décrirons pas en détail l'ensemble des investigations menées mais rappellerons seulement ici les principales conclusions :

- En ce qui concerne les modes de rupture (figure 4.2), nous avons pu constater que l'élément faible dans le cas du collage sur acier est bien la résine alors que dans le cas du béton, il s'agit de la couche superficielle de béton.
- En ce qui concerne les capacités des deux assemblages, nous avons pu constater que bien qu'elles étaient pilotées par des limites différentes (béton ou résine), les capacités obtenues étaient proches. La façon dont se transfèrent les efforts et notamment la longueur d'ancrage, a donc un rôle important pour le dimensionnement du renforcement.
- Enfin, nous avons également appliqué la modélisation des deux assemblages par une zone cohésive bilinéaire comme décrit dans le chapitre précédent. Pour le béton, nous avons appliqué les recommandations données dans [Chataigner et al. \(2010a\)](#) et pour le cas du support métallique, nous avons décidé d'adopter une démarche similaire en fixant toutefois la valeur de la contrainte de cisaillement maximale par rapport à la contrainte à rupture en traction de l'adhésif comme expliqué dans [Chataigner et al. \(2011a\)](#). Ceci nous a permis de formuler les modèles donnés en figure 4.3 et de déterminer les profils de cisaillement à l'état limite ultime à partir de cette modélisation (les résultats obtenus ont été comparés à des mesures par jauges de déformation dans [Chataigner et al. \(2011a\)](#)). Ceci permet d'avoir accès visuellement à la longueur d'ancrage ultime pour les deux cas. On constate de manière cohérente avec les observations concernant la capacité des assemblages que la longueur d'ancrage sur adhérent métallique est de l'ordre de grandeur de 100 mm, quand elle est de l'ordre de grandeur de 200 mm sur adhérent béton. Les efforts de cisaillement ont donc davantage tendance à se concentrer à l'extrémité de l'assemblage dans le cas d'un support métallique pour un même procédé de renforcement.



FIGURE 4.2: Photos des modes de rupture obtenus sur adhérent béton et acier [Chataigner et al. \(2011a\)](#)

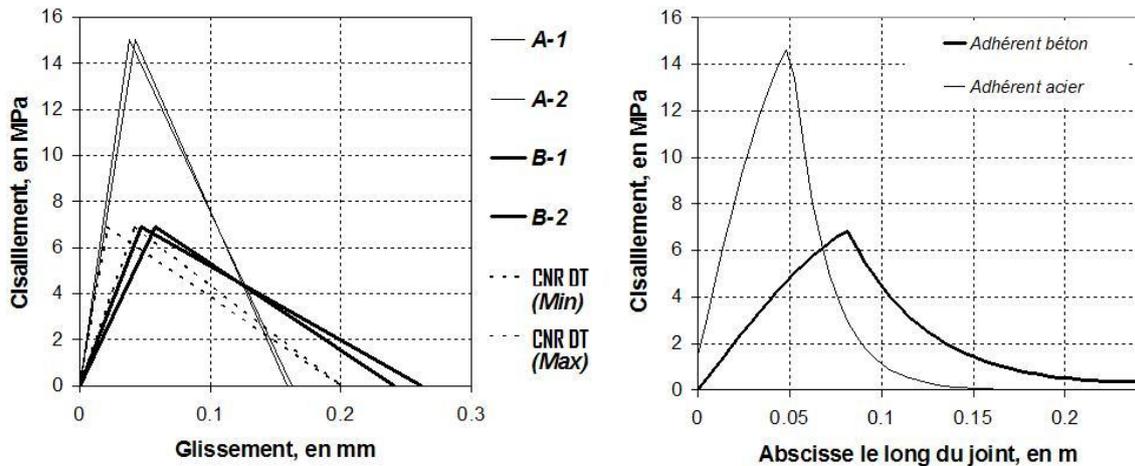


FIGURE 4.3: Détermination du modèle bibilinaire de zone cohésive pour le collage sur adhérent béton et acier, et profils de cisaillement ultime associés [Chataigner et al. \(2011a\)](#)

#### 4.2.3 Collage sur matériaux anciens et utilisation de renforts composites à haut module

Dans le cadre des travaux de thèse d'E. Lepretre, nous avons commencé à réaliser de nouveaux essais de cisaillement sur des adhérents métalliques anciens dans un premier temps, et en utilisant un procédé de renforcement par composite à haut module dans un second temps. Bien que les résultats soient en cours de dépouillement, il est intéressant de noter que les capacités et les modes de rupture obtenus sur les matériaux métalliques anciens sont identiques pour l'ensemble des procédés étudiés à ce qui est obtenu sur des aciers plus modernes à condition que la préparation de surface soit bien entendu suffisante. Ceci indique que la méthode est adaptée aussi bien pour des structures relativement récentes que dans le cas de structures plus anciennes en acier doux et en fer puddlé. On notera qu'il est fait également état dans [Karbhari \(2014\)](#) d'applications sur de la fonte.

En ce qui concerne nos premiers essais sur des procédés composites à haut module, nous avons été surpris de remarquer une modification du mode de rupture (nous avons en effet obtenu une rupture interlaminaire du renfort composite) et une augmentation importante de la capacité de l'assemblage. Ceci s'explique en fait assez simplement en utilisant la théorie de O. Volkersen développée dans les chapitres précédents qui permet de montrer que la longueur d'ancrage élastique obtenue est fortement augmentée. On peut donc en conclure que le renfort composite à haut module a un double intérêt puisqu'il permet d'augmenter le pouvoir renforçant mais aussi de diminuer les concentrations de contrainte en cisaillement et donc d'optimiser le fonctionnement du renfort. Ceci implique toutefois d'augmenter les surlongueurs mises en place lors du dimensionnement.

### 4.3 Durabilité de l'assemblage

Comme pour le cas du collage sur adhérent béton, le renforcement par collage de composites de structures métalliques soulève de nombreuses questions concernant le vieillissement humide de l'assemblage collé, le fluage car les niveaux de contrainte de cisaillement dans l'assemblage sont plus importants et la fatigue puisqu'il s'agit d'une des applications potentielles de cette technique. On notera qu'il existe un type de dégradation spécifique au cas du renforcement par composites collés sur acier qui doit faire l'objet d'une attention particulière lors de la phase de conception du renforcement ou de la réparation : il est en effet nécessaire d'éviter tout contact entre fibre de carbone et support métallique pour éviter les risques de corrosion galvanique. Ceci est facilement réalisable dans le cas de l'utilisation de plats pultrudés, mais nécessite davantage d'attention dans le cas de l'utilisation de tissus à fibre de carbone. Nous présenterons ici nos travaux les plus aboutis concernant la durabilité environnementale et la fatigue. Nous commençons seulement à travailler sur le fluage en nous inspirant de nos travaux sur le béton ([Houhou et al. \(2013\)](#)) dans le cadre de la thèse de E. Lepretre.

#### 4.3.1 Durabilité environnementale

Afin d'accélérer les processus de dégradation du polymère par l'humidité, nous avons décidé d'adopter le même procédé de vieillissement que pour le cas du support béton développé dans le chapitre précédent et dans [Benzarti et al. \(2011a\)](#). Plusieurs éprouvettes avec différents degrés de rugosité ont donc été préparées avec une longueur collée de 85 mm proche de la longueur d'ancrage, et stockées à 40 °C et plus de 95 % d'humidité relative et des essais de cisaillement ont été réalisés pendant une durée de presque deux ans [Chataigner et al. \(2011d\)](#).

En ce qui concerne le mode de rupture, nous n'avons pas observé de modification de celui-ci contrairement à ce que nous avons pu observer dans le cas du support béton. Celui-ci a toujours été de nature cohésif dans la couche de colle et ce quelle que soit le degré de rugosité (figure 4.4). On peut en outre remarquer que la plaque d'acier qui n'était pas protégée a subi une dégradation importante qui n'a pas endommagé l'interface. Ceci permet d'imaginer que la dégradation du renfort collé sur le support béton peut être due à une migration d'humidité par le béton lui-même sous l'interface et que l'humidité affecte donc non seulement le comportement de l'adhésif mais aussi les efforts d'adhésion à l'interface résine- béton, ce qui n'est pas le cas pour le support métallique. On peut également en conclure que le renforcement par composites collés joue également le rôle de protection anti-corrosion.

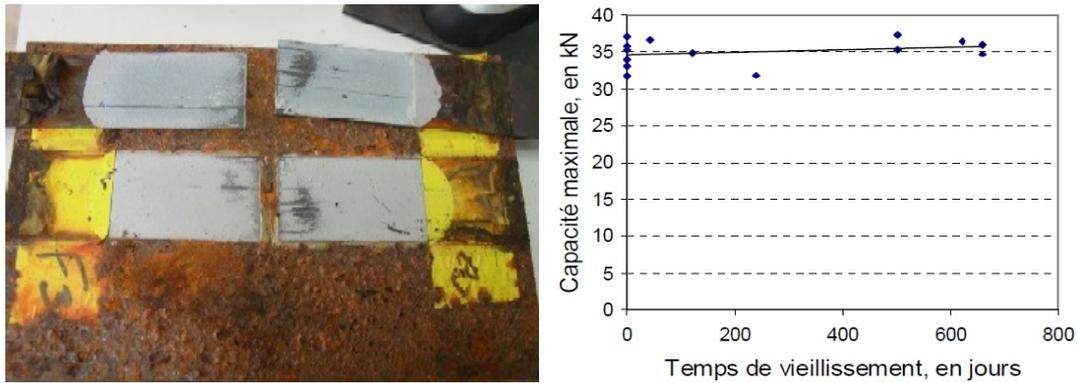


FIGURE 4.4: Photo des modes de rupture observés et évolution de la capacité de l'assemblage en cisaillement au cours du vieillissement en milieu humide [Chataigner et al. \(2011d\)](#)

En ce qui concerne la capacité à rupture des assemblages, peu d'évolutions ont été observées (figure 4.4). A l'échelle de temps étudiée et bien que les conditions soient extrêmes, la dégradation n'a pas endommagé la capacité du transfert des efforts entre renfort composite et acier. Pour vérifier si une modification du comportement de la résine avait eu lieu pendant le vieillissement, nous avons réalisé un cycle de charge-décharge sur un des assemblages vieillis avec une instrumentation locale par jauges de déformation (figure 4.5). Ceci nous a permis de déterminer l'existence d'une déformation résiduelle après charge-décharge démontrant que la plastification de la résine avait bien eu lieu de manière identique à ce nos observations du chapitre concernant la présentation du collage structural. Le vieillissement de la résine a donc bien conduit à une plastification de celle-ci mais aucune dégradation des interfaces n'a pu être constatée pour la durée de vieillissement étudiée.

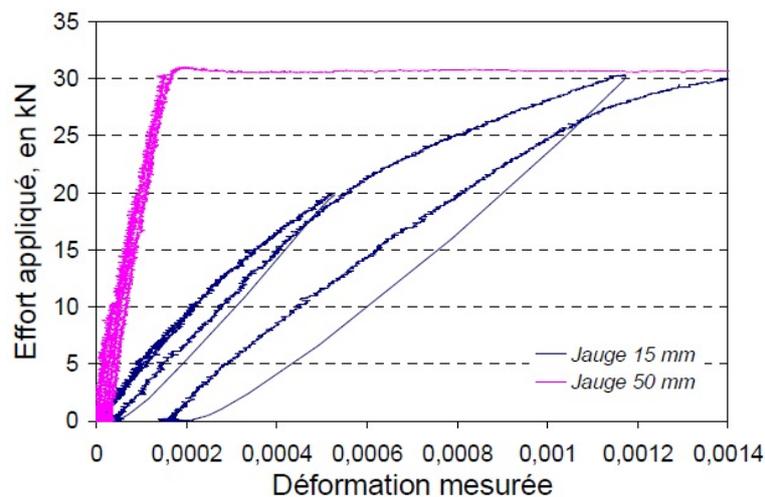


FIGURE 4.5: Evolution des déformations locales près de l'extrémité sur le composite collé sur acier pendant des cycles de charge-décharge après vieillissement [Chataigner et al. \(2011d\)](#)

### 4.3.2 Fatigue

Dans [Chataigner et al. \(2011d\)](#), nous avons effectué une première vérification de l'influence d'une pseudo-fatigue sur le comportement de l'interface collée. Nous avons pu vérifier qu'après 5000 cycles à une amplitude de 30 % de la capacité maximale de l'assemblage et pour un ratio de 0.1 entre l'effort maximal et l'effort minimal aucune dégradation de l'assemblage qu'il soit vieilli ou non ne pouvait être observée.

Dans le cadre de la thèse de H. Chafi, nous nous sommes ensuite intéressés à la capacité en fatigue d'assemblages collés à double recouvrement plan. La longueur d'ancrage était de 80 mm donc proche de la longueur d'ancrage élastique de l'assemblage et nous avons étudié deux résines : une ayant un comportement élastoplastique, et l'autre ayant un comportement élastique fragile. Les premiers résultats pour des ratios de chargement de 0.1 sont donnés en figure 4.6. On peut constater que le comportement de la résine élastoplastique semble légèrement meilleur en fatigue ce qui est cohérent avec la présence des concentrations de contrainte aux extrémités de l'assemblage. On peut également constater que la limite d'endurance pour nos deux séries d'essais se situe aux alentours de 20 % de la capacité ultime de l'assemblage. Ceci correspond à la limite recommandée dans le guide de dimensionnement Italien vis-à-vis de la fatigue ([CNR \(2007b\)](#)). Nous devrions toutefois continuer nos investigations sur le sujet pour vérifier si cette conclusion est en particulier valable pour d'autres types de procédés et d'autres ratios de chargement.

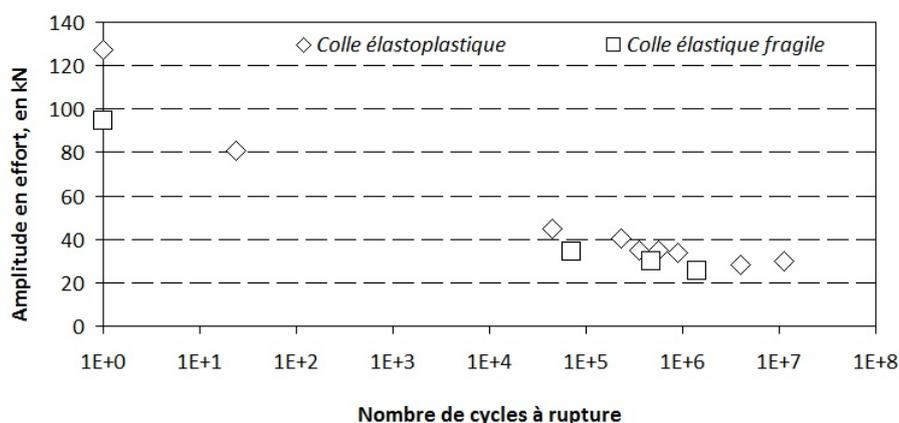


FIGURE 4.6: Evolution de la résistance en fatigue d'assemblages collés à double recouvrement en fonction de l'amplitude d'effort appliquée pour deux résines différentes

## 4.4 Efficacité du renforcement vis-à-vis de la problématique de la fatigue

Le renforcement par composites collés vis-à-vis de la fatigue peut répondre à deux problématiques différentes : un renforcement vis-à-vis de la fatigue avant de pouvoir visualiser un endommagement (qui se traduit par la création d'une fissure) ou une réparation ou mise en sécurité de l'ouvrage après observation d'un début de fissuration.

Dans le cas de la première problématique, il peut permettre en effet d'ajouter une section résistante à un endroit de la structure où les niveaux de contrainte subis seraient trop importants. Ceci peut permettre de diminuer localement l'amplitude de contrainte subie par le détail propice à la problématique de la fatigue, et donc d'augmenter la durée de vie de la structure. C'est ce qui a été proposé par le SETRA dans le cadre de l'ouvrage du Dancourt qui présentait des jonctions soudées au niveau des semelles des poutres soumises à des amplitudes de contrainte trop importantes vis-à-vis des règlements récents intégrant la problématique de la fatigue. On retiendra que c'est une des solutions disponibles mais qu'il en existe d'autres notamment pour la problématique de fatigue des cordons de soudure [Chataigner et al. \(2015a\)](#). Les travaux dans le cadre de l'ouvrage du Dancourt ont donc consisté à ajouter localement des plats composites collés au droit des détails sensibles en profitant d'opérations de remise en peinture de l'ouvrage pour limiter le coût des travaux. Nous avons pu lors de mon expérience au laboratoire d'Autun être impliqués dans cette opération en tant que contrôleur extérieur des opérations de collage de matériaux composites. Ceci nous a permis d'adapter nos procédures de contrôle ([RLPC \(2010\)](#)) à cette application et de développer une méthodologie d'épreuve de convenance et de suivi adaptée sur des tôles additionnelles extérieures à l'ouvrage (figure 4.7). Un suivi de durabilité sur site est en cours et les premiers essais après plus de deux ans de vieillissement ne montrent pas de dégradations de l'assemblage.



FIGURE 4.7: Photo des renforts composites appliqués sur l'ouvrage du Dancourt et de la réalisation des éprouvettes de cisaillement pour l'épreuve de convenance et le suivi (Laboratoire d'Autun)

Dans le cas de la seconde problématique, le renfort composite agit comme un élément ponteur de fissure. Il doit donc permettre de ralentir la propagation de la fissure réparée. C'est actuellement l'objet du travail de thèse d'E. Lepretre en collaboration avec la SNCF qui, après s'être intéressée au cas particuliers des assemblages rivetés [Lepretre et al. \(2014\)](#), se penche actuellement sur l'évaluation expérimentale de l'efficacité de différents procédés par composites collés à ralentir la propagation de fissures pour différents matériaux métalliques. Le suivi de l'avancée de la fissure est effectué dans ce cas par marquage en fatigue de l'éprouvette, et plusieurs configurations de renforcement et type de procédés sont étudiés. Un exemple de faciès de rupture obtenu est donné en figure 4.8. On y constate qualitativement que pour un même chargement cyclique répété, le nombre de stries est bien plus important pour le cas de l'éprouvette comportant un

renforcement par composite collé. Ceci indique que la vitesse de la fissuration est ralentie et qu'il permet donc d'augmenter la durée de vie de l'élément. Ces résultats sont en cours d'exploitation quantitative de façon à pouvoir prendre en compte l'influence du type de composite utilisé, de sa position et d'une éventuelle mise en prétension (figure 4.9).



FIGURE 4.8: Photos du marquage en fatigue d'une éprouvette avec renforts composites collés au dessus et sans renforts composites collés au-dessous pour un chargement cyclique identique

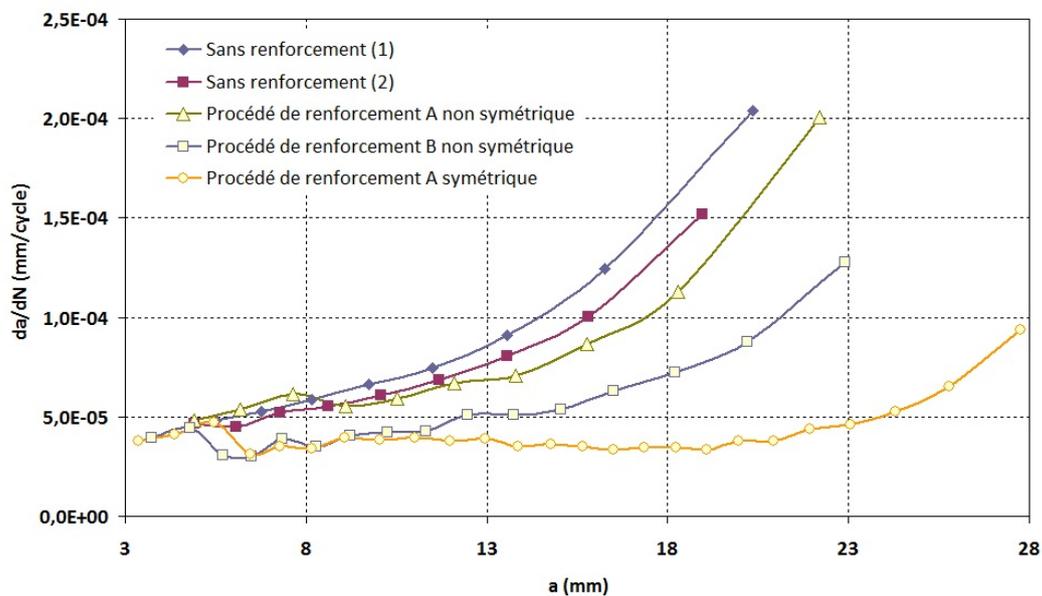


FIGURE 4.9: Evolution de la vitesse d'avancée de la fissure en fonction de la longueur fissurée pour des éprouvettes non renforcées et différents types de renforcements étudiés dans le cadre de la thèse d'E. Lepretre

## 4.5 Conclusion et perspectives

Ce chapitre nous a permis de décrire l'application de la technique des composites collés aux problématiques des structures métalliques. Il est important de noter que les objectifs de la réparation et/ou du renforcement peuvent être différents de ceux existant dans le cas des structures en béton, notamment vis-à-vis des phénomènes de fatigue.

Nos travaux de caractérisation du transfert des efforts entre composite collé et acier nous ont permis d'adapter nos méthodes d'essais et de contrôle sur site utilisées pour le cas du béton au cas des structures métalliques. Nous travaillons actuellement sur la problématique de la durabilité de ces assemblages notamment vis-à-vis de la fatigue et du fluage puisqu'il semble que la durabilité vis-à-vis de l'humidité relative ne soit pas aussi critique que dans le cas du collage sur béton.

Nous travaillons également dans le cadre de la thèse d'E. Lepretre en collaboration avec la SNCF au renforcement des structures vis-à-vis de la fatigue. Cette application offre en effet sans doute des perspectives intéressantes, au vu de la bibliographie sur le sujet, de l'expérience accumulée en aéronautique, de la relative facilité de mise en oeuvre de cette technique vis-à-vis des techniques utilisées actuellement, et des besoins concernant le patrimoine des structures métalliques vieillissant.

Ces travaux vont pouvoir se poursuivre dans le cadre du projet Européen FASSTBridge qui vient de démarrer et qui associe un gestionnaire d'ouvrage (la communauté urbaine de Madrid), un formulateur de résine (l'entreprise Collanti en Italie), des laboratoires (l'IFSTTAR, Tecnalia porteur du projet, et l'université de Stuttgart), des bureaux d'études (LAP et Altavista) et une entreprise de BTP (Dragados) sur la thématique du renforcement de structure métallique par composites collés. Ce projet prévoit la définition d'un cahier de charges pour la formulation d'une résine adaptée à ce type de travaux, son évaluation expérimentale en laboratoire et une application de la méthode sur site.

# Chapitre 5

## Le cas des structures mixtes assemblées par collage

### Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Contexte sur la thématique des structures mixtes assemblées par collage</b>	<b>70</b>
<b>5.2</b>	<b>Caractérisation du transfert des efforts par collage entre bois et béton</b>	<b>71</b>
5.2.1	Mise au point de l'essai dit Push-Out au laboratoire d'Autun	71
5.2.2	Importance de la raideur de la résine structurale utilisée sur le comportement global de la structure mixte	73
5.2.3	Réalisation d'essais Push-Out avec différents types de résines d'assemblage	74
<b>5.3</b>	<b>Investigations concernant la durabilité de la solution</b>	<b>77</b>
<b>5.4</b>	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>79</b>

---

Le collage structural ayant démontré ses performances dans le cas du renforcement ou de la réparation de structures anciennes par composites collés, de nombreuses études s'attachent désormais à en étudier l'utilisation dans le cas de structures neuves. Plus particulièrement, le collage structural étant bien adapté à la problématique de l'association mécanique de matériaux différents, il semble représenter une bonne alternative à la connexion de structures mixtes associant un matériau performant en compression à un matériau performant en traction. Ces structures mixtes sont aujourd'hui pour la plupart en acier et béton et sont assemblées le plus souvent par des connecteurs pontuels de type goujons [SETRA \(2010\)](#).

Ce chapitre présentera dans un premier temps les apports potentiels du collage pour la connexion des structures mixtes. Il présentera ensuite les travaux que nous avons réalisés sur le sujet de la connexion de structures mixtes bois-béton assemblées par collage en abordant dans un premier temps la caractérisation du transfert des efforts et le choix de l'adhésif, puis dans un second temps la durabilité de cette solution d'assemblage.

## 5.1 Contexte sur la thématique des structures mixtes assemblées par collage

La spécificité des structures mixtes de génie civil consiste à faire fonctionner en flexion deux matériaux différents au sein de la même section en optimisant le dimensionnement de sorte que le matériau ayant les meilleures propriétés en compression puisse effectivement travailler sous ce mode de sollicitation et de même pour le matériau ayant les meilleures propriétés en traction. Il est ainsi courant de réaliser des structures mixtes acier-béton, l'ossature métallique travaillant majoritairement en traction et le béton en compression. Dans ce cadre, la réalisation de la connexion entre les deux matériaux est critique puisqu'elle conditionne le monolithisme de la section obtenue. Il est aujourd'hui usuel d'utiliser pour cette connexion des connecteurs locaux tels que des goujons soudés à l'ossature métallique. On notera que cette connexion n'est cependant pas parfaite puisqu'il existe un léger glissement au niveau de l'interface qui est pris en compte dans les codes de dimensionnement (figure 5.1). La solution du collage revêt à ce titre un intérêt particulier puisqu'elle permet, à condition d'utiliser une résine structurale, de créer une liaison parfaite sans glissement, et donc d'optimiser le dimensionnement de la structure. Des exemples de réalisation de structures mixtes acier-béton collées ont déjà été réalisées en Allemagne à la fin des années 1960 ([Schollmayer \(2009\)](#)), et il existe plusieurs études démontrant le bon fonctionnement de ce type de connexion ([Meaud et al. \(2014\)](#), [Si Larbi et al. \(2007\)](#)). D'autres études plus récentes se sont attachées à étudier des concepts similaires de structures mixtes collées en associant d'autres matériaux, par exemple les composites et l'acier dans [Gurtler \(2004\)](#).

Le laboratoire Navier et le LCPC s'intéressent également depuis plusieurs années à un concept de structure mixte assemblée par collage et associant du béton et du bois à la place de l'acier. Cette structure a tout d'abord été étudiée dans le cadre de [Pham \(2007\)](#) pour valider le fonctionnement mécanique de la solution collée et son comportement en fatigue et des essais à échelle réelle ont été réalisés dans le cadre du projet Européen NR2C ([Le Roy et al. \(2009\)](#)). Si ces essais ont démontré les bonnes performances de la solution de connexion retenue, il n'en reste pas

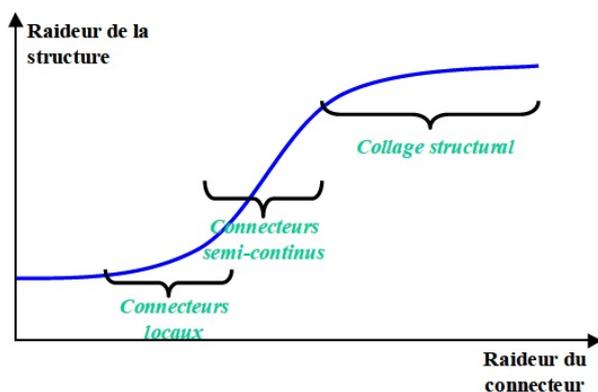


FIGURE 5.1: Schéma de classement des connecteurs pour les structures mixtes [Chataigner et al. \(2011c\)](#)

moins que des questions subsistent sur la connexion par collage structural notamment vis-à-vis de sa caractérisation mécanique, du choix de la résine, de sa durabilité, ou encore du contrôle de sa réalisation et de sa tenue dans le temps. Ces doutes expliquent ainsi en partie la raison pour laquelle la connexion par collage structural seule n'a pas été retenue par les rédacteurs du guide de dimensionnement d'un pont type "bi-poutre mixte bois-béton".

Nous allons donc décrire dans ce chapitre nos travaux concernant ces aspects. La majorité de ces travaux ont été réalisés au laboratoire d'Autun en collaboration avec le laboratoire Navier. Dans un premier temps, nous décrivons les études réalisées concernant la mise au point d'un essai de caractérisation de l'interface entre bois et béton assemblés par collage et son utilisation pour une étude sur le choix d'une résine structurale. Nous décrivons ensuite les premières investigations que nous avons réalisées concernant le sujet de la durabilité.

## 5.2 Caractérisation du transfert des efforts par collage entre bois et béton

On pourra trouver de bonnes références bibliographiques sur le sujet de la caractérisation des assemblages bois-béton dans [Loulou \(2013\)](#) et [Pham \(2007\)](#). L'idée générale consiste à solliciter un ou plusieurs assemblages en cisaillement et à en déterminer la capacité de l'assemblage, le mode de rupture et éventuellement la raideur de l'interface tout comme dans le cas de l'essai à simple recouvrement que nous avons développé pour la caractérisation des renforcements par composites collés dans les chapitres précédents. Dans le cas du collage entre bois et béton, nous avons décidé dans un premier temps de travailler sur l'utilisation de l'essai dit "Push-out" pour lequel deux assemblages sont sollicités en cisaillement par compression de l'éprouvette.

### 5.2.1 Mise au point de l'essai dit Push-Out au laboratoire d'Autun

La procédure de définition de la géométrie de l'essai Push-Out étudiée et de préparation des éprouvettes est plus longuement décrite dans [Chataigner et al. \(2011c\)](#) et [Youssef et al. \(2014\)](#).

On retiendra qu'elle a été définie à partir des données matériaux d'un lamellé collé GL 24 utilisé en génie civil (en Douglas fourni par l'entreprise Fargeot : épaisseur des lamelles de 33 mm) et d'un béton fibré ultra performant (CERACEM fourni par l'entreprise Eiffage). La hauteur de collage et la largeur des adhérents ont été définis de manière à :

- Eviter une rupture en compression des adhérents bois.
- Disposer d'une longueur collée supérieure à la longueur d'ancrage élastique donnée par O. Volkersen pour transférer 90 % de l'effort.
- Limiter les risques de flambement.

Un schéma des éprouvettes réalisées et une photo sont donnés en figure 5.2.

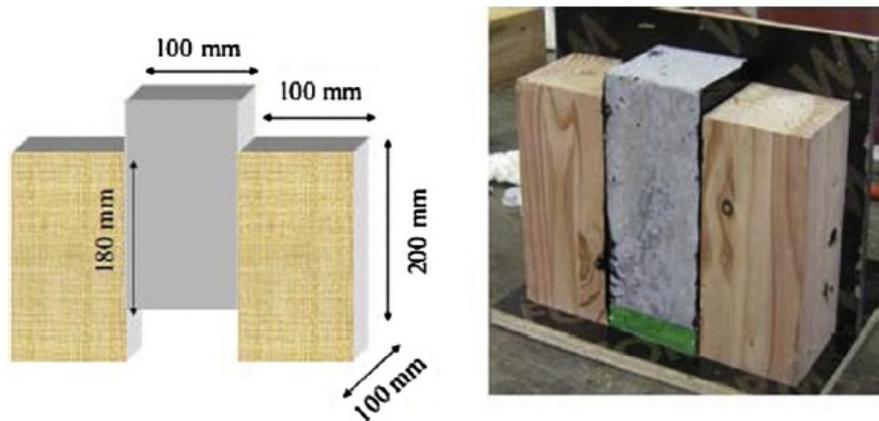


FIGURE 5.2: Schéma et photo des éprouvettes Push-Out étudiées [Chataigner et al. \(2011c\)](#)

L'essai est ensuite réalisé sur une presse de compression à incrément d'effort constant. L'effort est appliqué sur l'adhérent béton et transmis aux deux adhérents bois par cisaillement au niveau de l'assemblage collé. Des cales sont disposées au niveau des adhérents bois pour limiter les efforts de pelage locaux. Pendant l'essai, on enregistre l'effort appliqué, et 4 déplacements locaux au niveau des interfaces pour estimer la symétrie de l'essai et la raideur de l'interface (figure 5.3).



FIGURE 5.3: Photo d'une éprouvette instrumentée pour mesurer 4 glissements locaux à l'interface

Les premiers essais réalisés avec une résine époxy structurale nous ont permis d'observer la dispersion de l'essai due aux hétérogénéités de l'adhérent bois ainsi que l'influence de l'orientation des cernes de la dernière lamelle sur le mode de rupture obtenu (figure 5.4). On constate donc que dans ce cas, l'adhérent bois est l'élément faible de l'assemblage et qu'il est préférable de choisir si possible une orientation des cernes de la dernière lamelle perpendiculaire au plan de collage.



FIGURE 5.4: Photos de modes de rupture observés d'éprouvettes Push-Out avec de la résine époxy : rupture dans le plan des cernes à gauche et influence d'un noeud présent dans l'adhérent bois sur le mode de rupture à droite [Chataigner et al. \(2011c\)](#)

### 5.2.2 Importance de la raideur de la résine structurale utilisée sur le comportement global de la structure mixte

Nous nous sommes dans un premier temps intéressés à la question de l'importance du type de résine structurale utilisé. Outre les questions relatives à la mise en oeuvre, la durabilité ou encore le coût associé, nous avons tout d'abord décidé d'étudier l'influence du comportement mécanique de la résine sur le comportement d'une structure mixte bois-béton assemblée par collage. Une modélisation linéaire de ce problème a été réalisée pour la géométrie donnée en figure 5.5. On pourra se reporter à [Chataigner et al. \(2011c\)](#) pour obtenir une description plus complète des résultats de cette étude. Nous avons décidé de ne reporter dans ce mémoire qu'un des résultats concernant l'évolution de la raideur de la poutre avec le module élastique de la résine structurale (figure 5.6). On y constate que l'utilisation d'une résine ayant un module élastique supérieur à 200 MPa semble suffire pour obtenir le fonctionnement mixte recherché et donc la connexion parfaite (alors que le module élastique des résines époxy classiquement utilisée en génie civil est souvent de l'ordre de 5000 MPa). Ceci signifie qu'il peut être possible d'utiliser des résines structurales relativement souples dans le cadre de cette application afin de limiter les surcontraintes de cisaillement aux extrémités. Ceci permet également d'être rassuré sur l'influence du vieillissement des résines (lié à un phénomène d'assouplissement comme démontré dans les chapitres précédents) sur le fonctionnement de la structure mixte réalisée. Il reste un travail important à réaliser sur cet aspect mais ceci démontre que les propriétés mécaniques élastiques de la résine (résistance et rigidité) doivent être prises en compte lors du choix de la résine utilisée.

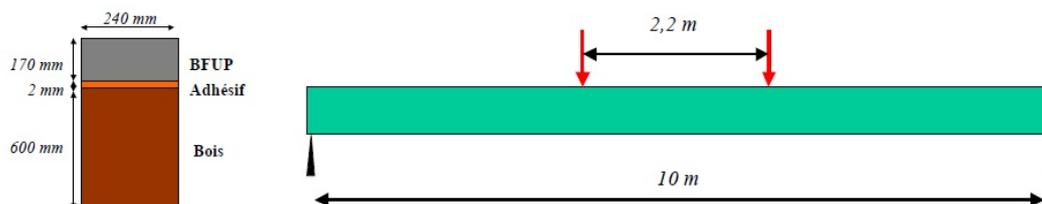


FIGURE 5.5: Schéma de la géométrie de poutre mixte étudiée [Chataigner et al. \(2011c\)](#)

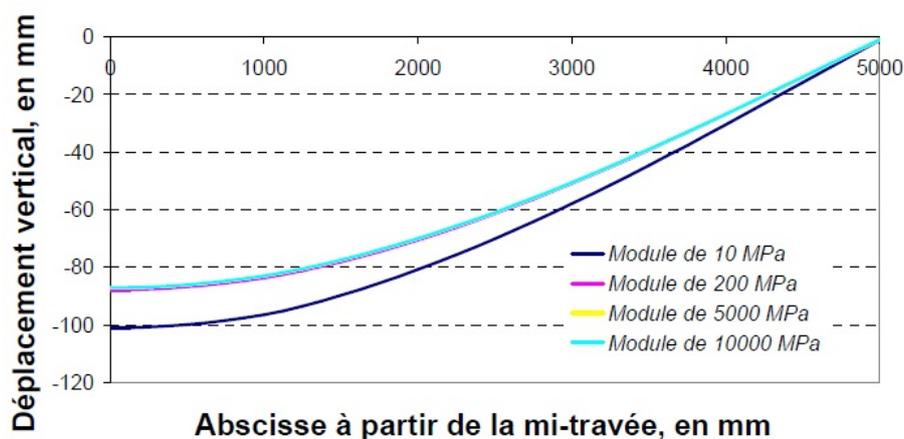


FIGURE 5.6: Evolution de la raideur de la poutre en fonction du module élastique de l'adhésif [Chataigner et al. \(2011c\)](#)

### 5.2.3 Réalisation d'essais Push-Out avec différents types de résines d'assemblage

Nous avons décidé de réaliser des essais de caractérisation de type Push-Out avec différentes résines structurales présentant des rigidités élastiques très différentes afin de pouvoir démontrer les capacités de l'essai et de déterminer parmi des résines proposées par un fournisseur celle qui nous semblait la plus adaptée dans le cadre de la conception d'une structure mixte bois-béton assemblée par collage. Nous avons ainsi réalisé des essais pour quatre adhésifs différents : deux résines époxy présentant des rigidités différentes, une résine acrylique modifiée légèrement plus souple, et une résine polyuréthane très souple à température ambiante en raison de la valeur très basse de sa température de transition vitreuse. Nous avons mené une caractérisation de ces résines dont les résultats sont reportés dans le tableau 5.1. On constate que les quatre résines ont effectivement quatre rigidités différentes dont seulement trois semblent acceptables dans le cadre de la conception d'une structure mixte bois-béton assemblée par collage puisque leur module élastique est supérieur ou égal à 200 MPa (figure 5.6).

Trois essais Push-out ont été réalisés pour chaque type de résine étudié, et les principaux résultats sont donnés dans le tableau 5.2. On y constate que les résultats sont relativement dispersés d'autant plus que la résine a un module important dans le cas des trois résines acceptables.

On constate en outre que ce sont les résines époxy qui permettent dans les deux cas d'obtenir une meilleure capacité en cisaillement pour la géométrie d'éprouvette étudiée. Il semble toutefois que l'utilisation d'une résine époxy plus souple permette de réduire la dispersion des résultats. Nous avons indiqué une contrainte de cisaillement moyenne ultime pour information dans ce tableau car comme nous le présentons ensuite, celle-ci n'a pas de sens physique dans le cas des résines structurales rigides. Enfin, on constate que les résines polyuréthanes et acrylique modifiée étudiées présentent des ruptures avec une part interfaciale indiquant un manque de compatibilité entre les adhérents et la résine.

Adhésif étudié	Epoxy 1	Epoxy 2	Acrylique modifié	Polyuréthane
Durée de vie en pot	1h10	30 min	5 min	15 min
Comportement mécanique	Elastique fragile	Elastique fragile	Elastoplastique	Hyperélastique
Module élastique en traction, en MPa	12 000	5 200	200	10
Contrainte ultime en traction, en MPa	32	32	10	4.5
Température de transition vitreuse, en °C	51	63	70	- 50

TABLE 5.1: Principales propriétés des résines étudiées dans le cadre d'essais Push-Out

Adhésif étudié	Epoxy 1	Epoxy 2	Acrylique modifié	Polyuréthane
Mode de rupture	Mixte bois-béton	Mixte bois-béton	Mixte interface-bois	Interface
Capacité ultime de l'assemblage, en kN	242	237	177	41.1
Contrainte moyenne de cisaillement ultime, en MPa	6.7	6.6	4.9	1.1
Dispersion observée, en %	43	20	13.8	42

TABLE 5.2: Principaux résultats des investigations Push-Out menées avec différents adhésifs

Afin d'étudier de façon plus précise les résultats de ces essais, nous avons représenté les profils de cisaillement élastique donnés par la théorie de O. Volkersen pour les quatre résines en figure 5.7. On constate que notre éprouvette est effectivement bien adaptée à l'étude de résine structurale rigide de type époxy. Dans le cas de résines plus souples, on retiendra que la longueur de l'éprouvette est plus faible que la longueur d'ancrage élastique. Pour les deux résines les plus souples, on constate ainsi un cisaillement quasiment uniforme. Dans ce cas, la contrainte de cisaillement moyenne a un sens physique. Dans le cas des deux résines structurales de type époxy, on constate que la résine époxy 2 tend à diminuer les concentrations de contrainte. Ceci peut expliquer l'observation réalisée sur la dispersion des résultats.

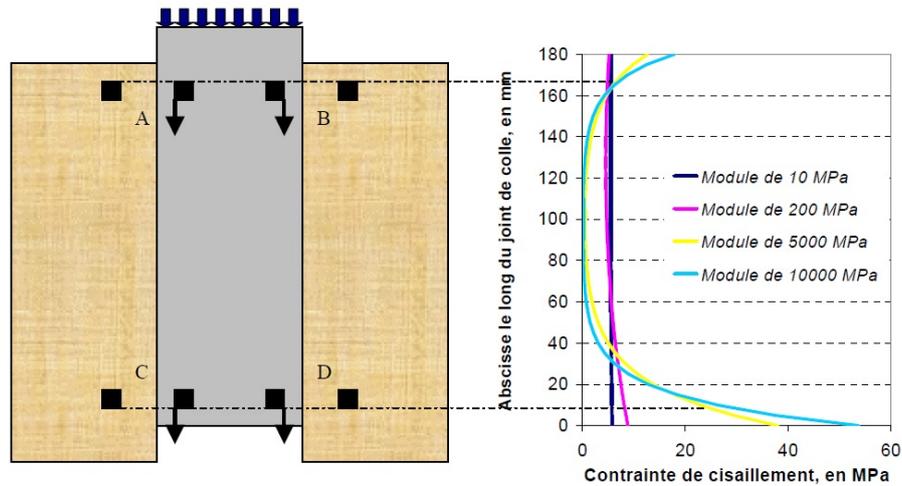


FIGURE 5.7: Evolution des profils de cisaillement dans l'éprouvette Push-Out en régime élastique selon la théorie de O. Volkersen [Chataigner et al. \(2011c\)](#)

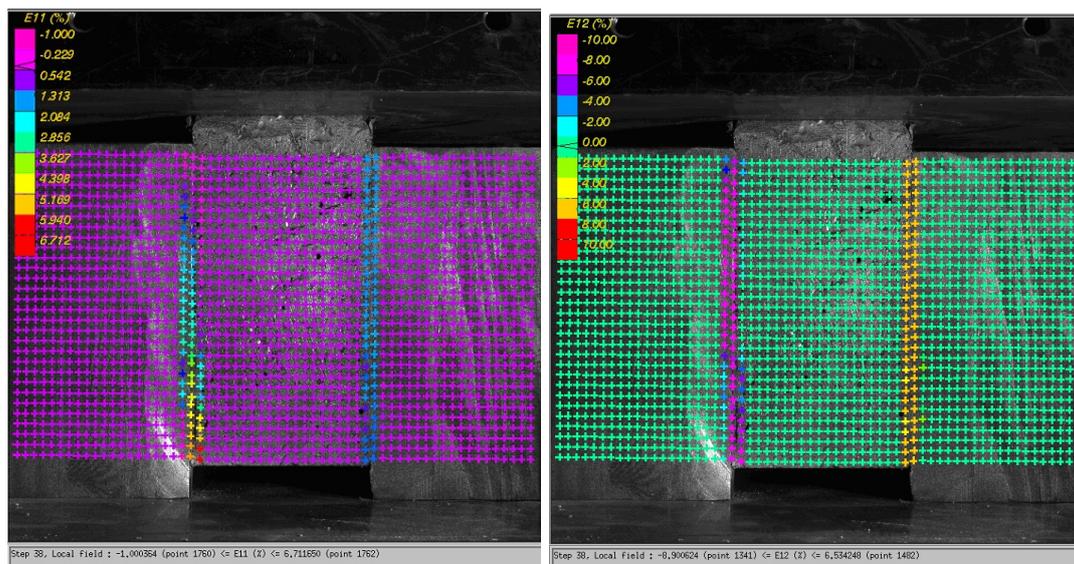


FIGURE 5.8: Déformations de surface selon l'axe horizontal (arrachement) et de cisaillement avant atteinte du maximum en capacité pour l'éprouvette Push-Out avec résine polyuréthane [Chataigner et al. \(2011d\)](#)

Afin de vérifier ces modélisations, des investigations de mesures de déformations de surface par corrélation d'images ont été menées dans le cadre de la thèse de L. Loulou. Les résultats de cette étude sont donnés dans [Youssef et al. \(2014\)](#) et [Loulou \(2013\)](#). Nous avons toutefois repris quelques résultats de l'étude en figures 5.8 et 5.9. Ces deux figures représentent la cartographie de la déformation d'arrachement et de cisaillement sur un des côtés de l'éprouvette Push-Out présentant les tranches des deux joints de colle testés pour les deux cas extrêmes :

résine polyuréthane et résine époxy. On peut y remarquer que la déformation de cisaillement semble effectivement quasiment constante dans les joints de colle de polyuréthane, alors qu'on relève des concentrations de déformations vers les extrémités des assemblages dans le cas de la résine époxy. Ceci semble cohérent avec la théorie de O. Volkersen et permet de valider cette approche pour le traitement de l'essai. On constate également la présence de déformation et donc de contrainte d'arrachement relativement importante en extrémité d'assemblage. Ceci est le cas dans la plupart des essais sur assemblage collé, mais il conviendra de noter qu'il doit être limité pour ne pas affecter la rupture de l'assemblage. Dans notre cas, un système de calage horizontal des adhérents permettrait de limiter son amplitude.

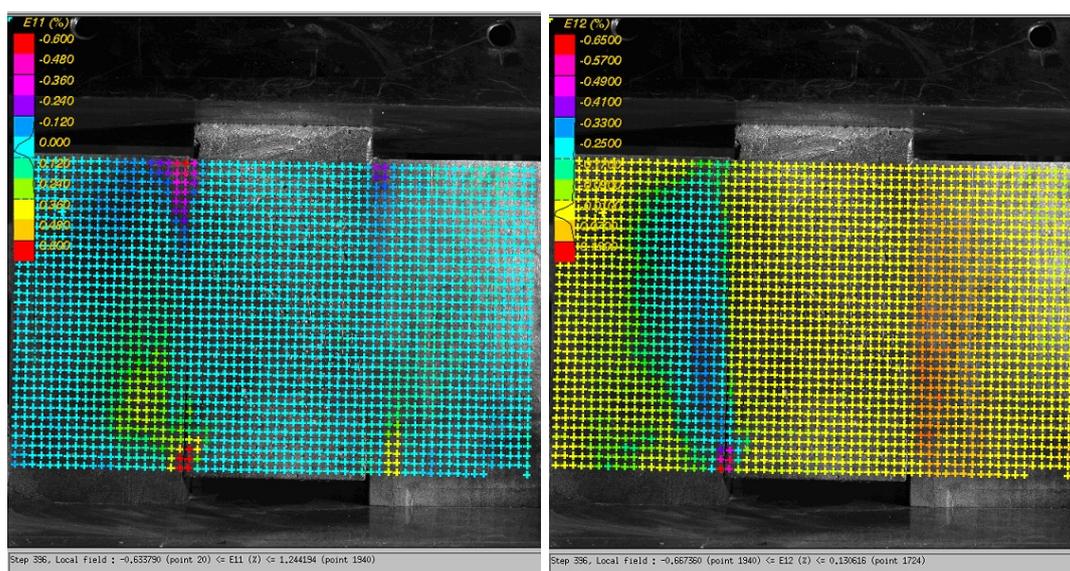


FIGURE 5.9: Déformations de surface selon l'axe horizontal (arrachement) et de cisaillement avant atteinte du maximum en capacité pour l'éprouvette Push-Out avec résine époxy [Chataigner et al. \(2011d\)](#)

En conclusion de cette étude, il nous a semblé que l'époxy 2 semblait la plus satisfaisante. Mais, on retiendra qu'une résine plus souple pourrait également présenter des intérêts et peut-être permettre d'augmenter les capacités de l'assemblage et diminuer la dispersion observée. Il faudra toutefois dans ce cas s'assurer que la longueur de transfert mobilisable est suffisante pour pouvoir mobiliser l'ensemble de cette capacité et que les matériaux sont compatibles (efforts d'adhésion suffisamment importants).

### 5.3 Investigations concernant la durabilité de la solution

Outre les questions posées concernant le dimensionnement de la connexion et les possibilités offertes par le collage structural, nous constatons que la question de la durabilité reste posée également pour ce type d'application. En ce qui concerne la fatigue de ce type de connexion, le laboratoire Navier et l'IFSTTAR ont réalisé de nombreuses investigations qui ont conclu à la

bonne tenue vis-à-vis de la fatigue de l'assemblage par collage structural (Pham (2007) Le Roy et al. (2009)).

Nous avons de notre côté décidé de nous intéresser à la durabilité environnementale de l'assemblage notamment vis-à-vis de l'humidité. Fort de notre expérience sur le sujet du renforcement par composite collé sur béton, nous avons décidé de réaliser des investigations identiques sur nos éprouvettes Push-Out, à savoir un vieillissement d'un an en conditions environnementales sévères (40 °C et plus de 95 % d'humidité relative). Les résultats de nos investigations sont données en figure 5.10. Seule l'époxy 1 a été testée. On peut y constater une diminution des capacités pour l'ensemble des éprouvettes d'environ 30 %. En ce qui concerne les modes de rupture, nous n'avons pas observé de modifications importantes de ceux-ci Youssef et al. (2014). Il est intéressant de noter que la perte de capacité observée peut être attribuée à la dégradation des propriétés du bois pour les niveaux d'humidité étudiés United states departement of agriculture (1999). Bien que le vieillissement en milieu humide conduise à un assouplissement des résines de collage structural (ce qui a de nouveau été vérifié pour les quatre résines étudiées dans cette étude), nous constatons que le vieillissement accéléré que nous avons étudié n'a pas dégradé les efforts interfaciaux, en particulier pour la résine époxy.

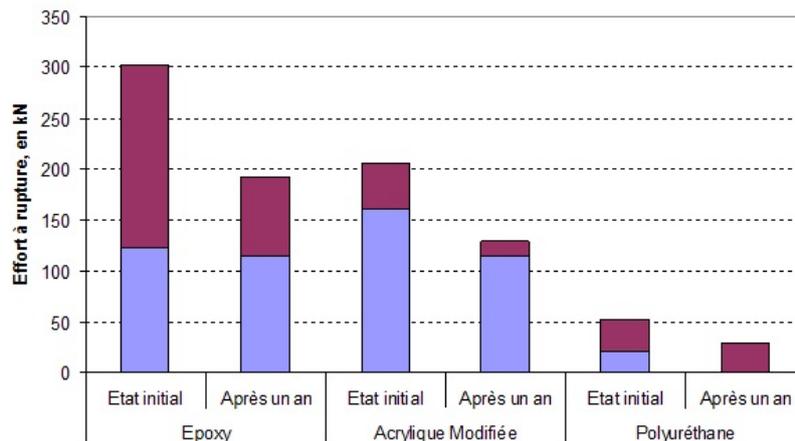


FIGURE 5.10: Evolution des capacités maximales des essais Push-Out après vieillissement en milieu humide Chataigner et al. (2011c)

Contrairement aux matériaux classiques du génie civil (acier et béton), le bois a la particularité d'être très sensible à l'humidité et se caractérise ainsi par des coefficients de dilatation hygroscopique très important. Si le vieillissement de la résine seule (et des efforts interfaciaux associés) ne semble pas problématique, la question de l'influence des cycles de retrait-gonflement du bois sur la tenue de l'assemblage reste posée comme évoqué dans Jacquemin and Vautrin (2002). Cette question a plus longuement été abordée dans le cadre de la thèse de L. Loulou (Loulou (2013)) avec qui nous avons collaboré pour mettre au point une méthode de modélisation et de détermination des contraintes dans l'assemblage collé associées à la dilatation hygroscopique du bois. Bien qu'il reste un travail important à réaliser, cette première étape a permis de conclure sur des géométries d'assemblage préférentielles pour les structures mixtes bois-béton

assemblées par collage [Loulou et al. \(2011\)](#).

## 5.4 Conclusion et perspectives

Ce chapitre a permis de présenter nos travaux sur le sujet de la connexion de structures mixtes bois-béton par collage structural. Dans le contexte de promotion du développement durable et des matériaux dits "verts", le sujet des structures mixtes bois-béton revient à l'ordre du jour. Le CEREMA travaille d'ailleurs actuellement à la proposition d'un pont type mixte bois-béton. La connexion sera cependant réalisée par des connecteurs locaux et non par collage structural.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons tout d'abord mis au point un essai de caractérisation de ce type d'assemblage et proposé des méthodes de dépouillement. L'essai a ensuite été éprouvé dans le cadre d'investigations visant à étudier l'influence de la rigidité de la résine structurale utilisée. Il semble en effet qu'il ne soit pas nécessaire d'utiliser une résine très rigide pour obtenir un fonctionnement de structure mixte. On peut même supposer qu'il serait préférable d'utiliser une résine relativement souple afin de limiter notamment les risques d'endommagement aux extrémités dues aux concentrations de contrainte en cisaillement. Nous avons ensuite poursuivi nos investigations en nous intéressant à la durabilité environnementale de cette solution d'assemblage. Celles-ci nous ont permis de mettre en relief la bonne tenue de la résine et des efforts interfaciaux associés après un vieillissement très sévère sur une durée d'un an. Enfin, dans le cadre de la thèse de L. Loulou, un modèle prédictif des efforts interfaciaux dus à la dilatation hygroscopique du bois a pu être proposé et des géométries d'assemblage préférentielles proposées.

Il semble donc au vu de ces investigations qu'une application en conditions réelles puisse être proposée. Le laboratoire d'Autun en liaison avec le laboratoire Navier réfléchit actuellement à une possible application de cette technologie dans le cadre d'un ouvrage réel. Il réalise également des investigations additionnelles notamment sur le sujet de la simplification de la mise en oeuvre de la technique et de la modélisation de ce type de structure notamment à l'aide des modèles LS1 présentés dans le premier chapitre ([Nguyen Trung et al. \(2015\)](#)).



## Chapitre 6

# Le renforcement du béton par armatures composites

### Sommaire

---

<b>6.1</b>	<b>Données générales sur le sujet des armatures composites utilisées pour le renforcement du béton . . . . .</b>	<b>82</b>
<b>6.2</b>	<b>Caractérisation du comportement mécanique des armatures et de l'interface avec le béton . . . . .</b>	<b>84</b>
6.2.1	Observations microscopiques des armatures composites . . . . .	85
6.2.2	Caractérisation thermique des armatures composites . . . . .	85
6.2.3	Caractérisation mécanique du comportement des armatures . . . . .	86
6.2.4	Caractérisation du comportement de l'interface entre armature composite et béton . . . . .	87
<b>6.3</b>	<b>Durabilité de cette technique . . . . .</b>	<b>90</b>
6.3.1	Observations microstructurales et température de transition vitreuse . .	90
6.3.2	Investigations sur le comportement de l'armature seule . . . . .	91
6.3.3	Investigations sur le transfert des efforts entre béton et armature . . . .	92
<b>6.4</b>	<b>Conclusion et perspectives . . . . .</b>	<b>93</b>

---

Les avantages des matériaux composites vis-à-vis des matériaux métalliques pour le renforcement de structures en béton par collage (légèreté, insensibilité à la corrosion) ont favorisé l'émergence de travaux de recherche puis d'applications du remplacement des armatures en acier carbone classique utilisées pour le renforcement du béton par des armatures en PRF. La corrosion des armatures métalliques constitue en effet la pathologie la plus importante des structures en béton, et l'utilisation d'armatures composites est une des solutions disponibles pour éviter cette pathologie. Les premières applications dans des ouvrages de génie civil ont eu lieu au début des années 1990 au Japon, et se sont ensuite rapidement diffusées en Amérique du Nord. En France, elles sont pour le moment peu utilisées, du fait sans doute d'un manque de référentiel national sur le sujet.

Ce chapitre s'attachera dans un premier temps à présenter les armatures composites aujourd'hui commercialisées et utilisées pour le renforcement du béton. Il décrira ensuite les investigations que nous avons réalisées sur la thématique en abordant la caractérisation des armatures et de leur transfert des efforts au béton, puis leur durabilité en se penchant notamment sur l'influence de l'alcalinité du milieu cimentaire.

## 6.1 Données générales sur le sujet des armatures composites utilisées pour le renforcement du béton

Outre la non sensibilité à la corrosion des armatures composites, elles présentent d'autres avantages vis-à-vis des armatures acier carbone classiques qui peuvent justifier leur utilisation. Elles sont ainsi plus légères, et peuvent être amagnétiques (intérêt notamment dans le cadre d'installations proches de radars) ou non conductrices (intérêt pour limiter les ponts thermiques par exemple) [FIB \(2007\)](#). Il existe différents types de matériaux composites utilisés comme armatures (différentes natures de fibre et de matrice), et on en retiendra les plus utilisés :

- Pour ce qui concerne les fibres, pour des raisons économiques, les armatures à fibre de verre sont les plus utilisées pour les armatures passives. Pour ce qui concerne les armatures actives, afin de limiter les pertes à long terme, il est plus courant de recourir à des armatures à fibre de carbone. Il existe également des armatures comportant deux autres types de fibre : la fibre aramide et, plus récemment, la fibre de basalte.
- Pour ce qui concerne la matrice, pour des raisons de durabilité, on rencontre plus souvent des matrices thermodurcissables de nature époxy, vinylester ou polyester (ces dernières sont les moins utilisées, car elles présentent un retrait important et une mauvaise tenue chimique).

Les propriétés des armatures composites dépendent donc de leurs constituants et les coefficients de sécurité pris en compte lors du dimensionnement en tiennent également compte. Toutes ces armatures sont produites par pultrusion avec parfois des traitements de surface spécifiques pendant leur fabrication. Ce procédé consiste à imprégner en continu un ensemble de fibres en effectuant une cuisson à chaud de la matrice. Nous avons eu la chance de pouvoir visiter les installations de l'entreprise Fibex au Japon, et celles de Pulltrall au Canada pour bien comprendre les enjeux de ce système de fabrication. On notera que la nature des matrices utilisées (thermoplastiques) nécessite l'utilisation de procédures de fabrication spécifiques des armatures

courbes ou coudées. Ceci est en général effectué avec des supports métalliques provisoires pendant la cuisson de la matrice. Il s'agit là d'une différence essentielle avec les armatures acier classiques qui, grâce à leur comportement élastoplastique, autorisent le pliage sur site. On notera que de nombreuses recherches s'attachent aujourd'hui à tester de nouvelles solutions recourant à des matrices thermoplastiques pour pallier à cette difficulté.

Les armatures composites actuellement commercialisées ont un comportement élastique fragile. Les démarches de conception sont donc différentes de celles du béton armé classique et plusieurs pays ont édité des règles de dimensionnement propres à l'usage de ces matériaux (JSCE (1997) au Japon, ISIS (2007) au Canada, ACI (2006) aux Etats-Unis et CNR (2007a) en Italie). Plus particulièrement, il est souvent conseillé de procéder à un surdimensionnement du renforcement pour privilégier une rupture par compression du béton. On notera également que contrairement aux structures en béton armé avec armatures métalliques pour lesquelles l'état limite ultime est souvent dimensionnant, dans le cas des armatures composites le critère dimensionnant est bien souvent l'état limite de service (flèche ou fissuration de la structure) en raison de leur relative souplesse. Les pays qui ont avancé sur le sujet ont également en général édité des normes de caractérisation de ces matériaux, et l'ISIS au Canada et l'ACI aux Etats-unis ont même édité des référentiels de certification pour ce type d'armatures (ISIS (2006), ACI (2008a), ACI (2008b)). En France, il n'existe pas de référentiel sur cette thématique. Nous sommes actuellement en contact avec l'AFCAB (Association Française de Certification des Armatures du Béton) sur ce point. On pourra trouver davantage d'éléments sur ces aspects dans Rolland (2015) et FIB (2007).

Pour illustrer ces éléments généraux sur le dimensionnement de structures en béton armé, nous avons présenté dans Perier et al. (2013) les résultats d'une étude visant à dimensionner une même poutre en béton armé avec des armatures acier classique, acier inoxydable et composite à fibre aramide, verre et carbone afin de pouvoir comparer leur bilan environnementale via une ACV (Analyse de Cycle de Vie) de la phase de fabrication Perier et al. (2013).

Nous avons pu vérifier que le dimensionnement était régi par l'état limite ultime dans le cas de l'acier classique et de l'acier inoxydable, et par l'état limite de service (notamment la fissuration) dans le cas des armatures composites. Nous avons pu également mettre en relief le rôle du critère de l'ouverture maximale de fissure qui est fixé de façon sécuritaire à 0.5 mm (dans ACI (2006)) pour être identique aux préconisations concernant les armatures en acier classique (figure 6.1). Comme toute technologie nouvelle, celle-ci s'appuie donc largement sur les acquis du béton armé avec armatures métalliques et il reste donc de nombreuses études à réaliser avant de pouvoir modifier les codes de dimensionnement en conséquence. On peut en effet penser qu'il serait utile dans le cas de l'utilisation d'armatures composites de vérifier les limites imposées en service (flèche et fissuration) pour ne pas porter préjudice à cette solution technique. Les problématiques de durabilité étant également différentes de celles des armatures acier classique, on peut également penser que l'utilisation d'armatures composites permette l'utilisation de béton de pH moindre (donc moins dosés en ciment, et comportant éventuellement des agrégats non autorisés pour le moment). Ceci permettrait sans doute de rendre ce type d'armatures plus compétitif sur le marché notamment dans le cas d'environnements particulièrement agressifs pour les armatures en acier classique.

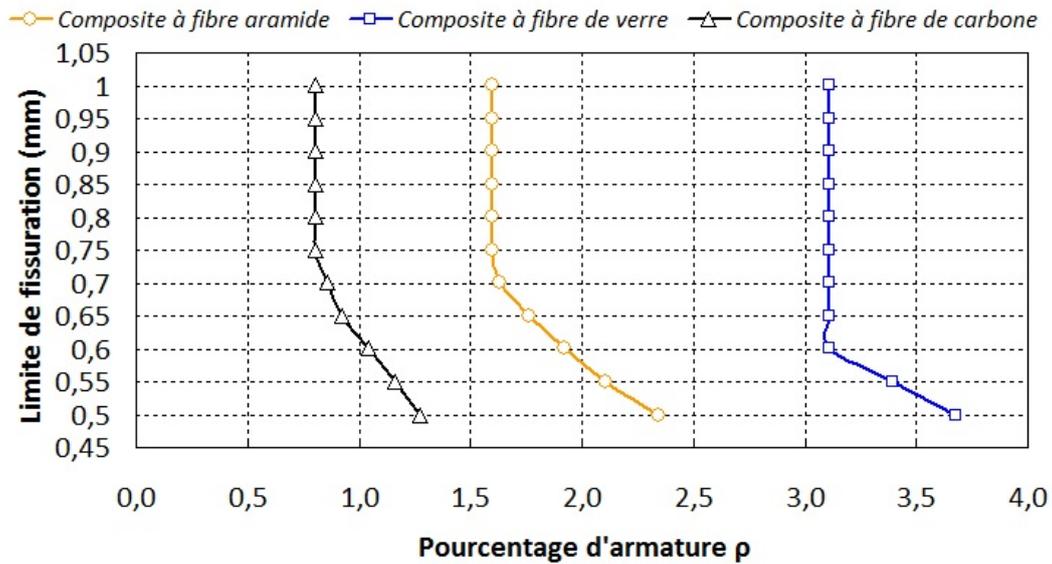


FIGURE 6.1: Influence du critère de limitation de l'ouverture de fissure sur le taux d'armatures composites pour différents types d'armatures dans [Perier et al. \(2013\)](#)

Une meilleure connaissance de la durabilité de ces armatures permettrait également d'optimiser le dimensionnement des armatures composites. Les coefficients de sécurité actuellement utilisés sont en effet surévalués pour des raisons de sécurité et varient de 0.14 à 0.9 en fonction du type de matériau, de l'état limite d'intérêt et de l'environnement ([Rolland \(2015\)](#)). Nous avons donc décidé de nous intéresser plus précisément à cet aspect en abordant dans un premier temps le sujet de la caractérisation des armatures composites, puis de leur vieillissement au sein d'un milieu alcalin.

## 6.2 Caractérisation du comportement mécanique des armatures et de l'interface avec le béton

Une première partie de nos travaux a consisté à choisir et mettre au point certaines méthodes de caractérisation expérimentales des armatures composites parmi les méthodes disponibles dans le référentiel étranger. Ces travaux ont été effectués dans le cadre d'un contrat de recherche avec l'entreprise Total ([Chataigner et al. \(2013b\)](#), [Rolland et al. \(2013\)](#)) et dans le cadre de la thèse d'A. Rolland ([Rolland \(2015\)](#)). Ils ont porté sur la caractérisation microstructurale et thermique des armatures, leur caractérisation mécanique et la caractérisation du transfert des efforts entre armature et béton. Nous avons pu travailler sur différents types d'armatures de diamètres variés allant jusqu'à plus de 20 mm et fournis par des partenaires industriels : Sireg, Pulltrall, et Fibex.

### 6.2.1 Observations microscopiques des armatures composites

Dans un premier temps, des procédures de préparation des échantillons spécifiques pour chacun des types de renforts composites ont pu être mises au point. Des exemples d'observations sont données en figures 6.2 et 6.3. On peut y distinguer la fibre, la matrice, l'éventuel sablage extérieur et les possibles porosités. Ces dernières indiquent des défauts dans le procédé de pultrusion et doivent donc être de faible importance. On peut également y détecter d'autres défauts de pultrusion en s'intéressant à l'homogénéité de répartition des fibres dans la matrice par exemple.

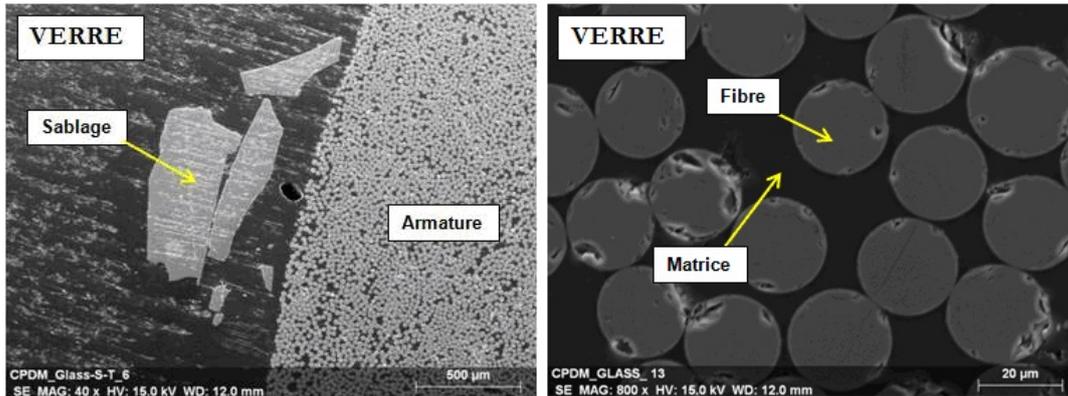


FIGURE 6.2: Observations au microscope électronique à balayage d'une section d'armature composite à fibre de verre à deux grossissements différents [Rolland \(2015\)](#)

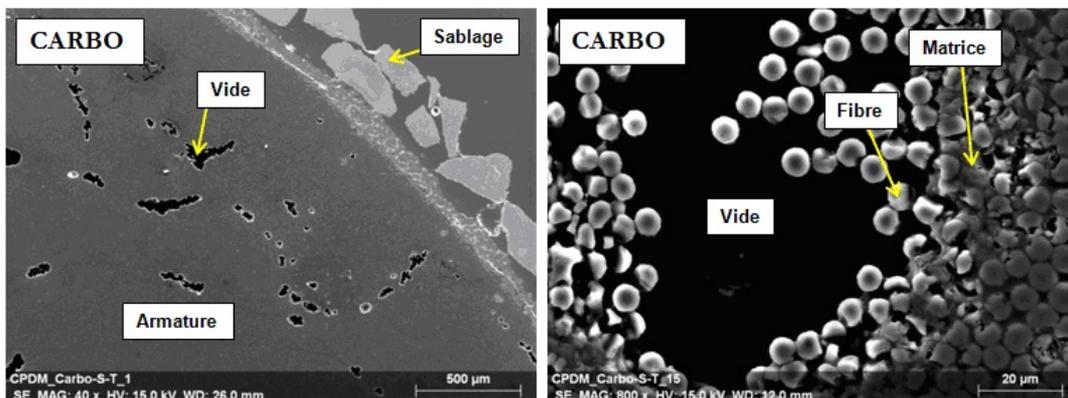


FIGURE 6.3: Observations au microscope électronique à balayage d'une section d'armature composite à fibre de carbone à deux grossissements différents [Rolland \(2015\)](#)

### 6.2.2 Caractérisation thermique des armatures composites

Tout comme pour le cas des résines structurales, il est important de déterminer la température de transition vitreuse de ce type d'armatures pour pouvoir estimer son domaine d'emploi et éventuellement la résistance au feu de la structure dimensionnée ([Firmo et al. \(2015\)](#)). Nous

avons réalisé cela pour les différentes armatures étudiées en utilisant un calorimètre à balayage différentiel (DSC). On notera qu'en réalisant deux chauffages du matériau successifs, il est également possible de vérifier si la matrice a été bien réticulée pendant le processus de fabrication. Les températures de transition vitreuse déterminées variaient entre 65 et 127 °C indiquant une forte variabilité des performances (Rolland (2015)). Nous avons également pu relever pour certains cas une sous-réticulation de la matrice révélant une possible inadéquation du procédé de fabrication.

On notera que le guide Canadien ISIS (2006) conseille également de déterminer les coefficients de dilatation thermique axiaux et transversaux des armatures. Ceux-ci sont en effet très différents de ceux du béton et il convient de vérifier que leur amplitude ne causera pas de dommages à la structure (des valeurs seuils sont d'ailleurs préconisées dans ce guide). Nous n'avons pas encore pu mettre au point de technique expérimentale répétitive sur ce point et nous devrions donc y travailler dans les années à venir.

### 6.2.3 Caractérisation mécanique du comportement des armatures

Dans le cadre du dimensionnement de structures en béton armées avec des composites, il est nécessaire de pouvoir avoir accès à trois données : la raideur axiale de l'armature, sa capacité en traction, mais aussi sa capacité en cisaillement pour le dimensionnement à l'effort tranchant. Les deux premières propriétés sont obtenues via l'essai classique de traction. Le laboratoire SMC réalise des essais de traction sur armatures métalliques dans le cadre de ses activités de certification pour l'AFCAB. Nous avons donc adapté la procédure de l'essai aux armatures composites en travaillant notamment sur le dispositif d'ancrage dans les mors afin d'obtenir une rupture en traction de l'éprouvette dans la zone centrale Rolland (2015). Certains des résultats obtenus sont donnés en figure 6.4. On peut y vérifier que le comportement de toutes les armatures composites testées est élastique fragile, que les capacités ultimes en traction sont largement plus importantes que les capacités des armatures métalliques usuelles (facteur 2 à 3), et que leur module élastique est en général plus faible. Dans le cas des armatures que nous avons pu tester, le module élastique de l'armature à fibre de carbone était d'environ 140 GPa, celui des armatures à fibre d'aramide d'environ 80 GPa et celui des armatures à fibre de verre d'environ 50 GPa.

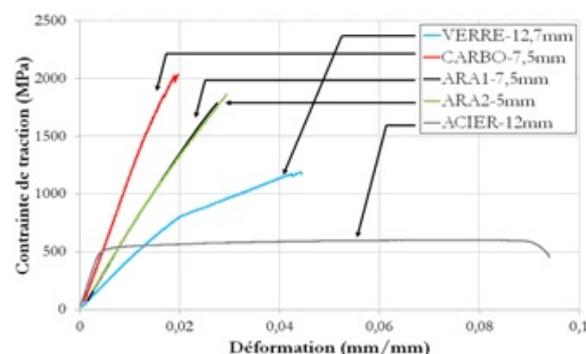


FIGURE 6.4: Comparaison des comportements mécaniques en traction des armatures composites et des armatures acier testées dans Rolland (2015)

La troisième caractéristique est déterminée avec un second essai appelé essai de cisaillement interlaminaire et qui consiste à solliciter l'armature en flexion trois points avec une portée très faible. Un dispositif d'essai spécifique a été développé à l'IFSTTAR Paris dans le cadre de la thèse d'A. Rolland, et des résistances interlaminaires variées ont pu être déterminées allant de 20 à 45 MPa. Ceci peut être dû à la compatibilité entre fibre et matrice (Rolland (2015)).

#### 6.2.4 Caractérisation du comportement de l'interface entre armature composite et béton

Outre la caractérisation de l'armature composite seule, il est également nécessaire de pouvoir qualifier le comportement de l'interface entre armature composite et béton afin de pouvoir estimer l'effort maximal mobilisable, déterminer la longueur d'ancrage nécessaire et éventuellement formuler un comportement d'interface permettant de mieux appréhender son endommagement. On notera en effet que tout comme pour le collage structural, l'adhésion des armatures dans le béton est le résultat de plusieurs mécanismes qu'il est difficile de distinguer (adhésion chimique, confinement de l'armature, frottement, engrenement mécanique). Deux géométries d'essais différentes principales existent et nous avons décidé d'adopter pour des raisons de facilité de mise en oeuvre la configuration d'essai appelée "Pull-Out" ou "essai d'arrachement". Cet essai consiste à extraire une armature scellée sur une longueur contrôlée d'un élément en béton. Des photos des éprouvettes étudiées, de la géométrie adoptée et du dispositif d'essai sont donnés en figure 6.5. La longueur de scellement a été prise égale à 6 fois le diamètre conformément aux recommandations du guide ACI (2008a).

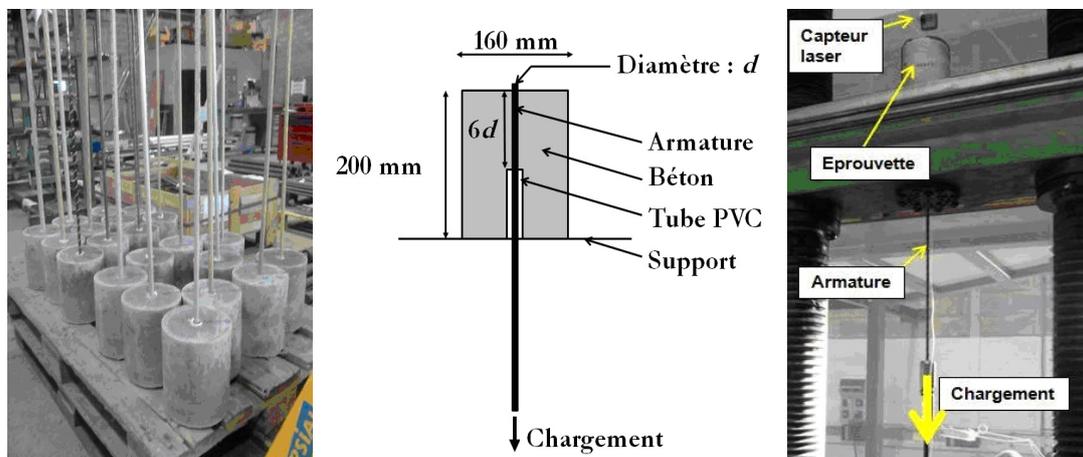


FIGURE 6.5: Photo d'éprouvettes, schéma de l'essai, et photo du dispositif pour les essais d'arrachement Rolland (2015)

Nous avons pu à partir de cet essai étudier le comportement de l'interface en fonction du type d'armature, du diamètre et de leur traitement de surface et le comparer à des résultats réalisés sur armature acier classique. Certains de nos résultats (effort d'arrachement en fonction du glissement mesuré en extrémité d'éprouvette) sont donnés en figure 6.6 pour un béton identique et de résistance classique (C25/30). Nous avons pu vérifier des résultats de la littérature :

le sablage permet effectivement d'améliorer les propriétés d'adhérence ultime et de raideur initiale de l'interface notamment pour les armatures à fibre de verre étudiées, et le comportement de l'interface post-pic présente de la ductilité. En revanche, nous avons observé une évolution différente de la littérature pour ce qui concerne l'influence du diamètre. Ceci n'a pas trouvé d'explication pour le moment.

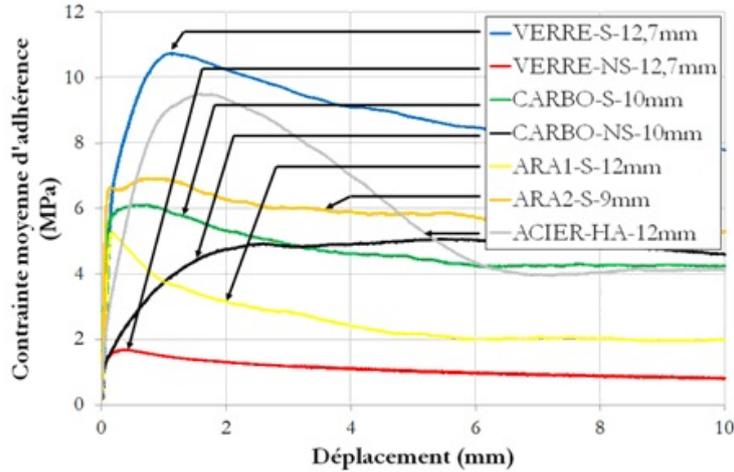


FIGURE 6.6: Caractéristique cisaillement-glisement du modèle de zone cohésive utilisé pour la modélisation du transfert des efforts entre armature et béton [Rolland \(2015\)](#)

A partir de ces résultats d'essais, nous avons pu également tenter de formuler un modèle d'interface inspiré de la littérature et sur un concept proche de ce que nous avons fait pour l'exploitation de l'essai de cisaillement sur composite collé sur béton à simple recouvrement. Le modèle de zone cohésive choisi est dans ce cas plus complexe et correspond à une adaptation de deux modèles de la littérature (le modèle BPE, [Eligehausen et al. \(1982\)](#), et le modèle CMR, [Cosenza et al. \(1997\)](#))(figure 6.7 et équations 6.1). Une procédure de détermination des six paramètres d'interface à partir des résultats d'essais a été déterminée et mise en oeuvre dans [Rolland et al. \(2014\)](#) et [Rolland \(2015\)](#).

$$\begin{aligned} \tau(s) &= \tau_0 \cdot \frac{s}{s_0} (s \leq s_0) \\ \tau(s) &= \tau_0 + (\tau_1 - \tau_0) \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha \left(\frac{s-s_0}{s_1-s_0}\right)}\right) (s_0 < s \leq s_1) \\ \tau(s) &= \tau_\infty + (\tau_1 - \tau_\infty) \left(\frac{1}{1 + \beta \left(\frac{s-s_1}{s_1}\right)}\right) (s > s_1) \end{aligned} \quad (6.1)$$

Afin de vérifier l'adéquation du modèle, il était nécessaire tout comme dans le cas de l'essai à simple recouvrement pour lequel des jauges de déformation sont disposées en surface de l'adhérent composite, de mesurer les profils de déformation le long de l'armature sur la partie scellée sur le béton. Pour ce faire, nous avons utilisé la technique développée dans [Marchand et al. \(2015\)](#)

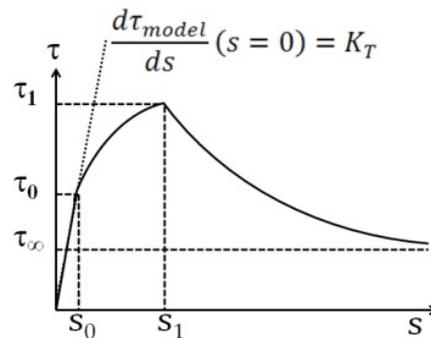


FIGURE 6.7: Caractéristique cisaillement-glissement du modèle de zone cohésive utilisé pour la modélisation du transfert des efforts entre armature et béton Rolland (2015)

de l'insertion d'une fibre optique au sein d'une petite engravure dans l'armature (On notera que dans le cas des armatures composites, une faible influence de l'insertion de la fibre optique sur le comportement de l'interface a pu être observée). L'ensemble des résultats de cette campagne est donné dans Rolland (2015). Nous avons toutefois reporté certains résultats en figure 6.8 avec des comparaisons avec un modèle de transfert élastique proche du modèle de O. Volkersen et un modèle développé sous le code aux éléments finis Abaqus intégrant la zone cohésive afin de pouvoir détailler les principales conclusions de cette étude. On peut remarquer que pour des niveaux faibles d'effort le modèle élastique est cohérent avec les mesures de déformation par fibre optique. On constate également que la longueur de 6 fois le diamètre permet bien d'obtenir une longueur de scellement supérieure à la longueur d'ancrage élastique. En revanche, pour des niveaux d'effort appliqués plus importants, on constate qu'il est important de prendre en compte un modèle d'endommagement. Le modèle d'endommagement semble adapté, il ne permet toutefois pas de prendre en compte les phénomènes très locaux qui résultent de microfissuration puisque l'endommagement est homogénéisé. Il s'agit donc d'une des limites de ce modèle.

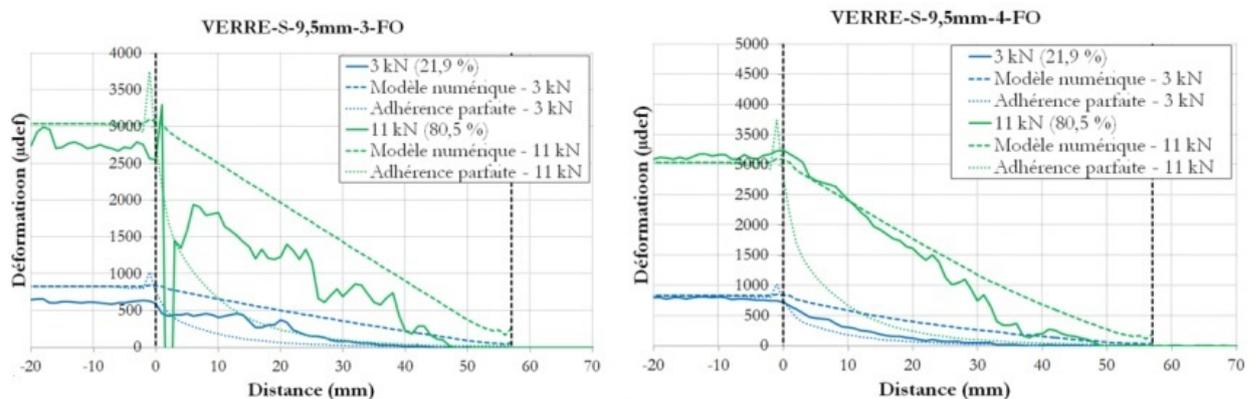


FIGURE 6.8: Comparaison entre modélisation et mesures par fibres optiques des déformations axiales de l'armature composite le long de l'interface armature-béton Rolland (2015)

## 6.3 Durabilité de cette technique

Le développement de l'ensemble de ces méthodes de caractérisation et d'exploitation nous a ensuite permis de commencer à étudier la durabilité de ce type d'armatures. Nous avons décidé d'étudier dans un premier temps comment l'environnement alcalin du béton pouvait affecter le comportement de ces armatures et de leur adhérence en nous focalisant sur les armatures à fibre de verre qui sont actuellement les plus utilisées. Peu d'études ont été réalisées sur cet aspect pour le moment et la plupart d'entre elles sont référencées dans [FIB \(2007\)](#).

Différents types d'éprouvettes ont été réalisées dans le cadre de la thèse de A. Rolland ([Rolland \(2015\)](#)) afin de pouvoir réaliser différents types de vieillissement et les différents essais de caractérisation présentés dans le paragraphe précédent. Le vieillissement a duré 240 jours et trois échéances d'essais ont été réalisées (référence, 120 jours, et 240 jours). Différents environnements de vieillissement ont été utilisés : vieillissement en solution alcaline avec immersion directe (AKC) ou enrobée dans du béton (AKS), et vieillissement dans l'air (AIR) (la solution alcaline utilisée est une solution simulant la solution interstitielle d'un béton européen au jeune âge, [Nobel Pujol \(2004\)](#)). Trois niveaux de température constante ont par ailleurs été testés afin de tenter d'accélérer les phénomènes de dégradation : 20 °C, 40 °C et 60 °C. Pendant tout le vieillissement, un suivi régulier du pH a été réalisé indiquant une situation stable à un pH de 13.5. Nous ne détaillerons pas l'ensemble des résultats dans ce mémoire, mais rappellerons seulement les résultats les plus significatifs. On pourra se reporter à [Rolland \(2015\)](#) pour plus d'informations.

### 6.3.1 Observations microstructurales et température de transition vitreuse

Nous avons pu constater des dégradations pour les armatures vieilles en milieu alcalin à 60 °C. Certaines des images MEB obtenues sont données en figure [6.9](#). On y constate l'apparition de fissures proches de la surface de l'armature. Une cartographie par sonde EDX a permis de mettre en relief la diffusion du Potassium de la solution alcaline utilisée en surface de l'armature. On peut donc penser que les deux observations sont liées et que la diffusion de la solution alcaline endommage en effet l'armature. On notera toutefois que celle-ci n'a été observée que pour des vieillissements en situation très accélérée et que comme d'autres études avaient pu le mettre en relief, l'immersion directe semble beaucoup plus sévère que l'immersion indirecte dans un enrobage béton ([Benmokrane et al. \(2002\)](#), [Chen et al. \(2007\)](#), [Robert et al. \(2009\)](#)).

En ce qui concerne la température de transition vitreuse, nous n'avons pas observé de dégradations de celles-ci après vieillissement pour l'ensemble des conditions testées. La température de service des armatures composite ne semble donc pas affectée pour les armatures et les conditions de vieillissement étudiées.

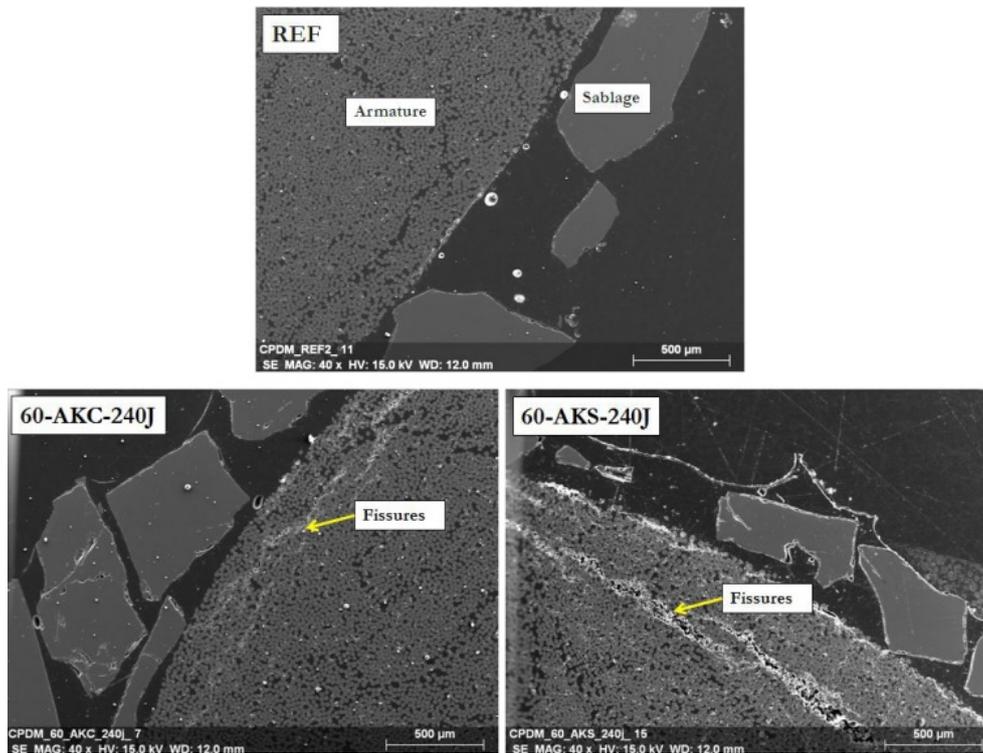


FIGURE 6.9: Observations au MEB de la section d'armature composite à fibre de verre avant et après 240 jours de vieillissement en milieu alcalin à 60 °C avec (AKC) ou sans enrobage béton (AKS) [Rolland \(2015\)](#)

### 6.3.2 Investigations sur le comportement de l'armature seule

Un suivi des propriétés mécaniques en traction a également été effectué dans le cas de la situation de vieillissement la plus sévère (c'est à dire en immersion directe dans la solution saline). Les résultats de ces investigations en termes d'évolution de la résistance à la traction et du module élastique sont donnés en figure 6.10. On y constate une dégradation de la résistance ultime à la traction avec le vieillissement d'autant plus marquée que la température est importante. On constate également que le module élastique est peu affecté par celui-ci. Dans le cadre du dimensionnement de structures, il est donc normal que le coefficient de sécurité concernant l'impact du vieillissement porte sur la résistance à la traction de l'armature composite. Il est possible à partir de ces résultats expérimentaux de déterminer une loi de dégradation en supposant que les réactions chimiques suivent une loi d'Arrhenius ([Chen et al. \(2007\)](#)). Ceci a été fait dans [Rolland \(2015\)](#) et est représenté en figure 6.11 pour la condition de vieillissement en immersion directe en solution alcaline à 20 °C. On constate une diminution de capacité de 40 % en traction après 2 ans et demi d'exposition. Il s'agit d'un résultat proche de ce qui avait été déterminé dans [Chen et al. \(2007\)](#) et ceci permet donc de valider notre processus de vieillissement. Il reste toutefois à comparer ce vieillissement sévère à un vieillissement sur site afin de pouvoir finaliser l'étude car il a été démontré notamment dans [Robert et al. \(2009\)](#) que ces conditions de vieillissement étaient trop sévères.

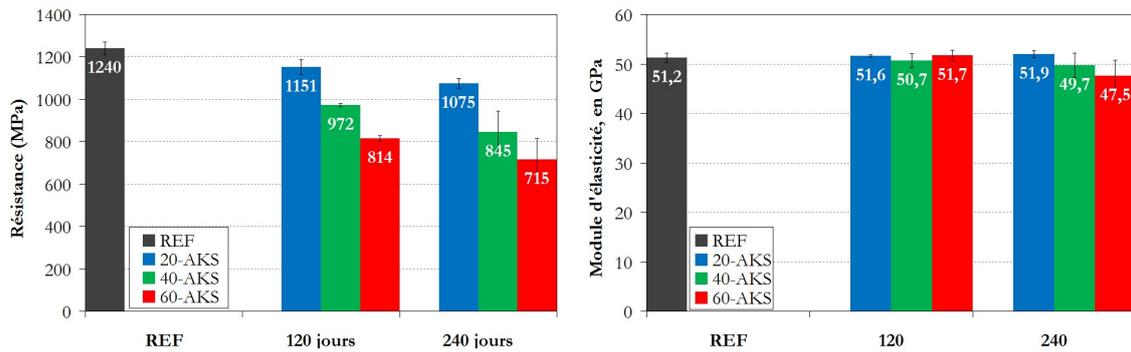


FIGURE 6.10: Evolution de la résistance et du module élastique en traction en fonction de la durée de vieillissement en immersion directe en solution alcaline Rolland (2015)

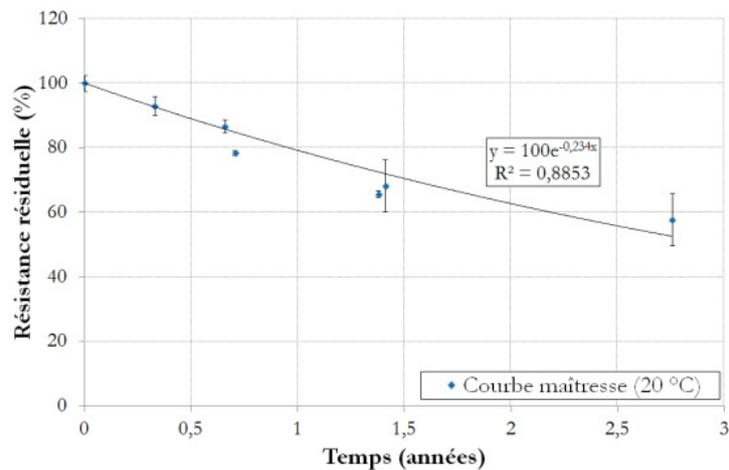


FIGURE 6.11: Modélisation et résultats expérimentaux de l'influence du vieillissement accéléré sur la résistance en traction des armatures étudiées Rolland (2015)

En ce qui concerne les investigations concernant l'évolution de la résistance au cisaillement interlaminaire de l'armature en fonction du vieillissement, nous n'avons pas constaté d'évolution nette de celle-ci ni des modes de rupture observés. Le vieillissement en milieu alcalin pour la durée et les conditions étudiées ne semble donc pas avoir un impact sur cette caractéristique.

### 6.3.3 Investigations sur le transfert des efforts entre béton et armature

Les résultats des essais d'arrachement sont donnés en figure 6.12. On constate que le vieillissement n'a pas dégradé la capacité maximale. Aucune évolution du mode de rupture n'a par ailleurs été constatée (dans le béton près de l'interface). De manière similaire, nous n'avons pas observé de différence sur les courbes d'essais indiquant peu d'évolution du comportement de l'interface. En parallèle de la réalisation d'essais d'arrachement, nous avons réalisé un suivi des propriétés du béton par essais de compression. Ceci permet de comprendre la légère augmen-

tation de la capacité d'arrachement puisque la résistance en compression du béton a elle aussi évolué. Il semble que le vieillissement n'ait donc pas affecté dans notre cas l'adhérence de l'armature dans le béton. Ce résultat est assez différent de ce qui a pu être observé dans la littérature (Chen et al. (2007)). Ce point nécessitera donc des travaux additionnels.

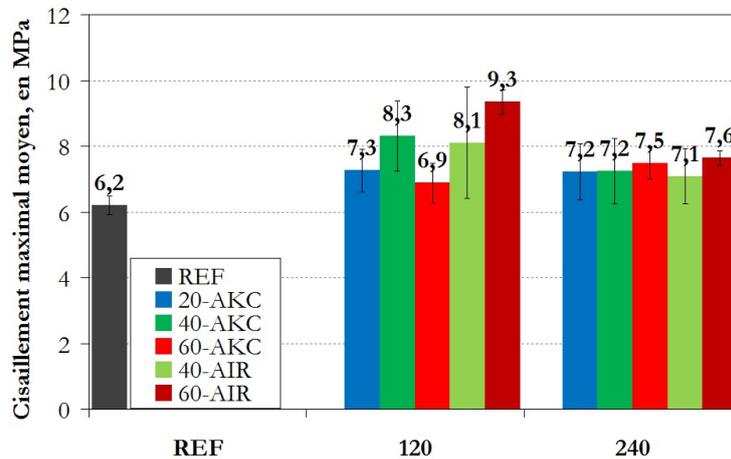


FIGURE 6.12: Evolution de la capacité maximale atteinte lors des essais d'arrachement exprimée en contrainte moyenne de cisaillement et en fonction des différents vieillissements étudiés [Rolland \(2015\)](#)

## 6.4 Conclusion et perspectives

Ce chapitre nous a permis de présenter une partie de nos travaux portant sur le sujet de l'utilisation des armatures composites pour le renforcement du béton. Nous avons dans un premier temps exposé le contexte général sur ce sujet, et notamment l'intérêt de l'utilisation des armatures composites. Au vu du manque de référentiel et donc d'expérience en France, nous avons ensuite développé les études que nous avons pu mener concernant la mise au point de procédures de caractérisation et d'évaluation des armatures composites. Ceci nous a permis d'exposer une partie des résultats obtenus sur différentes armatures commercialisées à l'étranger et de mettre en relief les disparités observées et l'intérêt de chacune des méthodes vis-à-vis du dimensionnement. Bien qu'il nous reste un travail à mener sur la caractérisation des dilatations thermiques de ces armatures, nous disposons aujourd'hui à l'IFSTTAR de la majorité des protocoles expérimentaux nécessaires à la qualification des armatures composites. Il serait intéressant de pouvoir les regrouper dans un référentiel de certification de ce type de produits et c'est la raison pour laquelle nous avons commencé à communiquer avec l'AFCAB notamment (Association Française de Certification des Armatures).

Si le sujet de la qualification des propriétés initiales de ce type d'armatures est bien avancé, le sujet de la définition des coefficients de sécurité pour des raisons de prise en compte de leur durabilité reste à approfondir. Les coefficients de sécurité actuellement utilisés sont en effet très conservatifs et des études additionnelles sont nécessaires pour rassurer les concepteurs et aider à

la rédéfinition de ces coefficients. Nous avons commencé à travailler sur l'influence de l'alcalinité du milieu sur le vieillissement des armatures et avons pu constater une dégradation importante de la résistance en traction des armatures dans le cas d'un environnement très agressif. Il reste désormais à tenter de relier le comportement observé à un vieillissement en situation réelle. Nous avons dans ce cadre commencé à collaborer avec l'université de Sherbrooke qui dispose de davantage d'expérience sur cette thématique.

On notera que nous avons travaillé pour le moment sur la thématique des armatures passives, mais que leur utilisation en remplacement des armatures métalliques actives représente un réel intérêt. Si quelques études ont été réalisées sur le sujet de la conception de structures en béton précontraintes avec armatures composites ([Ahmad \(2011\)](#), [Si-Larbi et al. \(2012\)](#)), il reste encore peu d'études sur le sujet de leur durabilité et le laboratoire SMC devra donc sans doute se pencher sur cette thématique dans les années à venir.

# Chapitre 7

## Contrôle non destructif et monitoring des structures et applications aux assemblages

### Sommaire

---

<b>7.1</b>	<b>L'utilisation de l'émission acoustique pour le monitoring ou en tant que méthode d'instrumentation d'essai . . . . .</b>	<b>96</b>
7.1.1	Investigations sur le suivi de la fissuration du béton avant et après renforcement par composites collés . . . . .	97
7.1.2	Investigations réalisées lors d'un essai de cisaillement de qualification de l'adhérence entre béton et granite . . . . .	100
<b>7.2</b>	<b>Utilisation des acousto-ultrasons pour le contrôle non destructif . .</b>	<b>103</b>
7.2.1	Premières investigations sur le matériau bois pour le suivi de la fissuration	103
7.2.2	Investigations réalisées sur le contrôle non destructif des assemblages collés	105
<b>7.3</b>	<b>Conclusion et perspectives . . . . .</b>	<b>107</b>

---

Outre l'instrumentation que nous avons pu mettre en oeuvre ou utiliser avec l'appui de collaborateurs pendant les essais de caractérisation du transfert des efforts des différents assemblages que j'ai pu étudier (jauges de déformation, corrélation d'images, fibres optiques, ...), je me suis également penché sur la thématique de leur contrôle in-situ via l'utilisation de méthodes de contrôle non destructif et/ou de monitoring. Cette thématique est pour moi plus récente, et de nombreuses perspectives de travail seront donc également présentées dans ce chapitre.

Nous nous pencherons principalement dans ce chapitre sur les méthodes acoustiques, car ces travaux bien que toujours en cours me semblent les plus aboutis. Je présenterais toutefois dans la conclusion d'autres méthodes auxquelles nous nous intéressons actuellement. Nous aborderons donc dans un premier temps l'utilisation des méthodes acoustiques dans le cadre de monitoring de structures ou en tant que méthode d'instrumentation en présentant deux applications sur lesquelles nous nous sommes penchés : le suivi de la fissuration du béton, et le suivi d'essais de cisaillement béton/granite. Nous décrirons ensuite la technique de contrôle non destructif des acousto-ultrasons qui repose sur des outils proches et que nous avons commencé à utiliser sur des éléments en bois et sur la thématique du contrôle des assemblages collés.

## 7.1 L'utilisation de l'émission acoustique pour le monitoring ou en tant que méthode d'instrumentation d'essai

L'émission acoustique consiste à recevoir, enregistrer et traiter les signaux induits par des phénomènes d'endommagement à l'aide de capteurs dédiés positionnés sur la structure. Une illustration du type de salve reçue est donnée en figure 7.1. Ces endommagements peuvent être de nature variée et correspondre à de la fissuration (cas du béton, [Elaqra et al. \(2007\)](#)), du frottement (interfilaire, ou entre les armatures et le béton, [Rossi et al. \(2012\)](#)), des ruptures de fibres ou de fils ou encore à de la corrosion ([Ramadan et al. \(2008\)](#)). Cette méthode ne permet donc pas de s'intéresser au comportement de la structure ou de l'élément étudié avant endommagement, mais doit permettre de déterminer le seuil d'endommagement, et sa cinétique. Certains auteurs s'attachent également à identifier à partir du type de salve reçue le mécanisme d'endommagement principal (la salve reçue est alors caractérisée par différents paramètres dont certains sont représentés en figure 7.1), et il est possible dans le cas où on utilise plusieurs capteurs de procéder à sa localisation. On pourra se reporter à [Grosse and Ohtsu \(2008\)](#), [Godin et al. \(2004\)](#) et [Gaillet \(2013\)](#) sur ces aspects.

On notera que l'IFSTTAR et le CEREMA mettent en oeuvre cette méthode dans le cadre de la surveillance renforcée des ouvrages à câbles métalliques ([Bruhat et al. \(2012\)](#)). Dans ce cas, la localisation de l'évènement est linéaire le long des câbles instrumentés. Cette méthode a fait ses preuves pour ce type d'application. Des travaux additionnels sont en revanche nécessaires dans le cadre d'autres types de structures comme celles présentées ci-après.

Nous allons exposer deux applications de cette méthode pour des problématiques de génie civil dans ce chapitre. Bien que dans les deux cas, un travail d'exploitation et d'analyse reste à effectuer, les résultats étant récents, nous exposerons les principaux résultats apportés par ce type d'instrumentation et développerons les travaux additionnels envisagés. Pour les deux applications présentées, d'autres instrumentations ont été réalisées en parallèle : instrumentation classique par

jauges de déformation, capteurs de déplacement, et sondes de température, et instrumentation par fibres optiques.

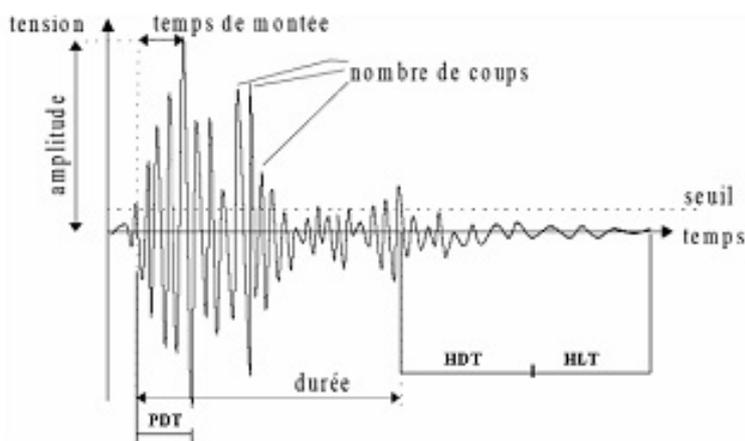


FIGURE 7.1: Illustration d'une salve acoustique

### 7.1.1 Investigations sur le suivi de la fissuration du béton avant et après renforcement par composites collés

La première application de la méthode d'émission acoustique présentée concerne son utilisation dans le cadre du suivi de la fissuration d'un ouvrage en béton. Nous avons en effet pu mettre en oeuvre cette instrumentation dans le cadre du projet de la poutre de Clerval porté par le CEREMA et qui fait l'objet d'une convention entre l'ASF (Association des Sociétés Françaises Autoroutières), le CEREMA et l'IFSTTAR [Aubagnac et al. \(2015\)](#). Ce projet, toujours en cours, consiste à tester une poutre en béton précontraint de 26 m de long récupérée de l'ouvrage en service de Clerval lors de sa démolition et après son renforcement par composites collés. Nous avons pu réaliser l'essai portant sur le renforcement à la flexion fin 2014 et devrions prochainement réaliser l'essai portant sur l'effort tranchant. En parallèle de notre instrumentation locale par émission acoustique visant principalement à étudier la fissuration de la poutre, nous avons également mis en oeuvre le système CASC développé pour la surveillance renforcée des ouvrages à câbles afin de localiser les ruptures lors de l'essai. Cette seconde application ne sera pas développée dans ce chapitre.

Une première autopsie de la poutre et des opérations de recalcul ont permis de repérer les sections à instrumenter notamment les sections S2 et S4 repérées sur la figure 7.2. Ces sections présentaient en effet un début de fissuration apparent et le recalcul indiquait qu'il s'agissait des sections les plus faibles au vu de la sollicitation de flexion effectuée. Une instrumentation importante a donc été mise en place sur ces deux zones. Dans le cas de la section S4 pour laquelle nous allons développer quelques résultats, un capteur LVDT de mesure d'ouverture de fissure a été positionné au niveau du talon pour suivre l'évolution de la fissure pendant l'essai et nous avons positionné quatre capteurs piézoélectriques juste au dessus de la pointe de fissure

apparente à l'œil afin de pouvoir évaluer l'activité ou non de fissuration. Plusieurs investigations préliminaires ont été réalisées pour fixer les distances entre les capteurs utilisés, les seuils et les conditions de filtrage des événements acoustiques et la valeur moyenne de propagation de l'onde dans la structure pour permettre sa localisation. Plusieurs phases d'essai de flexion ont eu lieu avec et sans renforcement par composites collés. Nous ne présenterons donc ici que certains résultats permettant d'apprécier le potentiel de l'instrumentation par émission acoustique dans ce cadre.

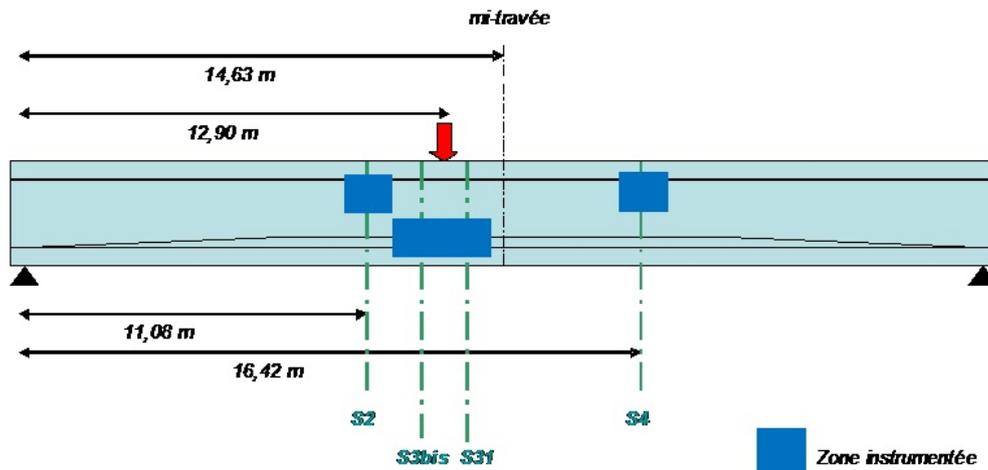


FIGURE 7.2: Schéma de la poutre de Clerval et de la localisation de l'instrumentation par émission acoustique

Plusieurs événements ont pu être enregistrés pendant une des phases d'essai et la localisation des événements en section S4 est donnée en figure 7.3. Cette localisation des événements est juxtaposée à une photo de la zone instrumentée avec une matérialisation de la position des capteurs et de la fissure détectée à l'œil nu à la fin de l'essai. On constate que la majorité des événements acoustiques ont bien lieu le long de la fissure détectée à l'œil nu et que la technique de l'émission acoustique permet bien de détecter ce type de phénomène et de le localiser. On constate que des événements non visibles à l'œil nu sont également détectés en prolongement de la fissure et qu'il est donc vraisemblable que la hauteur de la fissure soit plus importante que ce qui est observable sur site.

Il est également possible de s'intéresser à l'évolution de l'activité acoustique de la zone auscultée pendant l'essai. Un exemple est donné en figure 7.4. On y a également comparé les mesures effectuées par capteur de déplacement en talon de poutre. On constate que les deux mesures ne sont pas directement corrélées. Ceci peut être attribué à leur localisation mais aussi à la différence des phénomènes observés. Dans le cas du capteur de déplacement, l'instrumentation mesure une ouverture de fissure qui peut ne pas être liée à une propagation de celle-ci. L'émission acoustique quand à elle permet de préciser si la fissure est activée ou non dans la zone étudiée. Les deux méthodes sont donc complémentaires. Dans le cas de l'essai sur la poutre de Clerval, des investigations ont été réalisées avant et après renforcement par composites collés à la flexion. Si on compare les mesures effectuées par les deux méthodes avant et après renforcement, on

peut observer un léger effet qui tendrait à ralentir l'ouverture et la propagation de fissure. Des exploitations additionnelles sont toutefois nécessaires sur cet aspect.

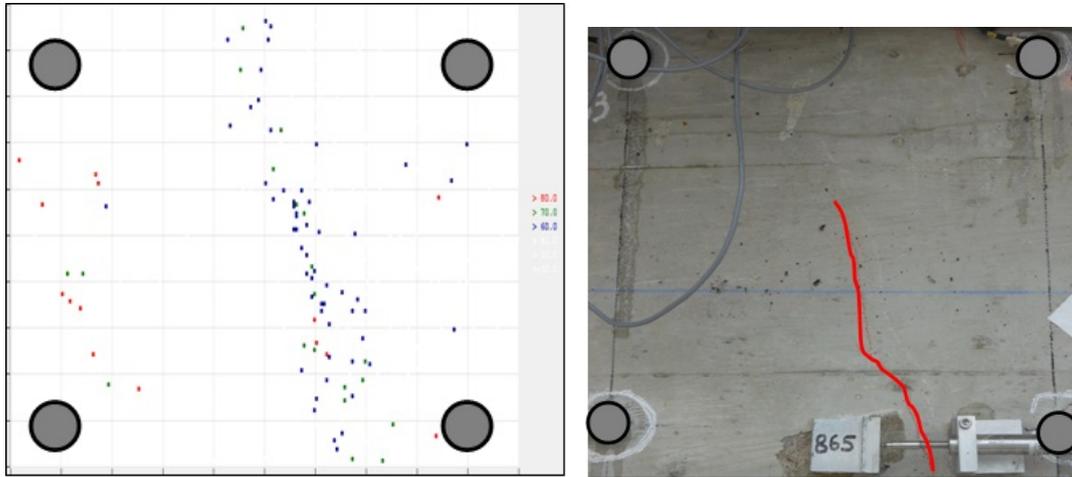


FIGURE 7.3: Résultat des mesures effectuées par émission acoustique en termes de localisation sur la zone étudiée en section S4 à gauche, photo de la zone étudiée avec repérage à posteriori de la fissure apparente à l'oeil nu en rouge à droite

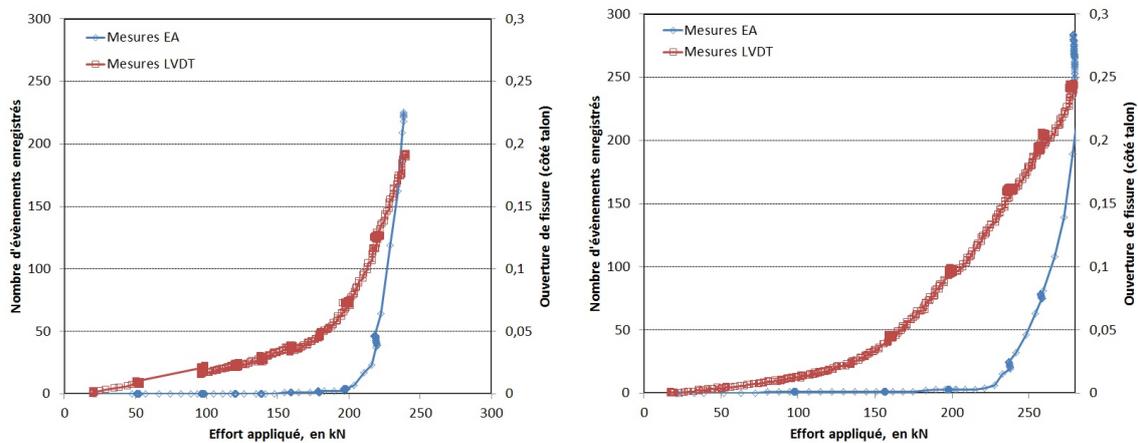


FIGURE 7.4: Comparaison pour la section S4 des mesures par LVDT en talon de poutre et des mesures par émission acoustique en haut de la fissure apparente avant le renforcement par composites collés à gauche et après le renforcement à droite

Des exploitations additionnelles de ces résultats sont en cours, et nous envisageons de réappliquer cette méthode d'instrumentation dans le cas de l'essai sur une moitié de la même poutre après son renforcement à l'effort tranchant. Ceci devrait nous permettre de continuer à éprouver les capacités de cette méthode pour la détection, le suivi et la localisation de la fissuration.

### 7.1.2 Investigations réalisées lors d'un essai de cisaillement de qualification de l'adhérence entre béton et granite

Une seconde application pour laquelle nous avons pu mettre en oeuvre la technique d'émission acoustique concerne une instrumentation pendant des essais de cisaillement de béton coulé sur granite [Mouzannar et al. \(2016\)](#). Ces essais dédiés à l'étude des fondations de barrage béton ont été effectués dans le cadre du projet partenarial EDF/IFSTTAR CIBEFHY piloté par le laboratoire RRO du département GERS dans une grande boîte de cisaillement disponible au CEREMA (figure 7.5). Ce dispositif d'essai permet de tester des assemblages en cisaillement avec un effort de compression maîtrisé et de grande dimension puisque la taille des échantillons est de 1m20 de haut, 1m de large, et 1m50 de long. Nous avons participé à ces essais en qualité d'intervenant pour l'instrumentation. Ce type d'instrumentation a en effet très peu été mis en oeuvre pour l'étude de ce type d'essais ([Moradian \(2011\)](#)) et n'a jamais été mis en oeuvre pour des essais de cette dimension.

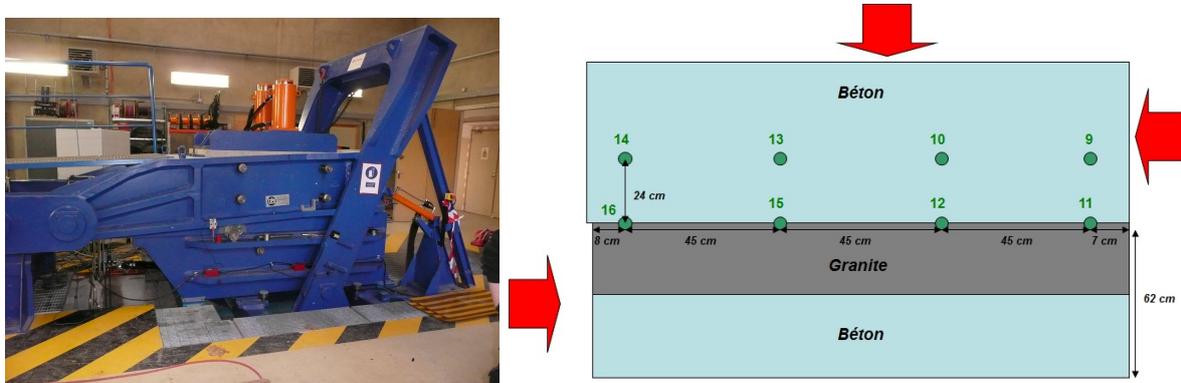


FIGURE 7.5: Photo de la boîte de cisaillement à gauche, et schéma de l'échantillon testé à droite

Deux systèmes d'émission acoustiques ont été positionnés pour les cinq essais réalisés. Un premier système permet l'acquisition simultanée de 16 capteurs et a permis d'instrumenter les deux faces verticales correspondant aux deux côtés de l'éprouvette étudiée. De chaque côté, les capteurs sont positionnés majoritairement sur le bloc béton au plus près de l'interface avec le granite. Le second système a été positionné sur la face supérieure dans l'espace libre à l'intérieur du bâti d'appui des vérins verticaux. La disposition exacte de ces capteurs est présentée en figures 7.5 et 7.6. Des investigations préliminaires ont permis de fixer les distances entre les capteurs, les seuils et les conditions de filtrage des signaux et la vitesse moyenne de propagation des ondes acoustiques dans le béton à 3500 m/s.

Nous ne pouvons pas détailler ici l'ensemble des résultats fournis lors des essais, mais nous allons seulement présenter certains des résultats pour pouvoir montrer l'intérêt de cette méthode et le type de résultat fourni. Le premier type de résultat qui peut être étudié concerne l'évolution de l'activité acoustique pendant l'essai. Plusieurs paramètres différents peuvent être étudiés comme le nombre d'évènements détectés, ou encore l'énergie comme présenté en figure 7.7. Dans le cas des essais réalisés, l'évolution de ces paramètres semble clairement corrélée à l'essai puisqu'on peut distinguer plusieurs phases : une première phase élastique de l'essai sans

détection d'endommagement, une seconde phase d'endommagement de l'interface en cisaillement jusqu'à atteindre un maximum en effort horizontal appliqué, et enfin une dernière phase de frottement entre les deux surfaces pendant laquelle on observe une forte augmentation de l'activité acoustique. Ceci a pu être relevé sur plusieurs essais et semble dépendre de l'effort vertical appliqué.



FIGURE 7.6: Photo de l'éprouvette testée avec l'instrumentation mise en place sur un des côtés à gauche, et photo du dessus de l'éprouvette pendant l'essai avec l'instrumentation mise en place en face supérieure à droite

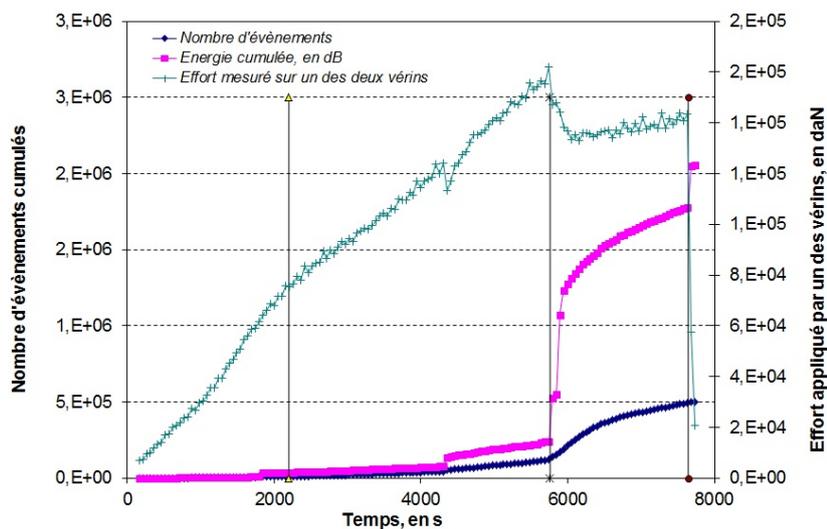


FIGURE 7.7: Exemple de résultat obtenu pendant un essai de cisaillement en terme d'activité et d'évènements acoustiques détectés en fonction du temps sur une des faces verticales instrumentées

En ce qui concerne la localisation des évènements, certains de nos résultats sont donnés en figure 7.8. Nous pouvons y constater que les phénomènes ne semblent pas symétriques puisqu'on observe des différences importantes entre les deux faces verticales instrumentées. Ceci peut être attribué aux imperfections de planéité des surfaces de l'échantillon (notamment des surfaces d'appui), mais aussi à l'asymétrie des blocs de granite utilisés. On constate également que les évènements semblent se localiser majoritairement vers le bas de la zone auscultée qui correspond à l'interface entre le béton et le granite (lieu de la rupture). L'émission acoustique permet donc bien de suivre l'évolution de l'endommagement à l'interface dans ce cas. Nous pouvons également vérifier que comme pour les essais de cisaillement étudiés dans les chapitres précédents, l'endommagement a d'abord lieu aux extrémités de l'assemblage avant de progressivement translater vers le centre de l'éprouvette.

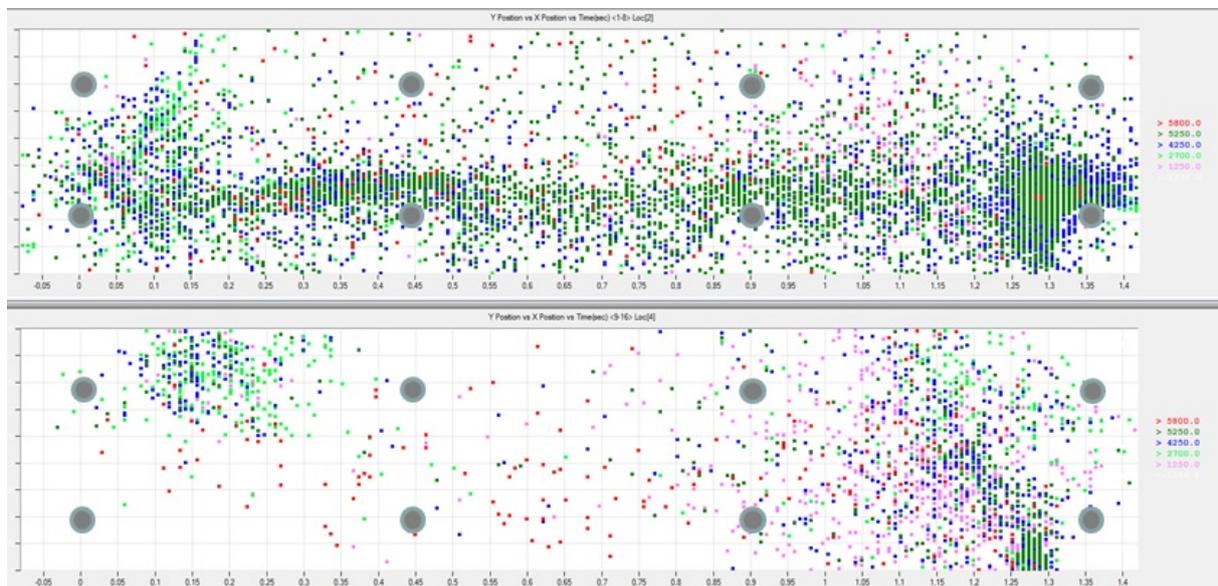


FIGURE 7.8: Exemple de résultat obtenu pendant un essai de cisaillement en terme de localisation des évènements acoustiques sur les deux faces verticales instrumentées (la couleur de l'évènement correspond au temps d'occurrence)

La méthode d'instrumentation ou de monitoring par émission acoustique permet donc d'apporter des éléments additionnels aux méthodes d'instrumentation plus classiques. On notera que les deux exemples présentés concernent des études dont les résultats sont encore en cours d'exploitation.

## 7.2 Utilisation des acousto-ultrasons pour le contrôle non destructif

Comme vu précédemment, l'émission acoustique est une méthode d'instrumentation passive qui porte sur la détection des événements acoustiques de la structure pendant sa durée de vie. Il est donc nécessaire d'avoir une sollicitation mécanique ou physico-chimique (dans le cas de l'étude de la corrosion) et en ce sens, elle fait plutôt partie des méthodes de monitoring ou d'instrumentation. En outre, bien que la propagation du signal ait une influence non négligeable sur le signal reçu, de nombreux auteurs s'intéressent à son traitement pour pouvoir caractériser la source et donc le phénomène physique qui engendre la libération de l'onde acoustique.

Il est également possible avec le même matériel d'envisager la mise au point de méthodes de contrôle non destructives basées cette fois sur la compréhension de la propagation d'un signal connu dans un matériau ou une structure. Dans ce cadre, il est nécessaire de connaître le signal émis. C'est le type de méthodologie offerte par la technique des acousto-ultrasons qui consiste à émettre un signal ultrason maîtrisé et connu avec des capteurs identiques aux capteurs utilisés en émission acoustique et à mesurer le signal reçu en différents endroits de l'élément de structure étudié. Cette méthode est plus précisément décrite dans [ASTM Standard \(2007\)](#) et a fait preuve d'une étude récente au sein du laboratoire SMC sur le sujet de son utilisation pour le contrôle des ancrages de câbles de pont ([Kharrat and Gaillet \(2015\)](#)). Nous présentons ci-dessous deux études préliminaires faites sur le sujet de son utilisation en génie civil pour le contrôle non destructif d'éléments en bois, puis d'assemblages collés composite sur béton.

### 7.2.1 Premières investigations sur le matériau bois pour le suivi de la fissuration

La première utilisation sur laquelle nous nous sommes penchés concerne le contrôle non destructif d'éléments en bois lamellé collé. Cette méthode a en effet fait l'objet de plusieurs études sur ce type d'application ([Beall \(1987\)](#), [Kawamoto and Williams \(2002\)](#)) à vocation du contrôle des éléments en bois en usine. Dans le cadre de son application pour le contrôle sur site, il semble qu'il y ait peu de références, et la méthode n'est pas abordée dans le guide édité par le LCPC ([LCPC \(2008\)](#)). Nous avons donc initié un travail sur cette méthode et avons effectué plusieurs communications sur ces premiers résultats ([Chataigner et al. \(2013a\)](#)).

Après une longue phase d'investigations préliminaires afin de déterminer les types de capteurs à utiliser, le type de couplage à mettre en oeuvre, les caractéristiques du signal émetteur et les paramètres de filtrage des signaux reçus, une campagne importante de mesure a été effectuée pour estimer la répétabilité de la mesure sur un élément de poutre en lamellé collé GL24 en Douglas de dimensions 1m\*0.2m\*0.2m ([Colombe \(2013\)](#)). Si la répétabilité en un point de mesure a été déterminée comme excellente (inférieure à 5 %), il a été également démontré que la dispersion due à l'hétérogénéité du matériau pouvait être très importante. On notera que cette campagne nous a permis de vérifier l'effet "guide d'onde" du bois et la possibilité ainsi offerte d'ausculter des éléments en bois de longueur importante à condition de permettre la propagation du signal le long des fibres du bois.

Après avoir vérifié que l'humidité du bois affectait peu les mesures pour les niveaux d'humidi-

dité rencontrés en génie civil et en milieu non immergé, nous avons effectué des investigations sur la conséquence d'une fissuration sur la mesure effectuée. Deux types de mesure ont été effectués pendant la découpe d'un élément en bois lamellé collé simulant la fissuration : une première mesure dite "directe" pour laquelle les capteurs étaient disposés au milieu de la section de part et d'autre de l'élément testé (propagation le long de la fibre), une seconde mesure dite "indirecte" pour laquelle les capteurs étaient positionnés en surface près de la fissure étudiée (figure 7.9).

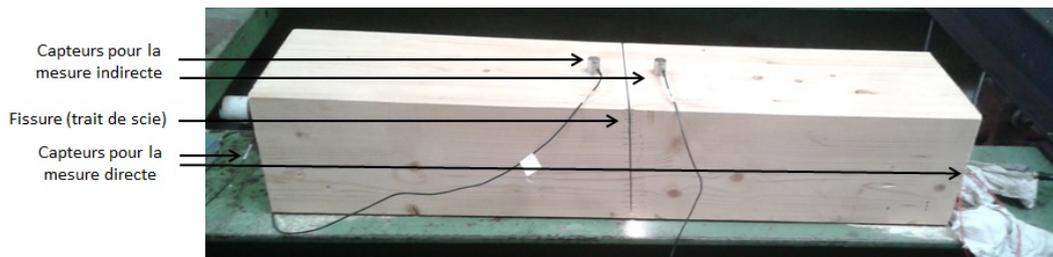


FIGURE 7.9: Photo du dispositif d'essai pendant la simulation d'une fissuration par trait de scie

Certains résultats de nos mesures sont donnés en figure 7.10 (paramètres acoustiques étudiés de la salve reçue : énergie et nombre de coups). On y constate une influence évidente de la longueur de fissuration sur la réponse du signal et donc sa propagation. Dans le cas de la mesure directe, l'énergie et le nombre de coups sont affectés dès lors que la fissuration atteint les fibres de bois reliant les deux capteurs. Dans le cas de la mesure indirecte, l'énergie est directement affectée indiquant une propagation préférentielle de l'onde en surface. On constate cependant que le nombre de coups semble évoluer linéairement avec la longueur de la fissure. Bien que des investigations additionnelles soient nécessaires, il est vraisemblable que ce type de méthode pourrait nous aider à dimensionner une fissuration d'éléments en bois apparente en surface.

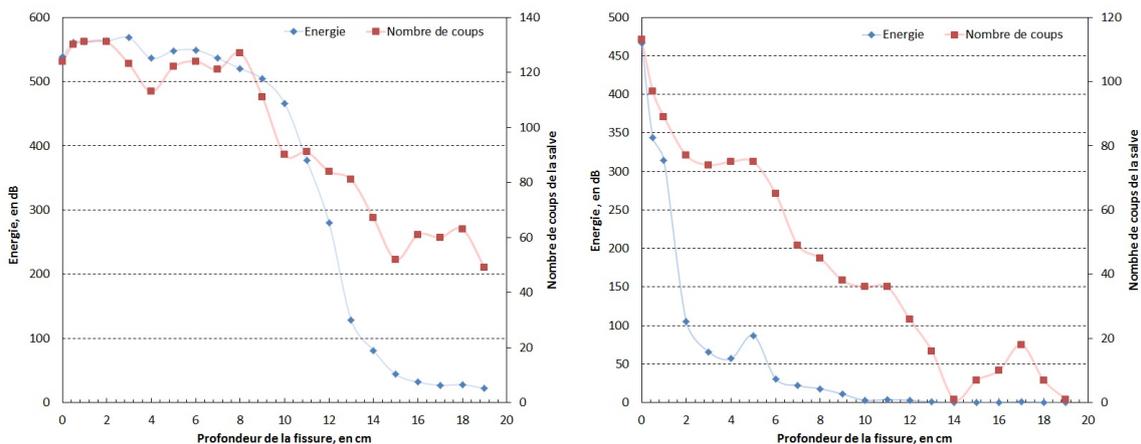


FIGURE 7.10: Evolution de l'énergie et du nombre de coups de la salve reçue par méthode directe à gauche et méthode indirecte à droite en acousto-ultrasons

## 7.2.2 Investigations réalisées sur le contrôle non destructif des assemblages collés

Mon expérience sur le sujet du contrôle extérieur d'opérations de renforcement par composites collés de structures en béton au laboratoire d'Autun m'a également poussé à évaluer la potentielle utilisation de cette méthode pour l'aide au contrôle de ce type d'assemblage collé. Il existe en effet plusieurs méthodes non destructives appliquées pour cette problématique dont la plus connue est l'utilisation du contrôle par caméra Thermique Infrarouge [Adams and Drinkwater \(1997\)](#). J'ai pu l'utiliser à plusieurs reprises dans le cadre de mes activités et un exemple de contrôle sur site est donné en figure 7.11. Si cette méthode s'avère très efficace pour la détection de vides ou de porosités importantes, elle ne permet cependant pas de distinguer des zones d'adhérence faible causées par exemple par un manque de dégraissage d'une des deux surfaces (composite ou béton pour notre application). Certains auteurs se sont donc penchés sur l'utilisation d'autres méthodes non destructives comme la shearographie qui repose sur la mesure de déformations de surface sous dépression ([Taillade et al. \(2011\)](#)) ou encore l'utilisation d'un laser et de techniques de contrôle post sollicitation comme les ultra-sons par exemple ([Ehrt et al. \(2014\)](#)). Pour notre part, nous avons décidé de nous intéresser à l'utilisation des acousto-ultrasons dans le cadre d'un travail de stage financé par le pôle ECND de la région Pays de Loire et co-encadré avec l'ICAM.

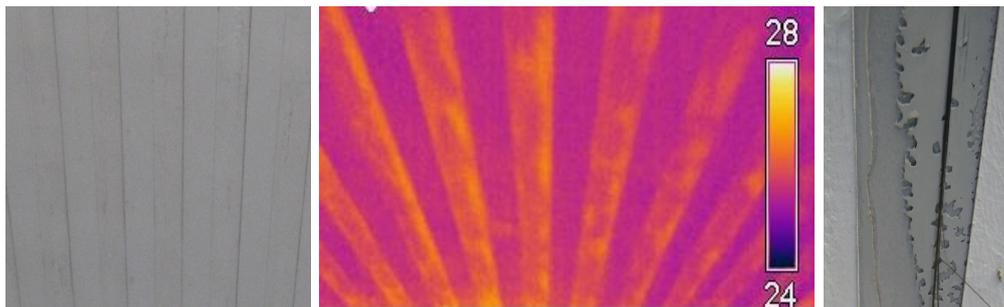


FIGURE 7.11: De gauche à droite : photo classique d'un renfort composite appliqué sur structure, photo à l'aide d'une caméra thermographique IR après chauffage, autopsie d'une zone auscultée

Nous ne détaillerons pas l'ensemble de l'étude dans ce mémoire. On pourra se reporter à [Chataigner et al. \(2015b\)](#) et [Vallée \(2012\)](#) pour plus d'informations. L'étude a consisté à travailler sur plusieurs éprouvettes test d'assemblages collés plat composite sur béton dont un exemple est donné en figure 7.12. Outre une éprouvette référence sans défauts, des essais ont été réalisés sur des échantillons avec des vides de géométrie diverses, un échantillon comportant un polymère beaucoup plus souple (une résine polyuréthane) et un échantillon comportant une zone non adhérente (surface grasse) (figure 7.12). Pour tous ces échantillons, des investigations préliminaires ont permis de définir le type de signal émis, le type de capteur utilisé, et les données de filtrage du signal reçu. Il a ensuite été possible de réaliser des investigations intégrant une étude de répétabilité sur l'ensemble de ces échantillons afin de déterminer l'évolution de certains paramètres acoustiques des salves reçues (principaux paramètres étudiés : amplitude, durée, nombre de coups, temps de montée, énergie, fréquence moyenne).

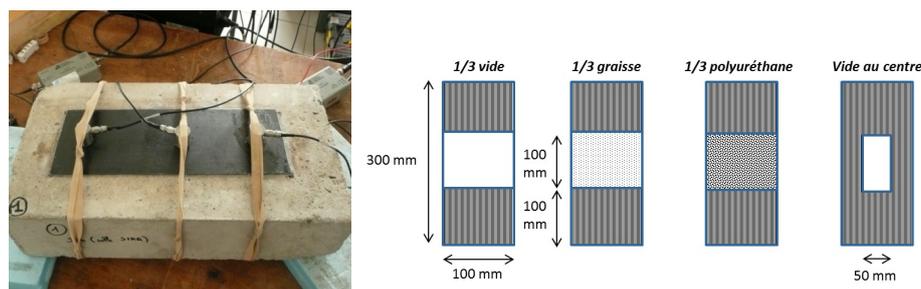


FIGURE 7.12: Photo du dispositif expérimental et schéma des défauts étudiés [Chataigner et al. \(2015b\)](#)

Une première analyse paramétrique des résultats n'a pas vraiment permis de mettre en relief de paramètre discriminant pour l'échantillon présentant une surface non adhérente. Nous avons cependant pu constater comme montré en figure 7.13 que la présence d'un défaut avait une influence sur certains paramètres, notamment le nombre de coups de la salve reçue.

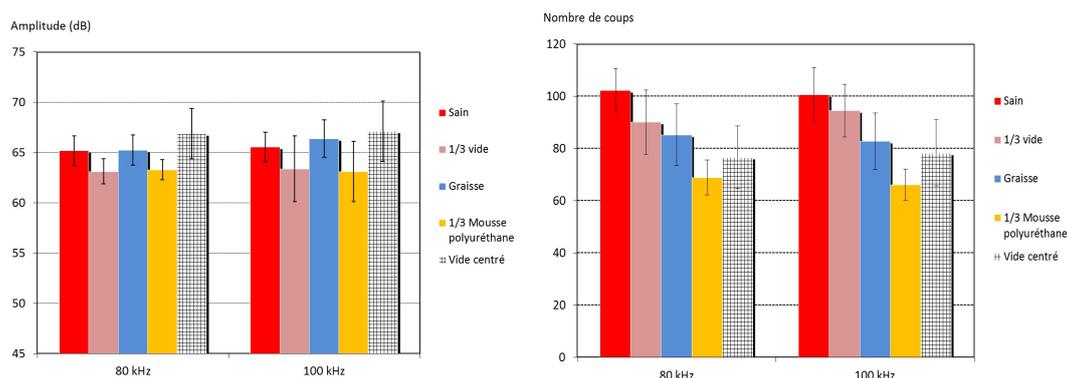


FIGURE 7.13: Deux résultats de l'analyse paramétrique effectuée dans [Chataigner et al. \(2015b\)](#) portant sur l'évolution de l'amplitude et de l'évolution du nombre de coups en fonction de l'échantillon étudié

Ceci nous a conduit à réaliser une analyse des résultats par décomposition en composantes principales. Nous avons pu constater que l'étude de quatre paramètres semblait suffisante pour obtenir des résultats discriminants et que la représentation des résultats dans le plan principal permettait de discriminer assez simplement les échantillons avec défaut de l'échantillon sain notamment pour le défaut simulant une surface non adhérente (figure 7.14).

Bien qu'il reste des investigations additionnelles à effectuer afin de vérifier ce résultat, d'étudier le cas de renforcements collés plus longs, et d'automatiser la procédure de post-traitement des résultats, ces premiers éléments semblent satisfaisants et offrent des perspectives intéressantes dans le domaine du contrôle non destructif des assemblages collés.

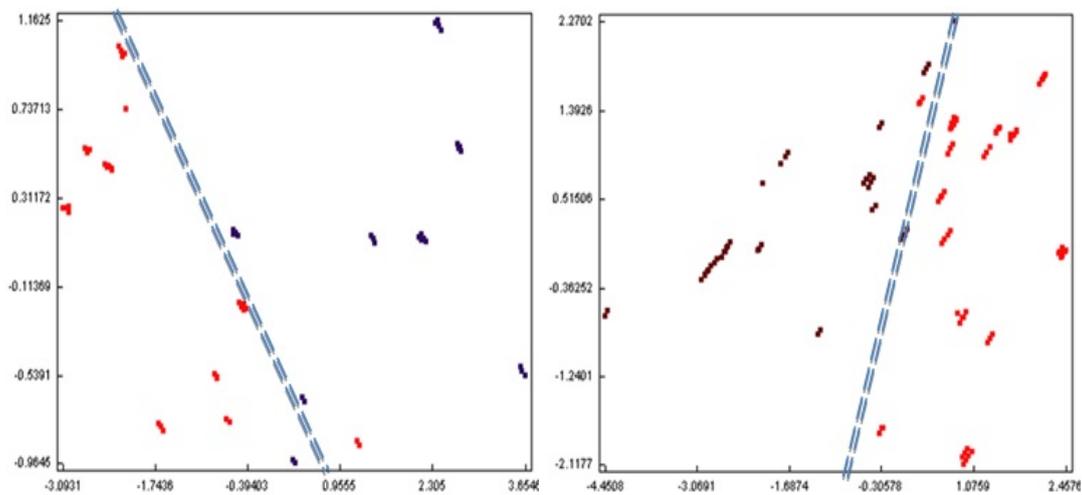


FIGURE 7.14: Deux résultats de l'analyse par composante principale : à gauche, pour un tiers de vide, et à droite pour une zone avec graisse (les échantillons sains sont représentés en rouge) [Chataigner et al. \(2015b\)](#)

### 7.3 Conclusion et perspectives

Ce chapitre a permis de développer des thématiques plus récentes dont les travaux ou l'exploitation sont encore en cours pour certains. Bien que le titre du chapitre soit assez large (il s'agit en effet d'une de mes thématiques de recherche qui englobe d'autres activités non présentées), nous n'avons présenté que des investigations portant sur l'utilisation de méthodes acoustiques.

La première partie nous a permis de décrire notre instrumentation réalisée dans le cadre du projet de la poutre de Clerval sur la mesure et la caractérisation de la fissuration ainsi que celle réalisée dans le cadre des essais de cisaillement entre granite et béton dans le cadre du projet CIBEFHY. Ces deux investigations ont pour point commun de porter sur l'endommagement du béton en mode I pour le cas de l'essai à la flexion de la poutre de Clerval et en mode II pour le futur essai à l'effort tranchant de la poutre de Clerval et pour les essais CIBEFHY.

La seconde partie a permis d'introduire nos travaux préliminaires concernant l'utilisation de la méthode de contrôle non destructive des acousto-ultrasons. Nous avons notamment commencé à aborder son utilisation dans le cas des structures en bois, et des assemblages collés entre renfort composite et béton. Dans le premier cas, il semble que cette méthode permettrait de détecter des endommagements de type fissuration au sein de la structure et même de pouvoir caractériser son étendue. Dans le second cas, il serait possible avec un post-traitement adapté de détecter des zones mal adhérentes. On notera toutefois que des travaux additionnels en laboratoire sont nécessaires pour ces deux applications afin de vérifier les résultats et de mettre au point les procédures d'auscultation pour plus tard pouvoir envisager leur application sur site. A cette fin, nous participons actuellement à des montages de projet sur ces deux applications.

On notera que nous réalisons également actuellement au laboratoire SMC des investigations sur le sujet du monitoring de la fatigue des structures intervenant notamment au niveau des assemblages soudés [Chataigner et al. \(2015a\)](#) et de leur corrosion. Ces études sont effectuées

dans le cadre du projet SURFFEOL financé par la région Pays de Loire et piloté par l'entreprise STX et portent sur des techniques différentes des techniques acoustiques.

Bien que ces travaux ne portent pas toujours sur l'utilisation des matériaux composites ou du collage structural, il existe un certains nombres de points communs. Ainsi, les investigations réalisées sur le bois pour le cas des acousto-ultrasons permettent d'imaginer des utilisations identiques pour le cas d'éléments en matériaux composites. De même, l'essai de cisaillement de bloc béton coulé sur granite a de fortes similitudes avec les essais de cisaillement à simple recouvrement ou de type Push-Out et il serait donc intéressant de tenter d'instrumenter ces deux essais par émission acoustique. Ils semblent donc offrir des perspectives intéressantes pour le suivi ou le monitoring des technologies du collage structural et/ou des matériaux composites sur site. Certains auteurs s'attachent en outre à combiner ces deux méthodes pour améliorer le suivi et l'identification des mécanismes d'endommagement ([Maillet et al. \(2014\)](#)). Ceci pourrait constituer une perspective intéressante pour nos travaux de recherche.

# Conclusions et définition des perspectives scientifiques



Ce mémoire permet d'établir un état des lieux de la situation de mes travaux de recherche concernant l'utilisation des matériaux composites et des assemblages collés dans les structures de génie civil que ce soit en ce qui concerne des travaux de renforcement ou de réparation ou dans le cas de structures neuves en remplacement d'éléments ou de méthodes de liaisons classiquement utilisées.

Comme la partie concernant mon parcours professionnel a pu le démontrer, les différents postes que j'ai occupé m'ont permis d'acquérir des compétences diverses sur la plupart des matériaux et des méthodes d'assemblage intervenant en génie civil (élaboration, méthodes de caractérisation, pathologies principales, mise en oeuvre sur site, durabilité, ...). Ils m'ont également permis de découvrir différentes méthodes d'instrumentations, de monitoring et de contrôle non destructifs applicables à mes thématiques de recherche. Ceci explique la diversité des travaux auxquels je participe aujourd'hui, et me permet souvent d'alimenter mes travaux de recherche par des approches expérimentales originales. Ces expériences m'ont également permis de construire des relations de confiance avec différents partenaires avec qui je continue à travailler dans le cadre de projets financés ou co-financés par des partenaires privés, ou des organismes nationaux ou européens (notamment le laboratoire CPDM pour l'aspect physico-chimie des résines et composites, le laboratoire EMMS pour l'aspect instrumentation par fibre optique et l'aspect comportement des structures, le laboratoire Navier sur l'aspect outils de modélisation et fatigue, ou encore le laboratoire d'Autun sur l'aspect chantier et essais de cisaillement). Malgré la singularité de mon profil et de mes missions (puisque je suis Ingénieur TPE), je reste également en contact étroit avec le monde académique, notamment avec l'Ecole des Ponts et l'Ecole d'Architecture de Nantes, où je continue de mener des activités d'enseignement.

Mon poste actuel au sein de l'IFSTTAR comprend l'encadrement hiérarchique de 2 techniciens au sein du pôle dont je suis responsable au laboratoire SMC (pôle "Comportement des Matériaux et des Assemblages") (figure 1.1). J'encadre également dans le cadre de travaux transversaux d'autres techniciens du laboratoire en fonction des projets pour lequel je suis pilote (mise en place d'instrumentation, réalisation d'essais mécaniques). Ceci me permet de m'appuyer sur les compétences de la plupart des personnes du laboratoire afin de mener à bien les études nécessaires à l'avancée de mes travaux. Les travaux présentés dans la partie scientifique sont donc le résultat d'un travail collégial au sein des laboratoires où j'ai pu travailler et avec d'autres laboratoires partenaires des différentes études présentées. Cela permet d'obtenir des résultats faisant intervenir des compétences multi-disciplinaires et donc plus riches en enseignements.

Enfin, je participe activement à l'animation de la recherche au sein de mon établissement (co-animation de l'Action de Recherche et de Développement sur les "Matériaux et Structures innovants") et du Réseau Scientifique et Technique en participant à des programmes de recherche communs. Je suis également membre de plusieurs associations professionnelles et académiques nationales et internationales en lien avec mes thématiques (notamment l'AFGC, l'AMAC et l'IIFC).

La partie consacrée au développement d'une partie de mes activités de recherche a, quand à elle, permis pour chacune des thématiques abordée de décrire les principaux enjeux et l'état de la connaissance actuelle sur le sujet, les principales investigations que nous avons pu mener et leurs conclusions, et de donner quelques éléments sur les études en cours ou à venir. De manière générale, sur le sujet de l'utilisation des matériaux composites et du collage structural en génie civil, mon retour d'expérience me permet d'identifier les verrous suivants limitant pour le moment une plus grande utilisation de ces technologies sur site :

- Verrou A. La fourniture de méthodes d'évaluation robustes de l'efficacité des solutions proposées qui pourront ensuite être utilisées dans le cadre de procédure de certification des produits. Ces méthodes doivent bien entendu être associées à des procédures d'exploitations des résultats adaptées en accord avec les phénomènes physiques et chimiques rencontrés,
- Verrou B. La nécessité d'améliorer la connaissance de la durabilité des solutions proposées permettant une meilleure définition des coefficients de sécurité. Ceci peut concerner la durabilité environnementale de la solution, mais aussi son comportement vis-à-vis de la fatigue ou de phénomènes différés comme le fluage ou la relaxation,
- Verrou C. La proposition de solutions de monitoring et/ou de contrôle non destructif sur site permettant d'évaluer le bon fonctionnement du matériau et/ou de l'assemblage et d'avertir le maître d'ouvrage en cas de défaillance.

On retrouve en fait ces préoccupations pour l'ensemble des structures de génie civil, mais davantage de réponses sont aujourd'hui disponibles pour les matériaux et les assemblages classiquement utilisés.

Pour chacune des applications auxquelles j'ai pu m'intéresser, mes travaux s'inscrivent donc à favoriser la levée de ces trois verrous. Ceux-ci sont résumés dans le tableau 7.1 en lien avec les trois verrous identifiées et les applications étudiées, et en intégrant seulement les thématiques présentées dans l'annexe scientifique.

On notera que la problématique d'utilisation de ces technologies en génie civil soulève un autre enjeu. Le conservatisme actuel tend en effet à limiter leur utilisation en substitution d'éléments de structure sans adapter l'ensemble de la conception à leurs caractéristiques. On peut citer en exemple les préconisations actuelles sur les épaisseurs d'enrobage ou la limite d'ouverture de fissure qui sont calquées sur le cas du béton armé avec armature acier carbone classique. Il reste donc un champ d'étude important à réaliser sur ce point pour permettre d'utiliser pleinement le potentiel qu'offre ces nouvelles technologies au sein des structures du génie civil.

Application	Verrou A : Fourniture de méthodes d'évaluation de la technique	Verrou B : Etude de sa durabilité	Verrou C : Proposition de solution de monitoring ou de contrôle non destructif
Renforcement des structures en béton par composites collés	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modélisation et optimisation du transfert des efforts</li> <li>- Mise au point de procédures de caractérisation en laboratoire et sur site</li> <li>- Travaux expérimentaux de caractérisation d'ancrage optimisés (Sous-traitance à l'ANR INPERMISE)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etude du vieillissement en milieu humide (Contrat SIKa)</li> <li>- Etude du fluage et du couplage entre fluage et vieillissement en milieu humide (Thèse N. Houhou)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Premières investigations de contrôle d'assemblages collés par acousto-ultrasons (stage financé par ECND_PdL)</li> <li>- Utilisation de méthodes acoustiques dans le cadre du projet CLERVAL</li> </ul>
Renforcement des structures métalliques par composites collés	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modélisation et optimisation du transfert des efforts (Thèse H. Chafi)</li> <li>- Mise au point de procédures de caractérisation en laboratoire et sur site (Thèse E. Lepretre, Contrat SNCF, Projet FASSTBridge)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investigations sur la durabilité en milieu humide (Projet FASST-Bridge)</li> <li>- Investigations en fatigue (Thèse H. Chafi, Thèse E. Lepretre, Contrat SNCF, Projet FASSTBridge)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proposition de stratégies de monitoring de renforcements composites en cours (Projet FASSTBridge)</li> <li>- Evaluation de capteurs de suivi de fatigue dans le cadre du projet SURFFEOL</li> </ul>
Structures mixtes bois-béton assemblées par collage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modélisation et optimisation du transfert des efforts</li> <li>- Mise au point de procédures de caractérisation en laboratoire (Thèse L. Loulou)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investigations sur la durabilité en milieu humide (Thèse L. Loulou)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Premières investigations sur l'utilisation des acousto-ultrasons sur le bois</li> </ul>
Renforcement du béton par armatures composites	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise au point de procédures de caractérisation en laboratoire (Contrat TOTAL, Thèse A. Rolland)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investigations sur la durabilité en milieu alcalin (Thèse A. Rolland)</li> </ul>	

TABLE 7.1: Synthèse des applications présentées dans l'annexe scientifique et description des travaux réalisés ou en cours pour chacun des trois principaux verrous

Pour la suite de mes activités, je souhaite continuer à recentrer mes thématiques en lien avec les activités du laboratoire SMC. Ceci a impliqué, comme je l'ai expliqué précédemment, un arrêt de mes travaux concernant le contrôle non destructif du béton. J'ai également fortement diminué mon implication sur les thématiques du renforcement de structures en béton par composites collés et de la réalisation de structures mixtes bois/béton assemblées par collage. Je reste toutefois impliqué ponctuellement dans certains projets en relation avec les laboratoires du RST en fonction de mes compétences et de mes disponibilités (projet de développement MACICO notamment et continuité des travaux de recherche sur la durabilité de la connexion par collage entre bois et béton).

Je situe donc aujourd'hui mes principales perspectives en terme de travaux de recherche sur les thématiques restantes en lien avec les trois verrous identifiés :

- Concernant les travaux portant sur la caractérisation du transfert des efforts par collage et son optimisation, nous continuons de collaborer avec le laboratoire Navier, notamment sur la thématique de l'ancrage courbe et de la caractérisation de son comportement vis-à-vis de la fatigue. Ces travaux ont été à dominante expérimentale pour le moment, mais il est vraisemblable que nous nous repençons sur l'utilisation des modèles LS1 et notamment le développement d'une modélisation pour ancrage courbe dans le cas de comportements d'interface non linéaires. Ces travaux peuvent bien entendu être utilisés dans le cadre de la thématique du renforcement des structures métalliques par composites collés par exemple.
- En ce qui concerne la thématique du renforcement des structures métalliques par collage de composites, nous avons plusieurs études en cours sur le sujet. La première concerne le travail de thèse d'E. Lepretre qui se terminera fin 2016 et qui apporte actuellement des réponses sur l'efficacité de ce type de méthode dans le cas d'opération de mise en sécurité d'ouvrages fissurés. La seconde étude concerne le projet Européen Fasstbridge qui devrait s'intéresser au renforcement vis-à-vis de la fatigue de détails non fissurés. Ce projet devrait aboutir à une méthodologie complète puisqu'il intègre la définition du diagnostic de la structure, la proposition de renforcement par matériaux composites et la description de méthodes de dimensionnement adaptées, la définition d'un protocole de caractérisation en laboratoire, la proposition de solutions de monitoring et une mise en application sur site. Ceci devrait permettre d'apporter des réponses supplémentaires aux maîtres d'ouvrages métalliques qui sont aujourd'hui confrontés à des besoins de maintenance conséquents sur leur parc d'ouvrages.
- Les travaux sur le sujet de l'utilisation des armatures composites sont pour le moment en veille suite à la fin des travaux de thèse d'A. Rolland. Nous travaillons actuellement à la valorisation des résultats de cette étude et à la définition de travaux additionnels probablement en collaboration avec l'université de Sherbrooke. Il est à noter que l'utilisation de ces armatures offrent de nombreuses perspectives, et que je souhaiterais donc poursuivre des travaux de recherche sur ce sujet. Ces travaux pourraient être en lien avec l'utilisation de formulations de béton différentes (puisque les problématiques de durabilité ne sont pas les mêmes que celles des armatures en acier carbone) ou encore avec l'utilisation de ce type d'armature pour le remplacement d'armatures de précontrainte (armatures

- dites "actives"). Je pense également que ce type d'armature présente un fort intérêt pour la réalisation de structures Off-Shore en béton armé notamment dans le cadre du développement des technologies EMR (Energies Marines Renouvelables). Je reste également en contact avec l'AFCAB et l'ASQPE sur ces thématiques pour favoriser l'émergence de référentiels adaptés à ce type de technologie.
- Nous allons également continuer nos travaux sur la thématique des assemblages soudés et de leur fatigue. Des travaux sur l'évaluation de solutions de monitoring que je n'ai pas abordé dans ce mémoire sont en effet en cours dans le cadre du projet Région Pays de Loire SURFFEOL et nous proposons actuellement un travail de thèse sur cette thématique intégrant notamment l'évaluation et la modélisation de méthodes dites "de parachèvement".
  - Je travaille également actuellement dans le cadre du projet ANR MACENA sur le sujet de l'influence de la température sur le comportement des armatures métalliques du béton (armatures passives et actives). Ceci m'a permis plus particulièrement de mettre au point des procédures expérimentales sur ce sujet qui pourront m'être utiles pour la caractérisation de l'influence de la température pour d'autres armatures (en acier inoxydable ou encore en matériaux composites par exemple).
  - Enfin, je souhaite continuer à travailler sur les possibilités offertes par les méthodes acoustiques pour l'instrumentation et le monitoring d'éléments de structures, d'assemblages et/ou de structures. Les premiers travaux que j'ai pu réaliser se sont en effet avérés riches en enseignement mais ont souligné la nécessité de développements additionnels notamment sur l'aide à l'exploitation et à l'interprétation des résultats. Ceci implique la réalisation de travaux expérimentaux en laboratoire importants pour les différents champs d'application pour lesquels cette méthode prouverait son intérêt. Outre les applications portant sur la caractérisation du bois et du collage par acousto-ultrasons présentés dans la partie scientifique, on pourrait penser que ce type d'instrumentation est particulièrement adaptée au suivi de phénomènes d'endommagements à long terme, comme ceux impliqués lors de la rupture par fluage de matériaux composites par exemple ([Kotelniva-Weiler et al. \(2013\)](#)). Nous pensons d'ailleurs proposer des travaux en ce sens en collaboration avec le laboratoire Navier.

En résumé, la poursuite de mes activités de recherche devrait principalement porter sur les thématiques de l'amélioration du comportement à la fatigue des structures métalliques, que ce soit par collage de matériaux composites ou par techniques de parachèvement dans le cas des assemblages soudés, et sur le sujet de l'utilisation des armatures composites au sein des structures en béton. Elle intégrera des travaux concernant les trois verrous identifiés (A : l'évaluation de l'efficacité des techniques étudiées et la proposition de référentiels adaptés intégrant notamment la modélisation du transfert des efforts par collage, B : l'évaluation de la durabilité de ces techniques, et C : la proposition d'outils de monitoring et de contrôle non destructifs adaptés intégrant notamment l'instrumentation vis-à-vis de la fatigue et l'utilisation des techniques acoustiques) afin de favoriser l'utilisation de ces deux techniques par les différents acteurs du génie civil (bureaux d'étude, entreprises de BTP, maîtres d'ouvrage).



# Bibliographie

- ACI (2006). ACI 440.1R-06 : Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars.
- ACI (2008a). ACI 440.5-08 : Specification for construction with fiber-reinforced oplymer reinforcing bars.
- ACI (2008b). ACI 440.6-08 : Specification for carbon and glass fiber-reinforced polymer bar materials for concrete reinforcement.
- Adams, R. and Drinkwater, B. (1997). Non-destructive testing of adhesive-bonded joints. *NDT&E International*, 30 :93–98.
- Adams, R. D. and Peppiatt, N. A. (1973). Effect of poisson’s ratio strains in adherends on stresses of an idealized lap joint. *The journal of strain analysis for engineering design*, 8(2) :134–139.
- Adams, R. D. and Peppiatt, N. A. (1974). Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. *Journal of strain analysis*, 9(3) :185–196.
- AFGC (2011). *Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites : Recommandations provisoires*. Association Française du Génie Civil.
- AFGC (2015). *Renforcement parasismique de structures en béton armé par matériaux composites - recommandations provisoires*. Association Française du Génie Civil.
- Ahmad, F. (2011). *Mise en précontrainte des bétons fibre à ultra haute performance (BFUHP) à l’aide de matériaux composites en carbone (PRFC)*. PhD thesis, Université Paris Est.
- Alvarez-Lima, R., Diaz Diaz, A., Caron, J., and Chataigner, S. (2012). Enhanced layerwise model for laminates imperfect interfaces - part 1 : Equations and theoretical validation. *Composite Structures*, 94(5) :1694–1702.
- Apalak, M. K. and Gunes, R. (2005). Investigation of elastic stresses in an adhesively bonded single lap joint with fonctionnally graded adherends in tension. *Composite Structures*, 70 :444–467.
- ASTM Standard (2007). Astm e1495-02 : Guide for acousto-ultrasonic assessment of composites, laminates, and bonded joints.

- Aubagnac, C., Germain, D., Houel, A., Sadone, R., Maherault, J., Briost, J., Marcotte, C., Khadour, A., and Quiertant, M. (2015). Présentation des premiers résultats de la poutre du vipp de clerval. In *GC 2015, ESTP, Paris*.
- Barquins, M. and Fadel, K. (1999). Adhésion et collage. *Découverte*, 271 :31–46.
- Beall, F. (1987). Fundamentals of acoustic emission and acousto-ultrasonics. In *Sixth symposium on nondestructive testing of wood*.
- Benmokrane, B., Wang, P., Ton-That, T., Rahman, H., and Robert, J. (2002). Durability of glass fiber-reinforced polymer reinforcing bars in concrete environment. *Journal of composites for construction*, 6 :143–153.
- Benzarti, K., Chataigner, S., Quiertant, M., Marty, C., and Aubagnac, C. (2011a). Accelerated ageing behaviour of the adhesive bond between concrete specimens and cfrp overlays. *Construction and Building Materials*, 25 :523–538.
- Benzarti, K., Freddi, F., and Fremond, M. (2011b). A damage model to predict the durability of bonded assemblies. part i : debonding behavior of frp strengthened concrete structures. *Construction and Building Materials*, 25 :547–555.
- Boss, J. N., Ganesh, V. K., and Lim, C. (2003). Modulus grading versus geometrical grading of composite adherends in single lap bonded joints. *Composite Structures*, 62 :113–121.
- Bretton, C. and Villoutreix, G. (2005). Familles d’adhésifs et caractérisation d’un collage structural. *Techniques de l’Ingénieur*, (AM3560).
- Bruhat, D., Gaillet, L., Le Cam, V., Richard, M., and C., T. (2012). *Surveillance acoustique des câbles : guide méthodologique du système CASC - LPC*. IFSTTAR.
- Bruneaux, M. A. (2004). *Durabilité des assemblages collés*. PhD thesis, ENPC.
- Cadei, J., Stratford, T., Duckett, W., and Hollaway, L. (2004). *Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced polymers*. Construction Industry Research and Information Association.
- Caron, J. and Chataigner, S. (2008). Dispositif d’ancrage de plats utilisables notamment dans le domaine du génie civil. Brevet N° 08/06635 du 26-11-2008.
- Caron, J., Julich, S., and Baverel, O. (2009). Selfstressed bowstring footbridge in frp. *Composite structures*, 89 :489–496.
- Caron, J.-F., Duong, V. A., Diaz-Diaz, A., Chataigner, S., and Lerpinière, A. (2015). Une approche de type layer-wise pour la modélisation de joint de colle élastoplastique. *Revue des Composites et Matériaux Avancés*, 24 :413–423.
- Carreira, R., Caron, J.-F., and Diaz-Diaz, A. (2002). Model of multilayered materials for interface stresses estimation and validation by finite element calculations. *Mechanics of materials*, 34 :217–230.

- CETIM (2006). *Guide du Collage - Bureaux d'études et aide à la conception*. Lavoisier.
- Chataigner, S. (2008). *Conception et dimensionnement d'un ancrage de hauban plat en matériaux composites*. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Chataigner, S., Aubagnac, C., Quiertant, M., and Benzarti, K. (2010a). *Méthode d'essai N°72 : Essai de cisaillement à simple recouvrement pour caractériser l'adhérence de renforts composites collés sur substrats béton*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.
- Chataigner, S. and Caron, J. (2011). Shear stress transfer optimization in the case of an adhesively bonded joint : use of a curved bonded joint for a structural bonded assembly. *Construction and Building Materials*, 25 :442–451.
- Chataigner, S., Caron, J., Benzarti, K., Quiertant, M., and Aubagnac, C. (2009). Characterization of composite to concrete bonded interface - description of the single lap shear test. *European Journal of Civil and Environmental Engineering*, 13 :1073–1082.
- Chataigner, S., Caron, J., Benzarti, K., Quiertant, M., and Aubagnac, C. (2011a). Use of a single lap shear test to characterize composite-to-concrete or composite-to-steel bonded interfaces. *Construction and Building Materials*, 25 :468–478.
- Chataigner, S., Caron, J., Diaz Diaz, A., Aubagnac, C., and Benzarti, K. (2010b). Non linear failure criteria for a double lap bonded joint. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30(1) :10–20.
- Chataigner, S., Dieng, L., Falaise, Y., and Grasset, M. (2015a). Evaluation des contraintes résiduelles dans les assemblages soudés et amélioration de leur durée de vie par techniques de parachèvement. *Sub. to Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*.
- Chataigner, S., Duong, V., Caron, J., and Diaz Diaz, A. (2011b). Investigation of adhesive's elastoplasticity in bonded lap joints : slip and shear strain along the joint. *Construction and Building Materials*, 25 :432–441.
- Chataigner, S., Flety, A., Aubagnac, C., Loulou, L., Caré, S., and Leroy, R. (2011c). Transfert des efforts par collage structural entre bois et béton : utilisation d'un essai push-out pour le choix de l'adhésif. In *GC 2011, ESTP, Paris*.
- Chataigner, S. and Gagnon, A. (2011). Or 11 r076 : Synthèse des travaux du dla sur le renforcement et la réparation de structures métalliques par composites collés. Technical report, CETE de Lyon - DL Autun.
- Chataigner, S., Gagnon, A., Quiertant, M., Benzarti, K., and Aubagnac, C. (2011d). Renforcements par composites collés des structures métalliques de génie civil : durabilité du transfert des efforts par collage entre renfort composite et métal. *Annales du Batiment et des Travaux Publics*, 4-5 :93–99.
- Chataigner, S., Gaillet, L., Perier, V., Lanata, F., and Colombe, T. (2013a). Utilisation des acousto-us pour le contrôle non destructif d'éléments en bois lamellé collé. In *GdR Bois - Marne La Vallée*.

- Chataigner, S., Gaillet, L., Vallée, L., and Le Gal La Salle, E. (2015b). Contrôle non destructif d'assemblages composite/béton collés par acousto-ultrasons. In *JNC - Villeurbanne*.
- Chataigner, S., Rabasse, M., Benzarti, K., Quiertant, M., and Aubagnac, C. (2010c). Durabilité des renforcements par collage de matériaux composites des structures en béton. *La technique Francaise du beton*.
- Chataigner, S., Rolland, A., Benzarti, K., Dieng, L., Boudarene, O., Paul, J., Quiertant, M., Argoul, P., and Collet, P. (2013b). Caractérisation d'armatures en prf d'aramide utilisées dans les structures en béton armé. In *Journées Nationales sur les Composites 18- Nantes*.
- Chen, Y., Davalos, J., Ray, I., and Kim, H. (2007). Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of frp reinforcing bars for concrete structures. *Composite structures*, 78 :101–111.
- CNR (2004). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures - Materials, RC and PC structures, masonry structures*. Number DT-200/2004. National Research Council, Rome.
- CNR (2007a). *Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with Fiber-Reinforced Polymer bars*. Number DT-203/2006. National Research Council, Rome.
- CNR (2007b). *Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures - Metallic structures - Preliminary study*. Number DT-202/2005. National Research Council, Rome.
- Cognard, J. (1994). Le collage : Etat des connaissances et perspectives. Technical report, IEP.
- Cognard, P. (2002). Collage des matériaux - mécanismes. classification des colles. Technical Report BM 7615, Techniques de l'Ingénieur.
- Colombe, T. (2013). Contrôle non destructif de structures sur les structures bois. Master's thesis, Université de Rennes.
- Cosenza, E., Manfredi, G., and Realfonzo, R. (1997). Behavior and modeling of bond of frp rebars to concrete. *Journal of composites for construction*, 1 :40–51.
- Couvrat, P. (1992). *Le collage structural moderne*. Lavoisier.
- Creac'hcadec, R., Jamin, G., Cognard, J., and Jousset, P. (2014). Experimental analysis of the mechanical behaviour of a thick flexible adhesive under tensile/compression-shear loads. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 48 :258–267.
- Da Silva, L. and Ochsner, A. (2008). *Modeling of adhesively bonded joints*. Springer.
- DaSilva, L. F. M. and Adams, R. D. (2007a). Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27 :216–226.

- DaSilva, L. F. M. and Adams, R. D. (2007b). Techniques to reduce peel stresses in adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27 :227–235.
- De Lorenzis, L. and Zavarise, G. (2008). Modeling of mixed-mode debonding in the peel test applied to superficial reinforcements. *International Journal of Solids and Structures*, 45 :5419–5436.
- De los Rios, G., Balderas, R., Duong, V., Chataigner, S., Caron, J., Ehrlacher, A., Foret, G., and Diaz Diaz, A. (2009). Laminated materials with plastic interfaces : modeling and calculation. *Modeling and simulation in materials science and engineering*, 17(2).
- Diaz-Diaz, A., Caron, J.-F., and Carreira, R. (2002). Software application for evaluating interfacial stresses in inelastic symmetrical laminates with free edges. *Journal of composite structures*, 58 :195–208.
- DNV (2012). *Design, fabrication, operation and qualification of bonded repair of steel structures*. Number DNV-RP-C301. Det Norske Veritas.
- Duong, V., Diaz Diaz, A., Chataigner, S., and Caron, J. (2011). A layerwise finite element for multilayers with imperfect interfaces. *Composite Structures*, 93(12) :3262–3271.
- Ehrlart, B., Ecault, R., Touchard, F., Boustie, M., Berthe, L. and Bockenheimer, C., and Valeske, B. (2014). Development of a laser shock adhesion test for the assessment of weak adhesive bonded cfrp structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 52 :57–65.
- Elaqra, H., Godin, N., Peix, G., R'Mili, M., and Fantozzi, G. (2007). Damage evolution analysis in mortar, during compressive loading using acoustic emission and X-ray tomography : Effects of the sand/cement ratio. *Cement and concrete research*, 37 :703–713.
- Eligehausen, R., Bertero, V., and Popov, E. (1982). Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations : tests and analytical model. report nr83/23. Technical report, University of California, Berkeley.
- Eurocode 2 (2006). Partie 2 : Ponts en béton - calcul et dispositions constructives, NF EN 1992-2.
- Eurocode 3 (2007). Partie 2 : Ponts métalliques, NF EN 1993-2.
- Eurocode 4 (2006). Partie 2 : Structures mixtes acier-béton - règles générales et règles pour les ponts, NF EN 1994-2.
- Eurocode 5 (2005). Partie 2 : Structures en bois - ponts, NF EN 1995-2.
- Fascicule 65 (2012). Exécution des ouvrages de génie civil en béton, CCTG.
- Fascicule 66 (2012). Exécution des ouvrages de génie civil à ossatures métalliques, CCTG.
- FIB (2001). *Bulletin 14 : Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*. International federation for structural concrete.

- FIB (2007). *Bulletin 40 : FRP reinforcement in RC structures*. International federation for structural concrete.
- Firmo, J., Correia, J., and Bisby, L. (2015). Fire behaviour of frp-strengthened reinforced concrete structural elements : a state-of-the-art review. *Composites Part B : Engineering*, 80 :198–216.
- Fitton, M. D. and Broughton, J. G. (2005). Variable modulus adhesives : an approach to optimised joint performance. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 25 :329–336.
- Gaillet, L. (2013). *ERLPC OA 72 : Les câbles dans le génie civil - De l'importance de comprendre et de connaître leur état de dégradation, de les protéger*. IFSTTAR.
- Gangarao, H., Taly, N., and Vijay, P. (2006). *Reinforced concrete design with FRP composites*. Taylor and Francis Group.
- Godin, N., Huguet, S., Gaertner, R., and Salmon, L. (2004). Clustering of acoustic emission signals collected during tensile tests on unidirectional glass/polyester composite using supervised and unsupervised classifiers. *NDT&E International*, 37 :253–264.
- Grosse, C. and Ohtsu, M. (2008). *Acoustic emission testing - Basics for research - Applications in civil engineering*. Springer.
- Gurtler, H. (2004). *Composite action of FRP bridge decks adhesively bonded to steel main girders*. PhD thesis, EPFL.
- Hadj-Ahmed, R. (1999). *Modélisation des assemblages collés : Application à l'optimisation du transfert des efforts de cisaillement*. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Hadj-Ahmed, R., Foret, G., and Ehlacher, A. (2001). Stress analysis in adhesive joints with a multiparticle model of multilayered materials (m4). *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 21(4) :297–307.
- Hamelin, P. (2006). *Le Collage structural*. Magnytude/ISAT Nevers.
- Houhou, N. (2012). *Durabilité des interfaces collées béton/renforts composites : développement d'une méthodologie d'étude basée sur un dispositif de fluage innovant conçu pour être couplé à un vieillissement hygrothermique*. PhD thesis, Université Paris-Est.
- Houhou, N., Benzarti, K., Quiertant, M., Chataigner, S., Flety, A., and Marty, C. (2014a). Analysis of the non linear creep behaviour of frp-concrete bonded assemblies. *Journal of Adhesion and Science Technology*, 29(14-15) :1345–1366.
- Houhou, N., Benzarti, K., Quiertant, M., Chataigner, S., Youssef, G., Aubagnac, C., Rabasse, M., and Flety, A. (2014b). Fluage des interfaces collées béton/composite couplé à un vieillissement hygrothermique : études expérimentales et analytiques. *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, 6 :54–70.

- Houhou, N., Benzarti, K., Quiertant, M., Marty, C., and Chataigner, S. (2013). Influence des charges minérales sur les propriétés viscoélastiques et le comportement en fluage d'adhésifs utilisés en construction. In *Journées Nationales sur les Composites 18 - Nantes*.
- ISIS (2006). ISIS Product Certification N° 1 : Specifications for product certification of fibre reinforced polymers (FRPs) as internal reinforcement in concrete structures.
- ISIS (2007). ISIS Design Manual N° 3 : Reinforcing concrete structures with fibre reinforced polymers.
- Jacquemin, F. and Vautrin, A. (2002). The effect of cyclic hygrothermal conditions on the stresses near the surface of a thick composite pipe. *Composites science and technology*, 62 :567–570.
- JSCE (1997). Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials.
- Julich Saavedra, A. (2006). *Shape control of a fibre reinforced polymer bridge*. PhD thesis, ENPC.
- Karbhari, V. (1998). Use of composite materials in civil infrastructure in japan. Technical report, International Technology Research Institute.
- Karbhari, V. (2014). *Rehabilitation of metallic civil infrastructure using fiber-reinforced polymer (FRP) composites*. Woodhead Publishing.
- Karbhari, V., Chin, J., Hunston, D., Benmokrane, B., Juska, T., Morgan, R., Lesko, J., Sorathia, U., and Reynaud, D. (2003). Durability gap analysis for fiber-reinforced polymer composites in civil infrastructure. *Journal of Composites for construction*, 7 :238–247.
- Kawamoto, S. and Williams, R. (2002). *Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood-based composites*. Madison : Department of agriculture, forest service, forest products laboratory.
- Kharrat, M. and Gaillet (2015). Non-destructive evaluation of anchorages zones by ultrasonics techniques. *Ultrasonics*, 61 :52–61.
- Kinloch, A. J. (1987). *Adhesion and Adhesives : Science and Technology*. Chapman and Hall.
- Kotelniva-Weiler, N., Baverel, O., and Caron, J.-F. (2013). Kinetic of fibre ruptures in a UD composite material with a viscoelastic matrix subject to traction. *Revue des Composites et Matériaux Avancés*, 23 :125–138.
- Kuhn, B., Lukic, M., Nussbaumer, A., Gunther, H., Helmerich, R., Herion, S., Kolstein, M., Walbridge, S., Androic, B., Dijkstra, O., and Bucak, O. (2008). Assessment of existing steel structures : recommendations for estimation of remaining fatigue life. Technical Report JRC 43401, JRC Scientific and Technical Reports.
- LCPC (2006). *Renforcement des ouvrages en béton par collage de composites : bilan de deux opérations de recherche du LCPC*, volume OA 54. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.

- LCPC (2008). *Recommandations pour l'inspection détaillée des ouvrages en bois*. Guide technique.
- Le Roy, R., Pham, H., and Foret, G. (2009). New wood composite bridges. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13 :1125–1139.
- Leaderman, H. (1943). *Elastic and creep properties of filamentous materials and other high polymers*. Washington DC : Textile foundation.
- Lebris, E. (2003). *Modélisation de la pénétration d'une colle à solvant dans un milieu poreux*. PhD thesis, ENPC.
- Lepretre, E., Chataigner, S., Dieng, L., and Gaillet, L. (2014). Understanding the fatigue behavior of riveted joints : modelling of the hot-riveted process. In *Eurosteel - Naples*.
- Loulou, L. (2013). *Vieillissement hygrothermique des assemblages collés bois-béton*. PhD thesis, Université Paris-Est.
- Loulou, L., Caré, S., Le Roy, R., Bornert, M., Bertrand, F., Boumedienne, N., and Chataigner, S. (2011). Etude de la durabilité des assemblages collés bois-béton soumis à des chargements hydriques. In *CFM, Besançon*.
- Maillet, E., Godin, N., R'Mili, M., Reynaud, P., Fantozzi, G., and Lamon, J. (2014). Damage monitoring and identification in SiC/SiC minicomposites using combined acousto-ultrasonics and acoustic emission. *Composites : Part A*, 57 :8–15.
- Maravegias, S. and Triantafillou, T. C. (1996). Numerical study of anchors for composite prestressing straps. *Composite Structures*, 35 :323–330.
- Marchand, P., Baby, F., Khadour, A., Battesti, T., Rivillon, P., Quiertant, M., Nguyen, H., Genereux, G., Deveaud, J., Simon, A., and Toutlemonde, F. (2015). Bond behaviour of reinforcing bars in uhpfrc. *Materials and structures*.
- Meaud, C., Jurkiewicz, B., and Ferrier, E. (2014). Steel-concrete bonding connection : an experimental study and non-linear finite element analysis. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 54 :131–142.
- Menard, K. (2008). *Dynamic mechanical analysis - a practical introduction*. Taylor & Francis.
- Mendoza, L., Diaz Diaz, A., Caron, J., and Chataigner, S. (2012). Enhanced layerwise model for laminates imperfect interfaces - part 2 : Experimental validation and failure prediction. *Composite Structures*, 94(3) :1032–1037.
- Michel, J., Widmann, R., Czaderski, C., Allahvirdizadeh, R., and Motavalli, M. (2015). Glass transition evaluation of commercially available epoxy resins used for civil engineering applications. *Composites Part B*, 77 :484–493.
- Moradian, Z. (2011). *Application de la méthode d'émission acoustique pour la surveillance du comportement au cisaillement des joints actifs*. PhD thesis, Université de Sherbrooke.

- Mouton, Y. (2011). *Organic materials for sustainable construction*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons.
- Mouzannar, H., Bost, M., Joffrin, P., Pruvost, C., Rojat, F., Blache, J., Houel, A., Valade, M., Khadour, A., Chataigner, S., David, J., Falaise, Y., and Quiertant, M. (2016). Instrumentation of large scale direct shear test to study the progressive failure of concrete/rock interface. In *MCD - Nantes*.
- Moy, S. (2001). *FRP composites - life extension and strengthening of metallic structures*. ICE design and practice guide.
- Naciri, T., Ehrlacher, A., and Chabot, A. (1998). Interlaminar stress analysis with a new multi-particle modelization of multilayered materials (M4). *Composite science technology*, 58 :337–343.
- Nguyen, V. and Caron, J. (2006). A new finite element for free edge effect analysis in laminated composites. *Computers and Structures*, 84 :1538–1546.
- Nguyen Trung, V. A., Le Roy, R., and Caron, J.-F. (2015). Multi-reinforcement of timber beams with composite materials : Experiments and fracture modeling . *Composite Structures*, 123 :233–245.
- Nobel Pujol, V. (2004). *Etude du mécanisme d'action du monofluorophosphate de sodium comme inhibiteur de la corrosion des armatures métalliques dans le béton*. PhD thesis, Université Paris VI.
- Perier, V., Chataigner, S., and Pruvost, A. (2013). Comparaison de différentes armatures utilisées pour le renforcement du béton. *BOA du LCPC*, 280-281 :51–62.
- Pham, H. S. (2007). *Optimisation et comportement en fatigue de la connexion bois-BFUP pour de nouveaux ponts mixtes*. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Pires, I., Quintino, L., Durodola, J. F., and Beevers, A. (2003). Performance of bi-adhesive bonded aluminium lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23 :215–223.
- Ramadan, S., Gaillet, L., Tessier, C., and Idrissi, H. (2008). Detection of stress corrosion cracking of high-strength steel used in prestressed concrete structures by acoustic emission technique. *Applied surface science*, 254 :2255–2261.
- Rizkalla, S., Dawood, M., and Schnerch, D. (2008). Development of a carbon fiber reinforced polymer system for strengthening steel structures. *Composites : Part A*, 39 :388–397.
- RLPC (2010). *Guide pour le contrôle extérieur des opérations de réparation ou de renforcement de structures en béton par collage de matériaux composites*. Réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées.
- Robert, M., Cousin, P., and Benmokrane, B. (2009). Durability of gfrp reinforcing bars embedded in concrete. *Journal of composites for construction*, 13 :66–73.

- Rolland, A. (2015). *Durabilité des armatures composites utilisées pour le renforcement du béton*. PhD thesis, Université Paris-Est.
- Rolland, A., Chataigner, S., Benzarti, K., Dieng, L., Boudarene, O., Paul, J., Quiertant, M., and Collet, P. (2013). Low temperature behavior of concrete with braided aramid fiber bars. In *FRPRCS - Guimaraes*.
- Rolland, A., Chataigner, S., Benzarti, K., Quiertant, M., Argoul, P., and Paul, J. (2014). Mechanical behavior of aramid fiber reinforced polymer (afrp) rebar/concrete interfaces. In *TRA - Paris La Défense*.
- Rossi, P., Tailhan, J., Le Maou, F., Gaillet, L., and Martin, E. (2012). Basic creep behavior of concretes investigation of the physical mechanisms by using acoustic emission. *Cement and concrete research*, 42 :61–73.
- Sadone, R. (2011). *Comportement des poteaux en béton armé renforcés par matériaux composites et soumis à des sollicitations de type sismique et analyse d'éléments de dimensionnement*. PhD thesis, Université Paris-Est.
- Sadone, R., Quiertant, M., Chataigner, S., Mercier, J., and Ferrier, E. (2010). Behavior of an innovative end-anchored externally bonded cfrp strengthening system under low cycle loading. In *5th International conference on FRP composites in civil engineering CICE 2010, Beijing, China*.
- Schindell-Bidinelli, E. H. (1992). *Pratique du collage industriel*. Lavoisier.
- Schnerch, D., Dawood, M., and Rizkalla, S. (2007). Proposed design guidelines for strengthening of steel bridges with frp materials. *Construction and Building Materials*, 21 :1001–1010.
- Schollmayer, M. (2009). *Through-thickness performance of adhesive connections between FRP bridge decks and steel main girders*. PhD thesis, EPFL.
- SETRA (2010). *Steel-concrete composite bridges, Sustainable design guide*. SETRA.
- Si-Larbi, A., Agbossou, A., Ferrier, E., and Michel, L. (2012). Strengthening rc beams with composite fiber cement plate reinforced by prestressed frp rods : experimental and numerical analysis. *Composite structures*, 94 :830–838.
- Si Larbi, A., Ferrier, E., Jurkiewicz, B., and Hamelin, P. (2007). Static behaviour of steel concrete beam connected by bonding. *Engineering structures*, 29 :1034–1042.
- Taillade, F., Quiertant, M., Benzarti, K., and Aubagnac, C. (2011). Shearography and pulsed infrared thermography applied to a nondestructive evaluation of frp strengthening. *Construction and building materials*, 25 :568–574.
- Theillout, J. N. (1983). *Renforcement et réparation des ouvrages d'art par la technique des tôles collées*. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

- Thibon, A. (2008). Optimisation du transfert des efforts d'un joint collé par la prise en compte de l'influence des contraintes hors-plan. Rapport de stage scientifique, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Tobolsky, A. and Andrews, R. (1945). Systems manifesting superposed elastic and viscous behavior. *Journal of chemical physics*, 13 :3–27.
- Tsai, M. Y., Oplinger, D. W., and Morton, J. (1998). Improved theoretical solutions for adhesive lap joints. *International Journal of Solids and Structures*, 35(13) :1163–1185.
- United states departement of agriculture (1999). *Wood handbook - Wood as an enginnering material*. Forest products laboratory.
- Vallée, L. (2012). Contrôle non destructif de structures assemblées par collage. Master's thesis, ENSMA, Poitiers.
- Volkersen, O. (1938). Die nietkraftverteilung in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung*, 15 :41–47.
- Yang, J., Zhang, Z., Schlarb, A., and Friedrich, K. (2006). On the characterization of tensile creep resistance of polyamide 66 nanocomposites. part ii : Modeling and prediction of long-term performance. *Polymer*, 47 :6745–6758.
- Yang, Q., Xian, G., and Karbhari, V. (2008). Hygrothermal ageing of an epoxy adhesive used in frp strengthening of concrete. *Journal of applied polymers science*, 107(4) :2607–2617.
- Yao, J., Teng, J. G., and Chen, J. F. (2005). Experimental study on frp-to-concrete bonded joints. *Composites : Part B*, 36 :99–113.
- Youssef, G., Loulou, L., Chataigner, S., Flety, A., Leroy, R., Caré, S., Bornert, M., and Aubagnac, C. (2014). Analysis of the behavior of a bonded joint between laminated wood and ultra high performance fiber reinforced concrete using push-out test. *Construction and building materials*, 53 :381–391.