

OPTIMISATION DU TRANSFERT DES EFFORTS D'UN JOINT COLLÉ UTILISATION D'UN JOINT « COURBE » POUR UN COLLAGE STRUCTURAL

S. CHATAIGNER*, J.F. CARON**

* Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Autun
Bd de l'Industrie BP 141, 71405 AUTUN, Cedex
sylvain.chataigner@developpement-durable.gouv.fr

** Université Paris-Est, Institut Navier, École des Ponts
6-8 Av Blaise Pascal, Champs Sur Marne, 77455 Marne la vallée, Cedex 2

1. INTRODUCTION

La technique du collage comme moyen d'assemblage n'est pas récente, mais son utilisation pour des applications de nature structurale l'est davantage. Cette notion de collage structural est apparue au milieu du vingtième siècle avec l'avènement des résines de synthèse, et la technique est aujourd'hui appliquée dans de nombreux domaines : aéronautique, nautique, et génie civil. Dans le cas du génie civil, le collage structural est employé principalement dans le domaine de la réparation ou du renforcement des structures par collage de tôles en acier ou encore par collage de matériaux dits composites (Hamelin, 2002). Mais, de nombreuses études s'attachent aujourd'hui à l'utiliser également comme technique d'assemblage à part entière dans le cas de structures neuves.

En ce qui concerne les techniques de réparation ou de renforcement, l'Unité mixte de Recherche Navier, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et aussi plus récemment le LRPC d'Autun qui vient de créer une équipe ressource du Réseau Scientifique et Technique sur le sujet

« collage et matériaux composites » s'investissent fortement sur la compréhension du fonctionnement du collage et sur son évolution dans le temps (Limam *et al.*, 2003 ; LCPC, 2006; Chataigner *et al.*, 2008a). Des études expérimentales sont en cours sur le sujet, mais au vu des premières investigations, il est certain que la conception des joints collés réalisés et les phases de mise en œuvre du collage structural ont un impact évident sur la tenue des joints réalisés dans le temps. Cette étude s'attache à mieux comprendre les soucis liés à la conception des joints collés et pose une première réflexion sur une optimisation du fonctionnement du collage.

En ce qui concerne les structures neuves, le collage structural peut intervenir pour deux types d'assemblages différents : les assemblages classiques entre éléments d'un même matériau, et les assemblages pour structures multi-matériaux. Pour les structures acier, il paraît évident que le collage structural ne constituera qu'une technique mineure par rapport à celle de la soudure. Mais dans le cas d'autres structures (bois, béton ou encore composites), la technique du collage structural semble avoir sa place et offre des

perspectives intéressantes. Elle ne doit pas supplanter les techniques existantes mais elle peut sans doute permettre de pallier à certains défauts de techniques d'assemblages comme les concentrations de contrainte ou la souplesse trop importante des connecteurs locaux par exemple. Dans le cas des structures composites, le collage structural se révèle être la technique d'assemblage par excellence, car il existe bien souvent une réelle compatibilité chimique entre résine et matériaux puisque les résines les plus utilisées sont des résines époxydes, et que les matrices des matériaux composites sont généralement de base époxyde. Dans le cas des structures multi-matériaux, on peut citer à titre d'exemple le cas de structures bois-béton étudiées par l'UR Navier et qui comportent une semelle en béton et une âme en bois pour lesquelles les traditionnels connecteurs métalliques ont été remplacés par un adhésif époxy bi-composant (Pham, 2007). Cette structure a fait l'objet d'investigations de fatigue, et des résultats très prometteurs ont été obtenus. Il est certain que ces structures multi-matériaux ont de bonnes perspectives puisqu'elles permettent d'utiliser chacun des matériaux selon leurs performances optimales. A l'heure où les problématiques de développement durable sont à l'ordre du jour, la technique du collage structural permet de créer de nouveaux concepts de structures pour lesquels chacun des matériaux est utilisé en fonction de ses propriétés physiques et mécaniques. Afin de pouvoir s'assurer d'un fonctionnement adéquat des structures réalisées, il convient de comprendre le transfert des efforts entre les parties assemblées par collage et de l'optimiser.

Ces deux remarques nous ont conduit à approfondir les travaux sur cette technique portant sur les phénomènes de transfert, mais surtout à optimiser le fonctionnement d'un joint collé. Le point de départ de cette étude est l'ancrage d'un hauban appartenant à un concept de passerelle tout composite développé à l'UR Navier (Caron *et al.*, 2008). Le hauban en question est un plat composite à fibres de carbone et à matrice époxy, et il est ancré par collage à la structure.

La tenue d'un collage est assujettie à la tenue des différents matériaux en présence (adhésifs et adhérents), mais aussi à celle des efforts d'interface qui sont conférés à l'assemblage lors des phases de préparation de surface. Cette préparation de surface a une influence non seulement sur les efforts d'adhésion mais aussi sur l'évolution et la dégradation de ceux-ci au cours du temps. Cet aspect ne sera pas approfondi, et nous ne nous attacherons donc ici qu'à l'étude de matériaux en présence dans le joint collé, et à l'optimisation de l'assemblage. Dans un premier temps, le rôle de la pression hydrostatique sur le matériau adhésif sera mis en relief. On remarquera que celle-ci permet d'augmenter la capacité des adhésifs étudiés, et ceci nous permettra d'introduire le concept d'un joint optimisé, dit « joint courbe » (Figure 1). La seconde partie s'attachera à décrire succinctement des investigations théoriques sur cette géométrie pour vérifier qu'elle joue le rôle attendu, et étudier d'autres aspects particuliers. Enfin, la dernière partie sera vouée à la description de premiers essais réalisés à l'UR Navier et qui nous offrent de bonnes perspectives concernant ce joint optimisé. Un brevet portant sur cette

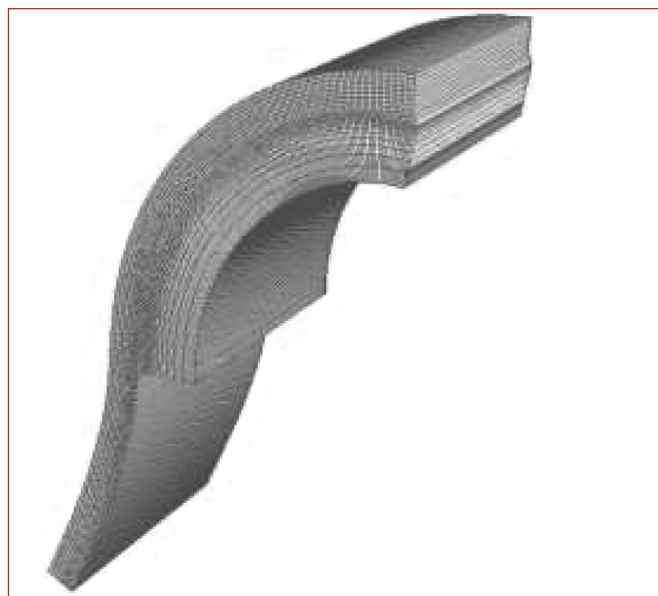


Figure 1 : Illustration du joint courbe.

géométrie vient d'être déposée, et des applications sont en cours de réalisation.

2. RÔLE DE LA PRESSION HYDROSTATIQUE

Le terme pression hydrostatique n'est pas couramment utilisé dans le domaine de la structure en génie civil, il est plus fréquent dans le domaine de la géotechnique. Afin de clarifier celui-ci, nous aborderons quelques généralités sur ce sujet dans un premier temps. Ceci nous permettra ensuite de présenter les différents essais qui nous ont permis d'étudier l'influence de cette pression sur le comportement d'adhésifs élastiques fragiles qui sont couramment utilisés en génie civil ou encore sur celui d'un adhésif industriel dont le comportement est élastoplastique. Enfin, les résultats de ces essais seront ensuite décrits, et exploités pour conclure sur l'influence de ce paramètre.

2.1. Généralités sur la pression hydrostatique

Il est fréquent de décomposer le champ des contraintes s'appliquant sur un élément en deux parties distinctes : la partie déviatorique qui est associée au champ de cisaillement, et la partie hydrostatique qui, elle, n'est pas associée aux contraintes de cisaillement. La contrainte déviatorique considérée correspond dans la majorité des cas à la contrainte de Von Mises, et ce pour utiliser ce paramètre courant dans le domaine de la mécanique. La contrainte hydrostatique correspond à la moyenne des contraintes normales. Ceci est bien résumé par les équations (1) et (2) où σ_{ij} est la composante du tenseur de contraintes dans le repère (1,2,3), i et j variant entre 1 et 3, ou p est la pression hydrostatique, et q , la contrainte déviatorique.

$$p = -\frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \quad (1)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2) + 3\sigma_{12}^2 + 3\sigma_{13}^2 + 3\sigma_{23}^2} \quad (2)$$

À titre indicatif, et peut être pour éclairer les raisons qui conduisent à décomposer un champ de contraintes suivant ces deux composantes, de nombreuses études conduisent à prendre pour critère de rupture ou de plasticité la contrainte de Von Mises pour certains matériaux comme les métaux. Pour d'autres matériaux, comme de nombreux sols, il est nécessaire d'utiliser un critère mixte linéaire prenant en compte les deux composantes : ce type de critère est connu sous le nom de critère de Drucker Prager. Dans le cas d'un matériau respectant un critère de Von Mises, son comportement est donc indépendant de la pression hydrostatique. Dans le cas d'un matériau respectant un critère linéaire de type Drucker Prager, celui-ci est linéairement lié à la composante hydrostatique. Ceci est résumé en figure 2 où les enveloppes des critères de rupture dans les deux cas sont projetées dans deux plans caractéristiques : à savoir le plan contrainte déviatorique/ contrainte hydrostatique, et le plan pour une contrainte hydrostatique nulle.

2.2. Présentation des différents essais de caractérisation réalisés

Afin de pouvoir déterminer si dans notre cas, la capacité des adhésifs étudiés utilisés couramment en génie civil dépend ou non de la pression hydrostatique, il est donc nécessaire de disposer de résultats de plusieurs essais destructifs permettant d'obtenir des couples pression hydrostatique/contrainte déviatorique différents. En théorie, deux essais seuls peuvent suffire. Nous avons décidé de nous appuyer ici sur trois essais en s'inspirant de ce qui est réalisé dans le domaine des matériaux de type céramique (Wang, 2007). Les trois essais utilisés sont des essais sur adhésifs à l'état massif qui caractérisent donc les capacités du matériau et non des interfaces dans le cas du collage: l'essai de traction simple réalisés sur haltères, l'essai de compression réalisé sur cylindres, et l'essai Brésilien réalisé également sur cylindres (Fig. 3). On notera qu'il existe une controverse sur l'adéquation d'essais sur matériaux à l'état massif pour des matériaux fonctionnant sous forme de joints minces. Dans le cas du collage en génie civil, nous avons considéré que les épaisseurs des

joints de colle étaient suffisamment importantes (supérieures à 0.25 mm) pour pouvoir corrélérer les propriétés des matériaux à l'état massif à celles des joints de colle.

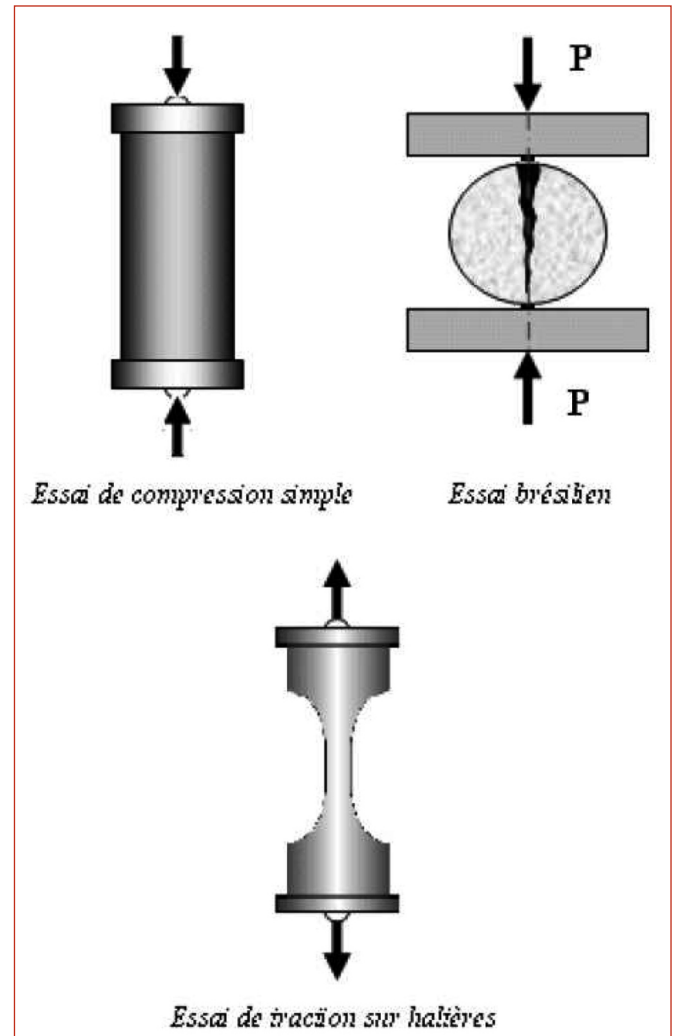


Figure 3 : Description des trois différents essais réalisés.

À partir des résultats à la rupture ou en terme de limite élastique pour ces différents essais, il est possible de déterminer trois points de l'enveloppe de rupture ou du domaine élastique du matériau adhésif étudié. Les formules permettant d'obtenir les couples pression hydrostatique/contrainte déviatorique (de Von Mises) pour chacun de ces trois essais sont donnés dans le tableau 1. On notera que P correspond

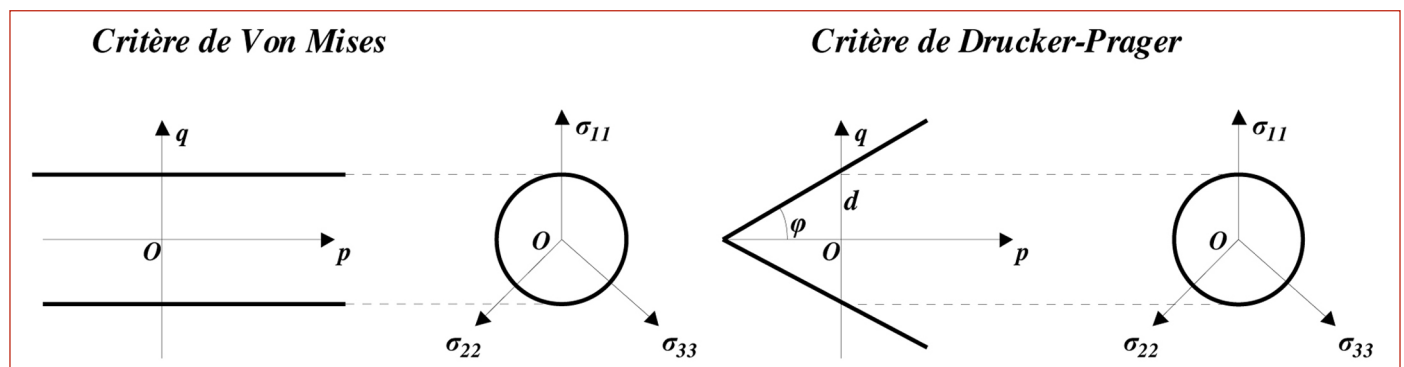


Figure 2 : Projection des deux critères dans les deux plans caractéristiques.

| | Résultat | Pressio hydrostatique | Contrainte de Von Mises |
|--------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| Compression simple | $\sigma_c = \frac{P}{\pi \frac{D^2}{4}}$ | $\frac{1}{3} \sigma_c$ | σ_c |
| Essai brésilien | $\sigma_b = \frac{2P}{\pi DL}$ | $\frac{2}{3} \sigma_b$ | $\sqrt{13} \sigma_b$ |
| Traction simple | $\sigma_t = \frac{P}{A}$ | $-\frac{1}{3} \sigma_t$ | σ_t |

Tableau 1 : Formules des couples Pression hydrostatique/Contrainte déviatorique pour les trois essais.

à l'effort à rupture ou l'effort limite, D au diamètre du cylindre, L à la hauteur du cylindre, et A à la section de l'éprouvette haltère en son milieu.

2.3. Résultats des essais et conclusion

Deux matériaux adhésifs utilisés en génie civil dans le domaine du renforcement par matériaux composite ont été plus précisément étudiés : l'Etancol 492, et la Sikadur 330. Ils ont tous deux un comportement élastique fragile avant d'avoir été soumis au vieillissement, et sont tous deux des résines époxy bi-composants. Un adhésif industriel a également été étudié : la DP460. Pour ce dernier, le comportement déterminé est de type élasto-plastique, et les résultats donnés correspondent donc à la limite d'élasticité. Les cylindres et les haltères d'essais ont été réalisés en utilisant des moules en silicone. Les essais ont été effectués 48h après le début de polymérisation. Les résultats des essais sont rassemblés dans le diagramme de la figure 4 et illustrés de deux manières différentes : pour clarifier ces illustrations, à gauche, les trois différents essais menés ont

été matérialisés ; à droite, les trois enveloppes de rupture ou de limite élastique ont été identifiées.

On remarque que les enveloppes de rupture ou de plasticité sont loin d'être horizontales, et que la dépendance de la capacité des adhésifs considérés par rapport à la pression hydrostatique est importante. Le critère de rupture ou de plasticité des matériaux adhésifs est donc plus proche d'un critère de type Drucker Prager. Cela signifie que si la présence d'arrachement (contrainte de pression hydrostatique négative) est en effet néfaste au joint collé, puisqu'il tend à diminuer les capacités de l'adhésif en cisaillement ; la présence de compression, elle, est bénéfique, et tend à augmenter la capacité en cisaillement de l'adhésif en question. Ceci a été également mis en relief dans le cas du collage béton/acier dans (Si Larbi *et al.*, 2009). Cette observation nous a convaincu de travailler sur un joint dont la géométrie créerait de manière naturelle ces efforts de compression en bout de joint, à savoir le joint « courbe ». Bien entendu, il existe d'autres moyens de conférer une contrainte de compression à un joint collé comme un système de frettage par exemple. La différence entre un système de frettage et l'utilisation d'un joint courbe

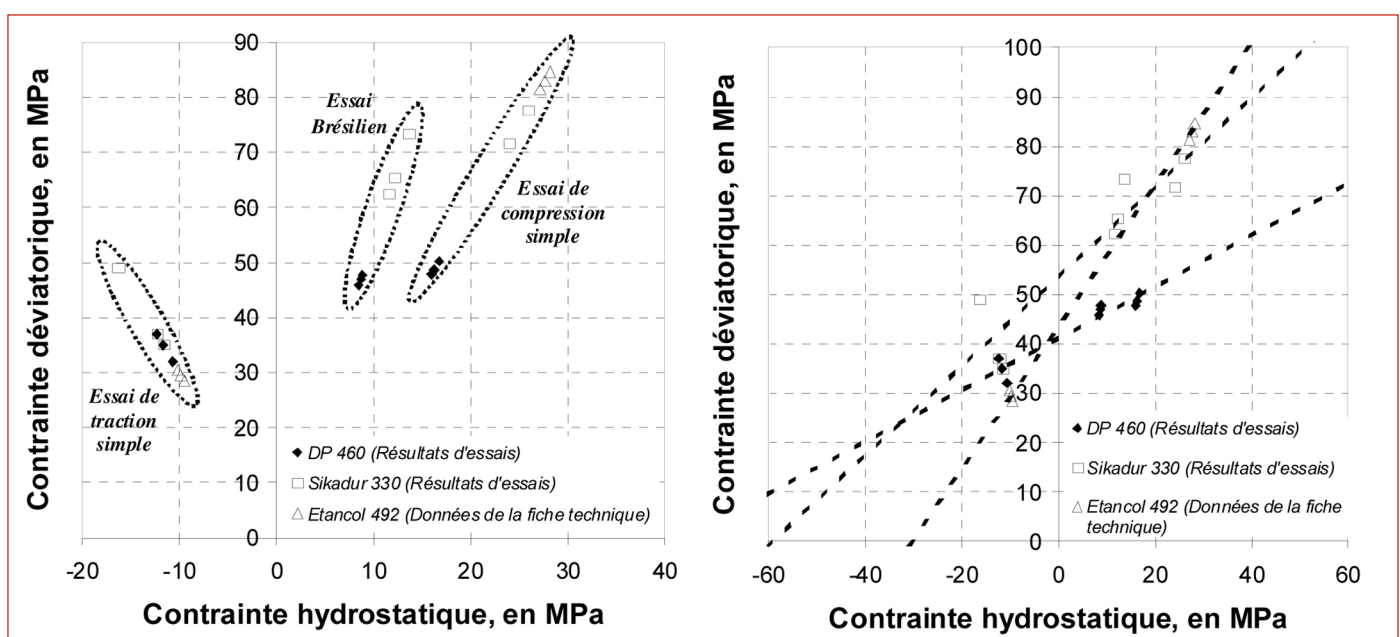


Figure 4 : Résultats des essais dans le diagramme Contrainte de Von Mises/Pression hydrostatique et illustration des résultats des trois essais menés à gauche, des enveloppes de rupture ou de limite élastique à droite.

réside dans l'évolution ou non de l'effort de compression. Dans le cas, d'un système de frettage, celui-ci est constant et déterminé par le serrage initial. Dans le cas du joint courbe, celui-ci évolue avec l'effort appliqué.

Pour la suite de l'étude menée, nous avons adopté un critère de plasticité de type Drucker-Prager linéaire pour l'adhésif DP460. Il existe d'autres versions de ce critère (hyperbolique ou exponentiel) qui permettent d'obtenir des enveloppes plus proches des enveloppes réelles. Celles-ci ont été étudiées dans (Thibon, 2008) et pourraient constituer une des perspectives de travail concernant la caractérisation de l'adhésif. On notera que le comportement pris en compte est un comportement non vieilli, et qu'il conviendrait de vérifier que le vieillissement de la résine organique ne modifie pas de manière trop significative les critères de rupture ou de plasticité considérés.

3. DÉVELOPPEMENTS THÉORIQUES SUR LE TRANSFERT DES EFFORTS PAR UN JOINT COURBE

Dans un premier temps, quelques analyses théoriques seront présentées. Deux principales méthodes ont été suivies et permettent d'obtenir des résultats intéressants. La première relève de la mécanique linéaire classique qui permet de s'intéresser aux champs de contrainte dans le joint collé. On notera que deux champs de contrainte nous ont particulièrement intéressés : le champ de cisaillement hors plan, et le champ d'arrachement dans le joint de colle. La seconde relève de la mécanique linéaire de la rupture, et repose sur un équilibre énergétique. Elle permet d'étudier le comportement des fissures au sein des structures, et la facilité qu'elles ont à se propager. Ces deux approches sont complémentaires, puisque la première permet d'étudier l'influence de la géométrie sur les champs de contrainte, et donc sur la capacité du joint collé au vu des observations faites dans la partie précédente. La seconde permet de s'intéresser au comportement en fatigue du joint réalisé.

3.1. Analyse des contraintes

Deux modèles ont été utilisés pour déterminer les champs de cisaillement et d'arrachement existant dans le joint de colle pour le cas du joint à simple recouvrement, et le cas du joint « courbe » : un modèle analytique développé dans (Chataigner, 2008b), et un modèle numérique basé sur un code aux éléments finis. Nous ne présenterons ici que les résultats de ce second modèle, en se penchant sur les différences induites par la courbure en ce qui concerne les deux champs de contrainte étudiés et l'influence de la valeur du rayon de courbure.

Le modèle éléments finis a été effectué en utilisant le code commercial Abaqus, et repose sur une hypothèse de déformations planes. Les éléments utilisés sont des éléments linéaires quadrilatéraux non réduits. On notera que la présence aux extrémités du joint de colle de sauts du module conduit à des phénomènes de singularités. Les valeurs extrémales des champs de contrainte au bord sont donc dépendantes du maillage, et il faut considérer ces valeurs avec précaution. La densité du maillage choisie dans notre étude permet d'obtenir quatre éléments carrés dans l'épaisseur de la couche de colle. La géométrie ainsi que le maillage sont donnés en figure 5. Une couche de matériau composite d'épaisseur 1,2 mm repose sur une couche de matériau adhésif d'épaisseur 0,25 mm. Le troisième adhérent (de l'acier dans le cas des essais réalisés) n'est pas modélisé ; il est supposé infiniment rigide par rapport à l'assemblage.

Deux contraintes dans le joint collé sont étudiées : le cisaillement et l'arrachement. On notera que le frettage aura une incidence sur l'arrachement. Il convient de comparer les résultats entre un joint courbe et un joint plan pour étudier l'influence de la géométrie sur ces deux composantes. Deux comportements d'adhésifs ont été étudiés : un comportement élastique fragile dont les résultats sont donnés en figure 6 et un comportement élasto-plastique de type Drucker-Prager conformément aux conclusions de la première partie dont les résultats sont donnés en figure 7.

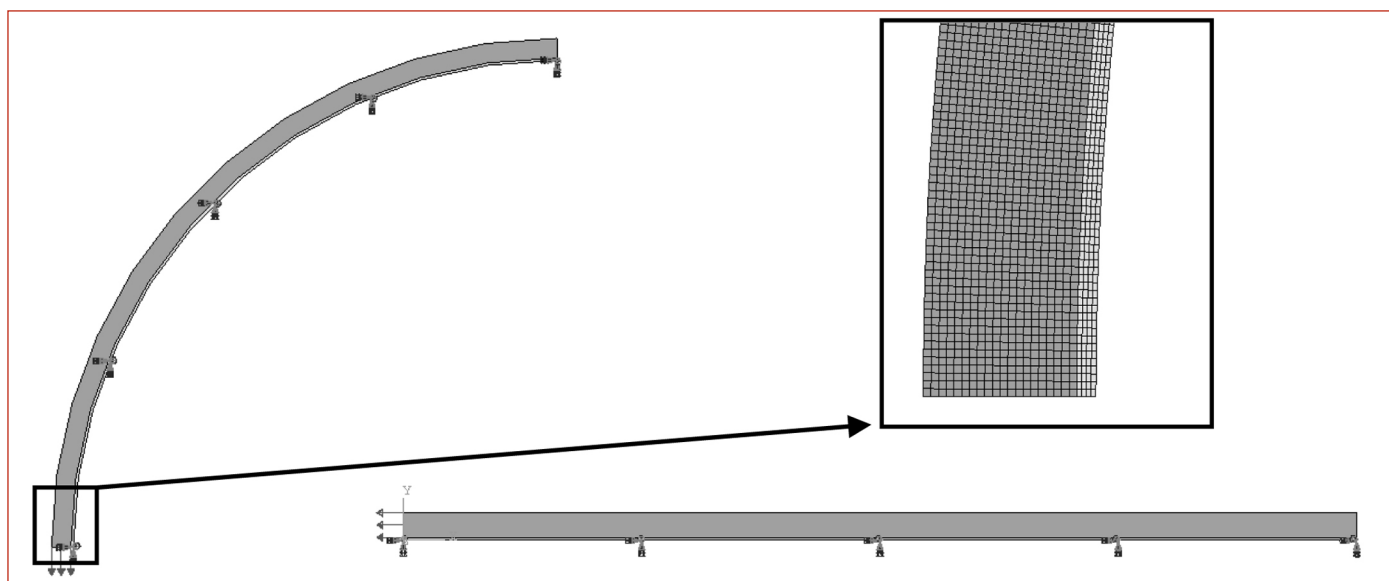


Figure 5 : Géométrie et détail du maillage du modèle en éléments finis.

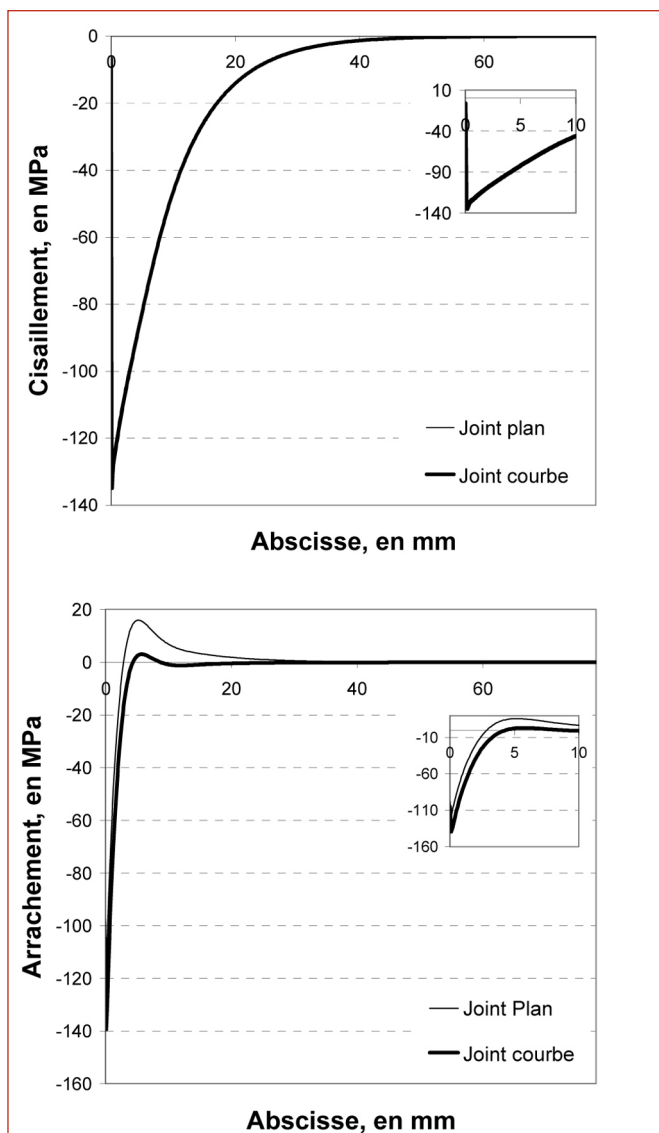


Figure 6 : Comparaison des contraintes de cisaillement et d'arrachement entre joint plan et joint courbe pour un même effort appliqué et pour un adhésif élastique.

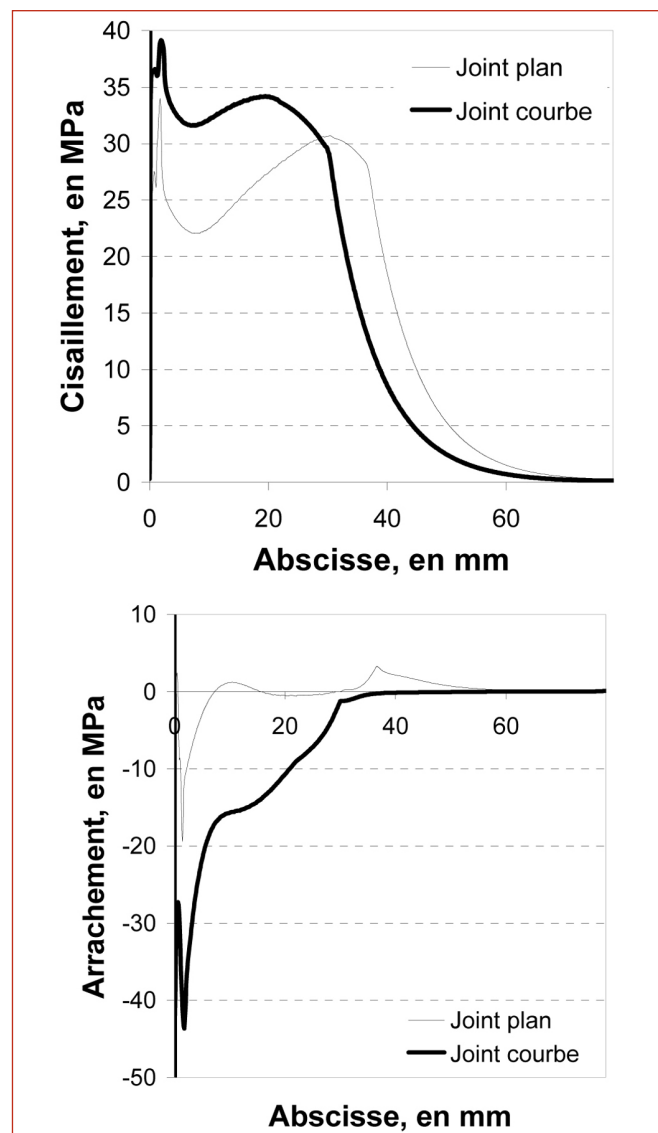


Figure 7 : Comparaison des contraintes de cisaillement et d'arrachement entre joint plan et joint courbe pour un même effort appliqué et pour un adhésif élastoplastique.

Dans le cas d'un adhésif à comportement élastique fragile (Figure 6), on constate que la courbure a peu d'incidence sur le profil de la contrainte de cisaillement. Les phénomènes de transfert sont bien associés à une longueur caractéristique qui est dans notre cas de l'ordre de 40 mm et qui est plus connue sous le nom de longueur d'ancrage. En revanche, la courbure affecte fortement la contrainte d'arrachement puisqu'elle permet d'augmenter la contrainte de compression en bout de joint, et surtout, élimine quasiment toute contrainte de traction présente en milieu de joint. Une étude de l'influence du rayon de courbure a également été menée, et bien qu'elle ne soit pas décrite ici, on retiendra que plus le rayon de courbure est faible, plus la contrainte de compression est importante. Ceci est compréhensible d'un point de vue physique, et permet en s'appuyant sur l'étude de l'influence de la contrainte hydrostatique effectuée précédemment, d'affirmer que la capacité du joint courbe doit être plus importante que celle du joint plan. Dans le cas d'un adhésif élastoplastique (Figure 7), en ce qui concerne le cisaillement, la courbure permet bien d'augmenter la valeur du palier de cisaillement en augmentant la

contrainte de compression en bout de joint. La limite de plasticité est atteinte plus tardivement pour le joint courbe, et la longueur sur laquelle l'adhésif plastifie est alors moins importante. Si on s'appuie sur un critère de rupture en terme de longueur plastique comme exprimé dans (Chataigner *et al.*, 2009), on obtient un joint collé ayant une capacité plus importante. Cette hypothèse reste cependant à vérifier. Dans les deux cas, la courbure permet donc d'augmenter la capacité du joint collé en conférant à l'assemblage une contrainte de compression additionnelle en bout de joint. Il est important de retenir que c'est la dépendance de l'adhésif à la contrainte hydrostatique qui entraîne ensuite une augmentation de la capacité du joint collé avec l'augmentation de cette compression. En outre, on retiendra que les phénomènes de transfert en cisaillement dans le cas d'un adhésif élastique fragile sont peu affectés, et que le paramètre longueur d'ancrage utile pour les phases de conception reste par conséquent identique. On vérifie que dans le cas d'un adhésif élasto-plastique, la valeur de cette longueur d'ancrage augmente considérablement comme remarqué dans (Chataigner, 2008b).

3.2. Influence de la pression hydrostatique sur la propagation d'une fissure éventuelle

La mécanique linéaire de la rupture s'intéresse à l'équilibre global en énergie du système. En se basant sur le calcul de la raideur de joints collés ayant des longueurs fissurées différentes (Figure 8), on peut déterminer un taux de restitution d'énergie qui représente la puissance mécanique disponible pour ouvrir une fissure (Griffith, 1920). Lorsque ce taux augmente en fonction de la longueur fissurée, la propagation n'est pas contrôlée puisqu'on accorde au système plus d'énergie que nécessaire. Lorsque celui-ci diminue, la propagation de la fissure est contrôlée. Les calculs sont effectués en utilisant le modèle en éléments finis présenté précédemment. La fissure est représentée par une zone de contact qui peut ou non avoir un comportement frottant.

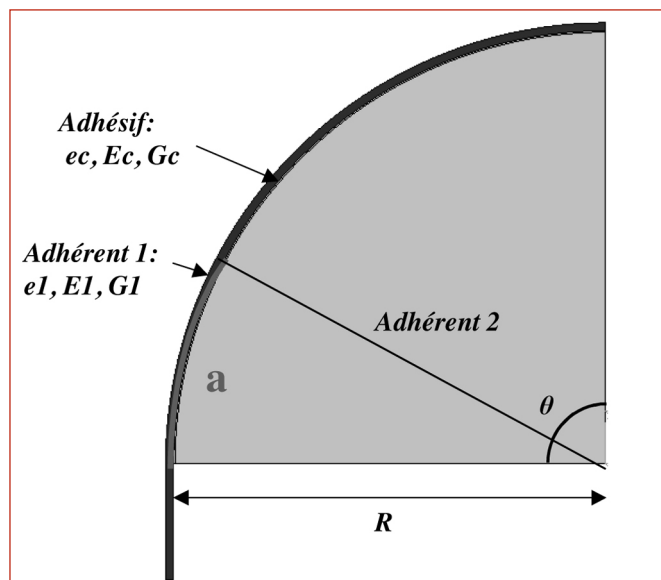


Figure 8 : Schéma du joint collé avec une longueur de fissure a .

Les résultats des calculs effectués sont donnés en figure 9. Chacun des points est déterminé à partir d'un calcul aux éléments finis. On remarque que dans tous les cas, lorsque le frottement n'est pas pris en compte, la propagation de la fissure n'est pas contrôlée. La géométrie dans ce cas n'a pas d'importance. En réalité, il existe forcément des phénomènes de frottement au niveau de la fissure. Si ceux-ci sont pris en considération, on observe une stabilisation de la fissure dans le cas du joint courbe. Pour illustrer clairement notre propos, un coefficient de frottement important de 0,9 a été pris en compte (ceci augmente l'amplitude des phénomènes observés, notamment en ce qui concerne la pente de la partie décroissante de la caractéristique en figure 9). Celui-ci est plus faible en réalité (de l'ordre de 0,4), mais les observations qualitatives restent identiques. La géométrie du joint courbe permet donc à la fois d'augmenter la capacité de l'assemblage collé, mais aussi de contrôler la propagation d'éventuelles fissures de fatigue, et donc d'améliorer à priori le comportement du joint à long terme.

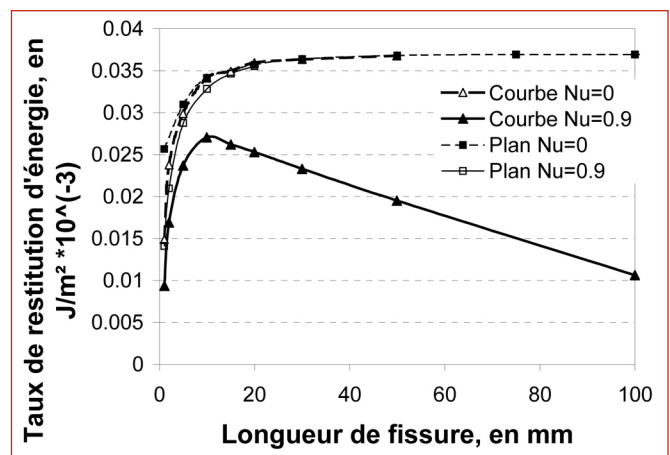


Figure 9 : Taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de la fissure pour les deux types de joints (plan et courbe) et sans frottement en fissure, ou avec un coefficient de frottement de 0,9.

4. INVESTIGATIONS EXPÉRIMENTALES

Afin de vérifier, ou d'infirmer nos attentes théoriques, des investigations expérimentales ont été réalisées à l'UR Navier. Des investigations supplémentaires sont en cours de réalisation sur ce sujet, mais les premiers résultats sont prometteurs.

4.1. Présentation des essais, et réalisation des éprouvettes

Trois géométries d'éprouvettes ont été réalisées avec la même longueur collée, et donc la même quantité de matériaux : un joint plan, un joint courbe, et un joint courbe avec surface de frottement. Cette surface de frottement permet de diminuer l'effort à transmettre par le joint collé. Les trois géométries sont représentées en figure 10. Dans tous les cas, l'adhérent support est un cylindre en acier dont la surface était abrasée et dégraissée à l'acétone avant collage, et la longueur de collage L_c est identique.

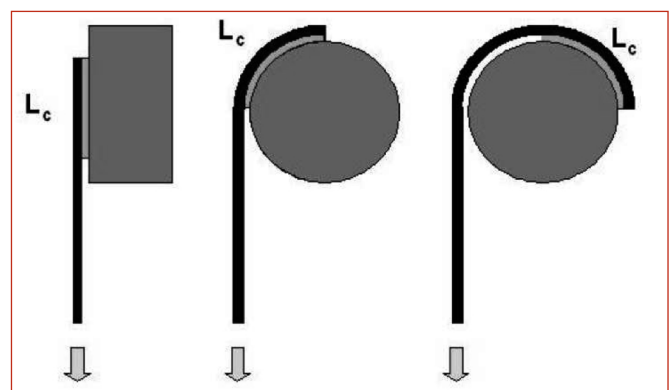


Figure 10 : Schéma des trois échantillons testés.

Différents adhérents et adhésifs ont été testés pour cette première série d'essais. En ce qui concerne les adhérents, deux systèmes composites ont été appliqués : un système de type plat uni-directionnel à fibres de carbone (Module longitudinal de 120 Mpa), et un système de type tissu car-

bone couramment utilisé dans le domaine du renforcement de structures de génie civil.

Le plat uni-directionnel a été réalisé à partir de plis pré-imprégnés de résine époxy polymérisant à chaud sous pression. La réalisation de ceux-ci a été constituée de plusieurs étapes : empilement des plis pré-imprégnés sur une surface courbe comportant les différentes strates utiles pour la cuisson sous vide du tout (Figure 11), cuisson sous vide du plat UD ayant une forme courbe, double encollage et application du plat sur l'adhérents acier. Un temps de polymérisation de l'adhésif de 48h est ensuite respecté avant essai. Cette technique de réalisation de l'adhérent a été utilisée car elle permet de conférer à celui-ci la courbure du joint avant encollage.

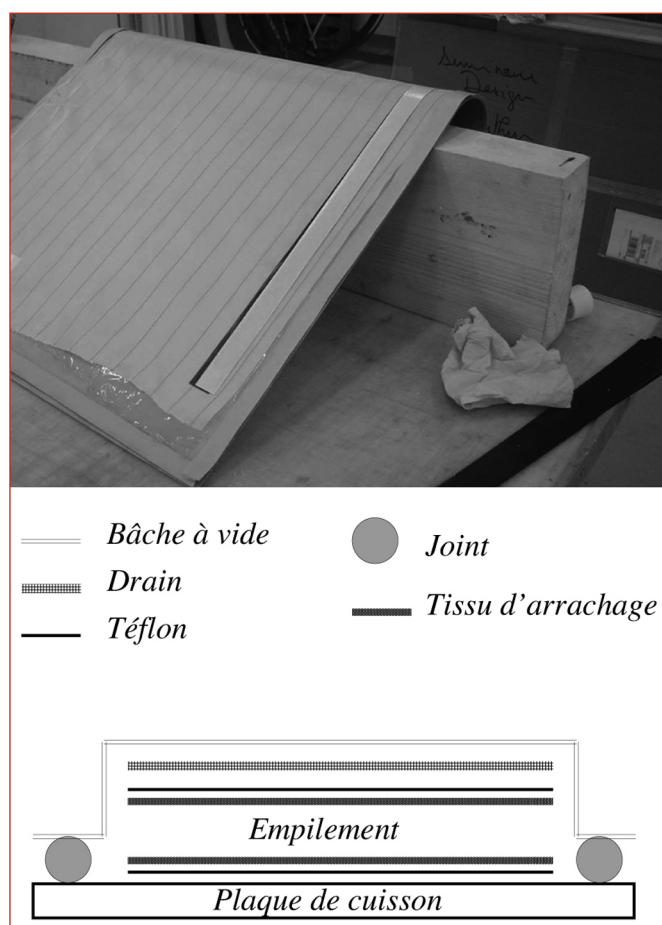


Figure 11 : Photo de la réalisation des empilements composites, et schéma du système de leur mise en cuisson.

Le second système composite utilisé est un tissu carbone imprégné de résine bi-composant polymérisant à froid. Après avoir imprégné le tissu, et encollé le support acier, le tissu est appliqué sur la surface acier. Le tout est ensuite laissé pendant 48h en polymérisation. De nouveau, dans ce cas, le type de procédé utilisé permet d'adopter facilement la courbure du joint collé. Dans le cas, où on souhaiterait utiliser d'autres types d'adhérents, comme des éléments linéaires pultrudés (les pultrudés sont des éléments composites fabriqués par le processus de pultrusion qui est aujourd'hui un des processus industriel qui permet de réaliser de grands éléments à fibre longue ayant une raideur relativement importante supérieure à 160 Gpa en général),

la question de la mise en œuvre de la courbure se pose et il s'agit d'une des pistes de perspectives à ce travail. En particulier, les deux résines étudiées sont une résine élastique fragile, la sikadur 330, appliquée pour les deux systèmes composites ; et une résine élastoplastique industrielle, la DP460 appliquée pour le plat uni-directionnel à fibres carbone seulement. Des photos des échantillons sont données en figure 12.



Figure 12 : Photo des joints collés réalisés avec empilements d'UD pré-imprégné avec une résine polymérisant à chaud à gauche, et tissu imprégné de résine polymérisant à froid à droite.

4.2. Résultats des investigations expérimentales

Un dispositif spécifique d'essai a été conçu à l'UR Navier. Celui-ci est présenté en figure 13 et permet de tester des assemblages courbes et plans en assurant un alignement de l'adhérent composite avec l'axe de la machine de traction utilisée. La capacité de la machine de traction est de 100 kN. L'essai est piloté en déplacement à vitesse de traverse constante.

Deux types de ruptures différentes ont été observés : une rupture cohésive dans l'adhésif (lieu de rupture dans le joint de colle), ou une rupture du renfort en traction. On notera également que l'observation après essai des surfaces d'acier dans la zone de frottement permet de relever un marquage conséquent de la surface, indiquant qu'il est important de le prendre en compte d'un point de vue théo-

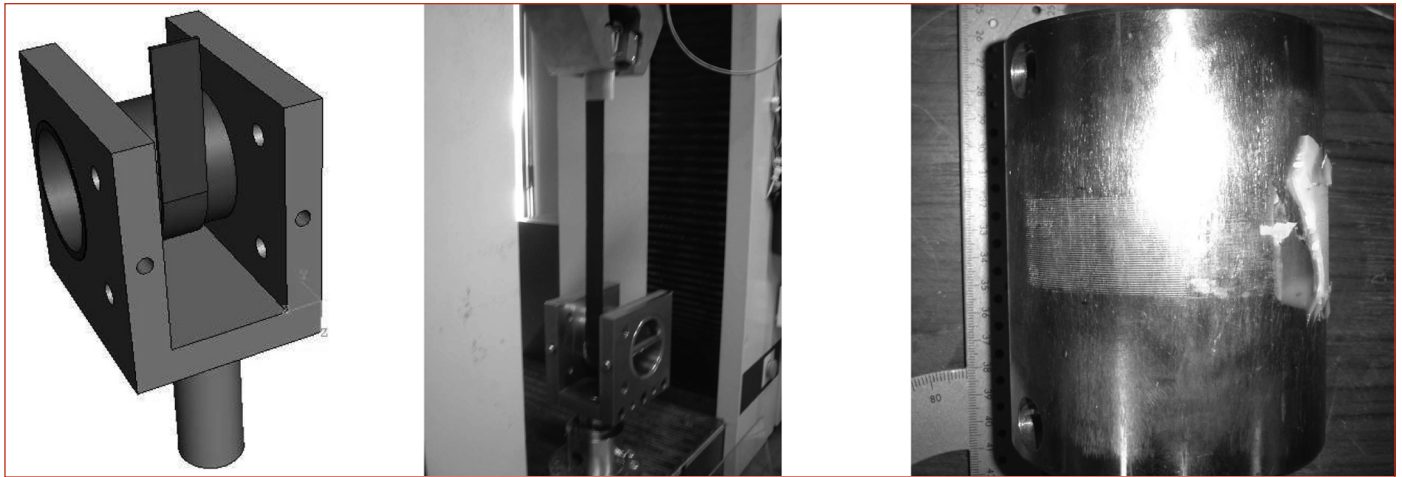


Figure 13 : De gauche à droite : Schéma du dispositif d'essai, photo d'un essai, photo d'une éprouvette après rupture montrant le marquage de l'acier dans la zone de frottement.

rique. Les résultats des investigations pour chacun des échantillons en terme de mode de rupture, et de capacité sont donnés dans le tableau 2.

On remarque dans tous les cas une augmentation de la capacité de l'assemblage avec l'utilisation du joint courbe. Pour le cas du plat carbone collé avec une colle ductile, cette augmentation est conséquente, et montre l'intérêt d'une zone de frottement en entrée de joint. Il reste cependant à vérifier que dans le cas de sollicitations cycliques de type fatigue, les phénomènes de frottement ne sont pas trop dégradés. Pour le cas du plat collé avec une colle élastique fragile, l'augmentation de capacité est très importante et elle mène à une modification du mode de rupture qui passe de cohésif dans la résine à un mode de rupture en traction de l'adhérent. Cette modification du mode de rupture est matérialisée par des parenthèses dans la colonne « Augmentation par rapport au joint plan » du tableau 2 puisque cette augmentation sous-estime la capacité réelle du joint collé. De nouveaux essais doivent être réalisés en modifiant la géométrie pour obtenir un mode de rupture dans le joint de colle et non dans le renfort. Dans le cas du tissu collé avec une résine élastique fragile, le mode de rupture est lui aussi modifié : de cohésif dans la résine, à un mode en traction de l'adhérent composite. On observe une légère augmentation de la capacité de l'assemblage

qui, de nouveau, est une borne inférieure de l'augmentation de capacité du joint de colle.

4.3. Interprétation des résultats

Pour le cas du plat collé avec une résine élastoplastique, l'augmentation de la capacité vient de l'augmentation de la limite de plasticité due à la présence dans le cas du joint courbe d'une pression hydrostatique. Ainsi, de manière schématique et si on adopte un critère de rupture, en terme de longueur plastique critique comme effectué dans (Chataigner *et al.*, 2009), on peut visualiser l'augmentation de l'effort par l'augmentation de l'aire sous la courbe de cisaillement pour une même longueur plastifiée. Ceci est représenté de manière schématique en figure 14. Comme on peut le voir, dans le cas où la dépendance par rapport à la pression hydrostatique est faible (critère de Von Mises), ou encore dans le cas où la pression hydrostatique est faible (cas du joint plan), on obtient un plateau horizontal en terme de contrainte de cisaillement. La prise en compte de la pression hydrostatique qui est importante dans le joint courbe permet d'augmenter la limite de cisaillement linéairement (cas du critère linéaire de Drucker Prager), et ainsi d'augmenter pour une même longueur plastique l'aire sous la courbe de cisaillement, donc l'effort transmis par le joint

| Procédé | Adhésif | Configuration | Lieu de rupture | Capacité en Mpa | Écart-type en % | Augmentation par rapport au joint plan |
|---------------|---------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------|-----------------|--|
| Plat carbone | DP 460 (Ductile) | Plan | Joint de colle | 641 | 13 | — |
| | | Courbe | Joint de colle | 785 | 23 | 22 % |
| | | Courbe et frottement | Joint de colle | 1 167 | 4 | 82 % |
| Plat carbone | Sikadur 330 (Élastique fragile) | Plan | Joint de colle | 656 | 13 | — |
| | | Courbe | Renfort en traction | 2 242 | 5 | (242 %) |
| | | Courbe et frottement | Renfort en traction | 1 935 | 8 | (195 %) |
| Tissu carbone | Sikadur 330 (Élastique fragile) | Plan | Joint de colle | 283 | 25 | — |
| | | Courbe | Renfort en traction | 349 | 6 | (23 %) |
| | | Courbe et frottement | Renfort en traction | 374 | 6 | (32 %) |

Tableau 2 : Résultats des essais sur joints plans et joints courbes.

collé (cette aire est hachurée en figure 14). Ceci est vérifié expérimentalement, et l'augmentation de l'ordre de 22 % paraît cohérente avec les données expérimentales relevées lors de la caractérisation de l'adhésif DP460.

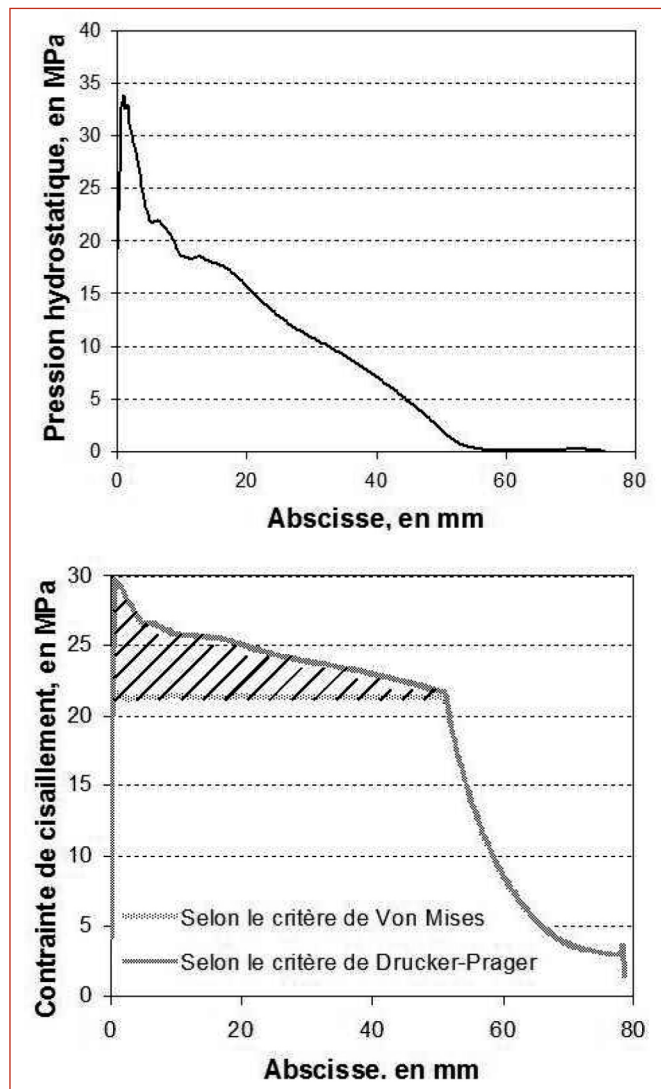


Figure 14 : Visualisation de l'influence de la pression hydrostatique (en haut) sur le profil de cisaillement dans le cas d'un critère de Drucker-Prager et de Von Mises.

Dans le cas du joint collé avec la résine élastoplastique DP460 présentant une longueur de frottement, l'augmentation de capacité supplémentaire vient des phénomènes de frottement. On peut calculer à partir de l'augmentation de capacité constatée, de la longueur de frottement, et en considérant que les phénomènes sont uniformes, un coefficient de frottement moyen de la surface acier en contact avec le renfort composite. Ceci est davantage développé dans (Chataigner, 2008b) et repose sur le principe de l'effet courroie. Celui-ci vaut dans le cas de notre étude environ 0,45. Ce coefficient de frottement est un coefficient usuel, et on vérifie donc que ce phénomène peut permettre d'expliquer l'augmentation observée. La question de l'évolution de ce coefficient de frottement doit être approfondie pour pouvoir se pencher sur le comportement à long terme du joint collé. Mais, on notera que ceci constitue une piste intéressante d'augmentation de la capacité de l'ancrage réalisé.

Pour le cas du tissu et du plat collés avec une résine élastique fragile, on constate une augmentation de la capacité du joint collé, mais aussi et surtout une modification du mode de rupture. On constate en effet des ruptures cohésives dans l'adhésif pour les joints plans, puis des ruptures en traction du renfort pour les joints courbes. Les valeurs expérimentales de capacité des joints courbes constituent donc des valeurs minimales et doivent être prises en compte comme des bornes inférieures. On relèvera toutefois que dans le cas du plat collé avec la résine élastique fragile la capacité du joint collé est multipliée par un facteur trois indiquant un fort potentiel de la géométrie courbe. Des investigations supplémentaires sont en cours sur ce sujet, mais il est évident que la dépendance du comportement de l'adhésif par rapport à la pression hydrostatique seule ne peut pas expliquer l'augmentation de capacité constatée. Les réponses résident certainement davantage dans le contrôle de la propagation de la fissure permis par la géométrie du joint courbe, et peut-être par la création au cours de l'essai d'une surface de frottement après le début de la fissuration du joint collé.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude a vocation à présenter les investigations réalisées sur une nouvelle géométrie d'ancrage par collage de haubans plats. Bien entendu, l'étude portant sur l'influence de la géométrie sur les joints collés, elle peut être utilisée pour toute autre application impliquant l'utilisation du collage structural, que ce soit pour le renforcement ou la réparation de structures du génie civil, ou la réalisation de nouvelles structures.

La première étape a consisté à caractériser plus précisément le comportement de différents adhésifs pour étudier leur dépendance vis à vis de la pression hydrostatique. Un adhésif élastoplastique, et deux adhésifs élastiques fragiles ont été étudiés, et via l'utilisation de trois différentes configurations d'essais sur adhésif à l'état massif, pour chacun, l'enveloppe de limite de plasticité ou le domaine de rupture ont pu être identifiés partiellement. On remarque clairement que la pression hydrostatique a un rôle conséquent sur les propriétés des adhésifs et qu'il convient donc d'adopter un critère en conséquence. Dans cette étude, on adopte le choix du critère de Drucker Prager de type linéaire pour effectuer ensuite des investigations sur différentes géométries de joints collés.

La seconde étape porte sur la modélisation mécanique de deux types d'assemblages collés : le classique joint plan, et une nouvelle géométrie, le joint courbe, inspiré par les remarques effectuées sur la dépendance de l'adhésif vis à vis de la pression hydrostatique. Après avoir étudié les champs de contrainte en utilisant une modélisation surfacique en éléments finis, l'attention est portée sur une étude du taux de restitution d'énergie des assemblages. L'étude des champs de contrainte met en relief l'absence d'influence de la géométrie du joint sur le transfert des efforts en cisaillement, et l'augmentation conséquente de la contrainte de compression (donc de la contrainte de pression hydrostatique) en extrémité de joint. L'étude utilisant

les concepts de la mécanique de la rupture permet quant à elle de montrer que la géométrie courbe permet de stabiliser la propagation de la fissure, et donc d'obtenir théoriquement de meilleures performances en fatigue.

La troisième étape a consisté à vérifier certaines des attentes théoriques via des investigations expérimentales sur le joint courbe. Elle nous a permis de vérifier pour le cas de l'adhésif élastoplastique l'augmentation de capacité, et a mis en relief l'importance du phénomène de frottement sur la capacité de l'assemblage. Dans le cas de l'adhésif élastique fragile, des investigations supplémentaires sont nécessaires, mais une augmentation très significative de la capacité portante de l'assemblage a pu être démontrée (multipliée par trois dans le meilleur des cas et correspondant de plus à une rupture dans le renfort et non une rupture dans le joint de colle). On retiendra que dans ce cas, la dépendance des capacités de l'adhésif vis à vis de la pression hydrostatique ne permet pas d'expliquer, seule, l'augmentation observée. Il sera nécessaire pour les investigations futures de porter l'attention sur les phénomènes de fissuration.

Un brevet a été déposé sur la géométrie courbe qui semble offrir des perspectives intéressantes. Bien que l'application envisagée ici ait été l'ancrage d'un hauban de passerelle, d'autres perspectives d'utilisation peuvent être envisagées. Des études additionnelles portant sur le comportement de l'assemblage en fatigue sont en cours et devraient permettre de pouvoir répondre à certaines des questions soulevées dans cette étude. On en retiendra les principales qui portent sur la définition des domaines de résistance ou de plasticité des adhésifs et leur évolution dans le temps, le contrôle de la fissuration dans le cas de la géométrie courbe, les questions associées à la tribologie des surfaces présentes, et l'influence d'éventuels traitements. Outre la question de fatigue de l'assemblage, des études portant sur le vieillissement des résines époxy sont en cours au LCPC et au LRPC d'Autun (Benzarti, 2008). Ceci permettra d'obtenir davantage d'informations sur l'évolution des structures collées dans le temps et sur la durée de vie de ce type d'assemblage.

6. BIBLIOGRAPHIE

[1] **Benzarti K., Quiertant M., Aubagnac C., Chataigner S., Nishizaki I., Kato Y.** Durability of CFRP-strengthened concrete structures under accelerated or environmental ageing conditions, Second International Conference on Concrete Repair,

Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2008, Cape Town, South Africa, pp. 24-26, 2008.

- [2] **Caron J.F., Julich S., Baverel O.** "Self-stressed bowstring footbridge in FRP", *Composite Structures*, In Press, 2008.
- [3] **Chataigner S., Caron J.F., Quiertant M., Benzarti K., Aubagnac C.** "Characterization of composite-to-concrete interface: use of the cohesive zone approach", *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE*, 2008a.
- [4] **Chataigner S.** *Conception et dimensionnement d'un ancrage de hauban plat en matériaux composites*, Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 2008b.
- [5] **Chataigner S., Caron J.F., Diaz Diaz A., Aubagnac C., Benzarti K.** "Non linear failure criteria for a double lap bonded joint", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Under Review, 2009.
- [6] **Griffith A.A.** *The phenomena of rupture and flow in solids*, Philosophical transactions Royal Society of London, A221: 163-198, 1920.
- [7] **Hamelin P.** *Réparation et renforcement des structures au moyen des matériaux composites : Recommandations provisoires*, Techniques de l'Ingénieur, AM5615, 2002.
- [8] **Limam O., Foret G., Ehrlacher A.** "RC two-way slabs strengthened with CFRP strips: experimental study and a limit analysis approach", *Composite Structures*, Vol. 60, pp.467-471, 2003.
- [9] **LCPC.** *Renforcement des ouvrages en béton : bilan de deux opérations de recherche du LCPC*, OAS4, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 2006.
- [10] **Pham H.S.** *Optimisation de la connexion et comportement en fatigue de la connexion bois-BFUP pour de nouveaux ponts mixtes*, Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 2007.
- [11] **Si Larbi A., Ferrier E., Hamelin P.** Concrete to steel lap joint failure criteria under combined shear and peeling stress, *Journal of constructional steel research*, Vol. 65, Issue 2, pp. 386-394, 2009.
- [12] **Thibon A.** *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, École Nationale des Ponts et Chaussées, 2008.
- [13] **Wang W.** *Towards an improved understanding of strength and anisotropy of cold compacted powder*, Thèse de doctorat, Drexel University, 2007.