

Durabilité de connecteurs collés soumis à des sollicitations de fluage pour des applications sur sous-marins

Marthe Loiseau^{1,2}

¹ ENSTA Bretagne, Institut de recherche Dupuy de Lôme (IRDL), UMR CNRS 6027, 29200 Brest

² MAST-SMC, Université Gustave Eiffel, Campus de Nantes, 44344, Bouguenais

RESUME Cold Pad est une PME spécialisée dans le collage structural en milieu offshore qui a développé une solution de connecteur collé permettant de créer de nouveaux points d'ancrage sur une structure. Etant donnée l'utilisation des connecteurs collés, le fluage semble être le phénomène principal à prendre en compte, en termes de durabilité pour leur conception. L'objectif de cette thèse est de comprendre la phénoménologie du fluage et de déterminer un modèle de fluage indépendant de la géométrie des connecteurs afin de proposer des outils de conception vis-à-vis du fluage. L'étude en fluage est réalisée à deux échelles d'assemblages : celle du joint mince et celle de la structure. Pour analyser le comportement en joints minces en fluage, un bâti de fluage a été développé. Des essais de fluage ont donc été effectués à plusieurs niveaux de chargement et de températures. En amont de la thèse, une campagne d'essais de fluage sur connecteurs collés a été réalisée également à plusieurs niveaux de chargement et de températures. Les résultats de ces deux échelles d'investigations sont ensuite comparés pour choisir la plus pertinente vis-à-vis de l'application industrielle.

Mots-clefs Assemblages collés, essai Arcan, fluage, investigations expérimentales

I. INTRODUCTION

Un grand nombre de structures métalliques doit avoir une durée de vie supérieure à 20 ans. Ces structures nécessitent régulièrement des travaux visant à adapter leurs capacités ou fonctions à de nouvelles contraintes ou à les renforcer, voire réparer, pour augmenter leur durée de vie. Pour réaliser ces travaux, ce sont principalement le soudage et le rivetage qui sont utilisés. Cependant, ces techniques présentent plusieurs inconvénients, comme la création de concentration de contrainte au niveau de l'assemblage, l'endommagement de la structure, et la création de points chauds, qui induit un risque d'explosion, en particulier pour les activités offshore en milieu ATEX (Atmosphère Explosive).

Pour pallier ces problèmes, Cold Pad, PME spécialisée dans le collage structural en milieu offshore, a développé une solution de connecteurs collés, appelé C-ClawTM (Figure 1), qui permet de créer de nouveaux points d'ancrage sur une structure existante (Figure 3). Un outil d'installation, appelé C-Hawk (Figure 2), a également été conçu, afin de contrôler les paramètres

atmosphériques tels que la température, l'humidité et la pression appliquée pendant la mise en œuvre du collage. Cela permet de fiabiliser la méthode d'assemblage par collage en assurant un contrôle et une reproductibilité de la mise en œuvre. De plus, la géométrie du C-Claw™ est optimisée afin de limiter les effets de bord en induisant une épaisseur d'adhésif non uniforme le long du connecteur. D'autre part, l'adhésif est protégé vis-à-vis de l'environnement, comme l'humidité, grâce à un joint sous compression permanente localisé à la périphérie de l'interface adhésive (Court, 2017).

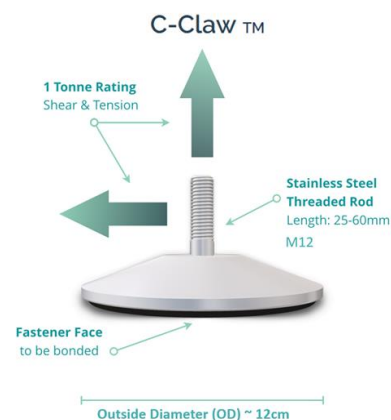


FIGURE 1. C-Claw™, Connecteur collé

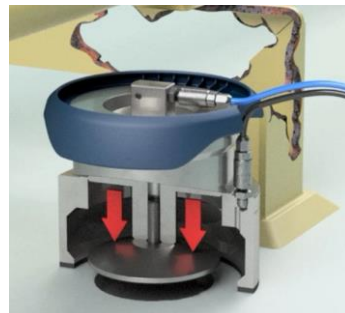


FIGURE 2. C-Hawk, outil d'installation



FIGURE 3. Exemple d'utilisation d'un connecteur collé

Etant donnée l'utilisation des connecteurs collés, le fluage semble être le phénomène principal à prendre en compte, en termes de durabilité, pour la conception. Le fluage est défini comme la dépendance au temps de la déformation d'un matériau soumis à une sollicitation constante. Une courbe de fluage se divise généralement en trois stades. Le niveau de contrainte et la température sont les principaux facteurs influençant le fluage d'un matériau (Meyers and Chawla, 2008).

Le travail de cette thèse se focalise sur cet aspect. L'objectif est de comprendre la phénoménologie du fluage et de déterminer un modèle de fluage indépendant de la géométrie des connecteurs afin de proposer des outils de conception vis-à-vis du fluage. Cet article détaille l'analyse du comportement en fluage à deux échelles : celle de la structure et celle du joint mince. Les résultats présentés se concentrent sur les investigations effectuées en traction avec de l'Adekit A310-1 comme adhésif. Une étude analogue a également été réalisée en cisaillement.

II. IDENTIFICATION DU COMPORTEMENT EN FLUAGE D'UN ASSEMBLAGE COLLE A PARTIR D'INVESTIGATIONS EXPERIMENTALES A ECHELLE STRUCTURE

Afin d'appréhender le comportement en fluage de l'assemblage collé avec le connecteur, une campagne d'essais de fluage a été effectuée en amont de la thèse pendant deux ans. Ces essais ont été réalisés à l'échelle de la structure, c'est-à-dire sur des connecteurs.

A. Description du protocole expérimental

L'adhésif étudié est une méthacrylate, dont le module d'élasticité est d'environ 1500 MPa. Le protocole et les pièces utilisées pour les essais ont été développés par Cold Pad, de sorte à

représenter au mieux les conditions réelles d'utilisation des connecteurs. L'essai de fluage est réalisé avec le connecteur collé sur une plaque en acier de 350mmx350mm. La surface de la plaque et celle du connecteur sont préalablement préparées. Le collage est réalisé grâce au C-Hawk. Ensuite, une post-cuisson de 24 heures à 25°C est effectuée, conformément aux préconisations du fournisseur de l'adhésif. L'ensemble est lié à la machine de mise en charge par l'intermédiaire du bâti de traction (FIGURE 4). Les essais sont instrumentés à l'aide de trois capteurs LVDT, qui sont disposés perpendiculairement au plan de collage à 120° afin de vérifier la symétrie de la sollicitation et d'accéder aux déplacements locaux du connecteur (FIGURE 4). Les essais sont réalisés pour des sollicitations de 47% à 80% de la force à rupture, notée T_{ult} . Chaque essai a été répété trois fois, exceptés ceux à 47% et 50% de T_{ult} , à cause de leur temps à rupture trop important. Trois niveaux de température ont été testées : 20°C, 50°C et 70°C.

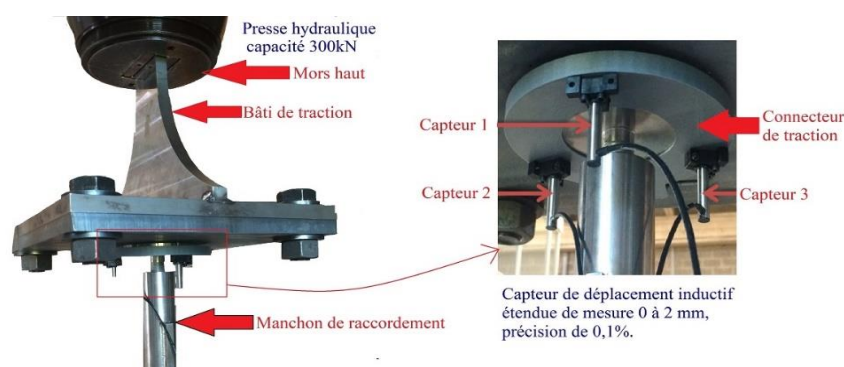


FIGURE 4. Dispositif expérimental pour la réalisation des essais de traction

B. Résultats des investigations expérimentales en fluage

TABLEAU 1. Temps à rupture pour les essais de fluage en traction sur connecteur

Température	Effort appliqué (T/T_{ult})	Temps à rupture			
		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
20°C	47%	22 jours			22 jours
	50%	38,5 jours	35,3 jours		36,9 jours
	60%	36h11	22h57	25h51	28h20
	70%	3h16	5h07	47 min	3h35
	80%	3 min	2.9 min	2 min	2.6 min
50°C	50%	14h13	8h37	27h57	16h52
70°C	30%	1h15	2h16	2h38	2h03

Les investigations de fluage ont tout d'abord permis d'évaluer la durée de l'assemblage sous chargement constant. Le TABLEAU 1 donne les temps à rupture des essais de fluage. Ces temps à rupture semblent être cohérents : le temps à rupture diminue lorsque le niveau d'effort ou la température augmente. De plus, la FIGURE 5 indique que le niveau de chargement appliqué dépend linéairement du logarithme du temps à rupture. Cette observation a déjà été mise en évidence dans d'autres publications (Sokairge et al., 2020; Spathis and Kontou, 2012). Il serait intéressant d'évaluer le temps à rupture pour d'autres niveaux de charge à haute température afin de vérifier si le coefficient de la droite est le même pour chaque température.

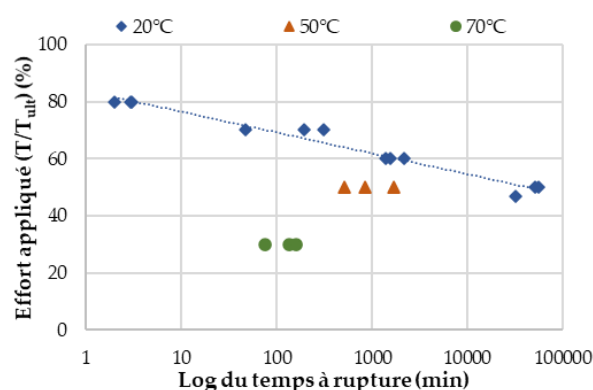


FIGURE 5. Courbe de l'effort de fluage en fonction du logarithme du temps à rupture pour les essais de traction sur connecteur

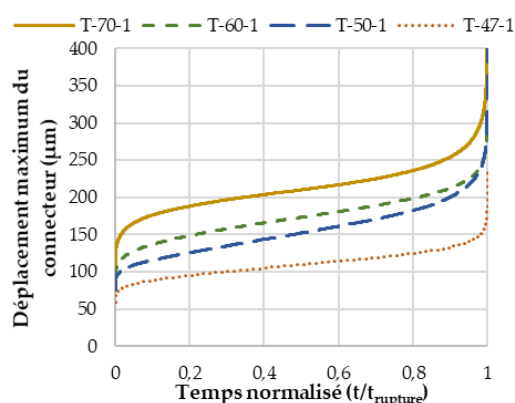


FIGURE 6. Déplacements expérimentaux en fonction du temps normalisé des essais de fluage en traction sur connecteur

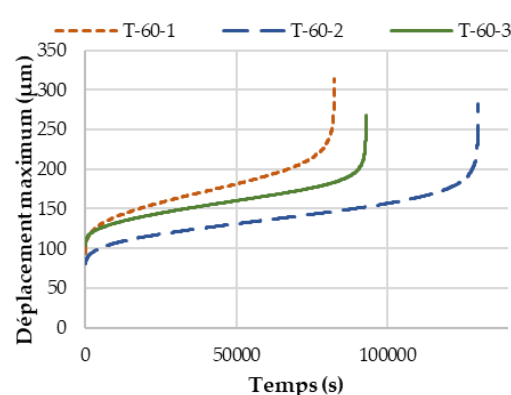


FIGURE 7. Déplacements expérimentaux issus des trois essais de fluage en traction à 60 % de T_{ult} sur connecteur

La **FIGURE 6** représente les déplacements maximaux du connecteur mesurés pendant les essais de fluage pour chaque niveau de chargement à 20°C. Ce graphique montre que le déplacement augmente avec le niveau de chargement. Les trois stades caractéristiques du fluage peuvent également être observés sur ces courbes. La **FIGURE 7** donne le déplacement moyen mesuré en fonction du temps pour les trois essais réalisés à 60 % de l'effort ultime. On notera qu'une dispersion importante des temps à rupture est observée.

III. DEVELOPPEMENT DE MOYENS D'ESSAIS POUR LA CARACTERISATION DU COMPORTEMENT EN FLUAGE DE JOINTS DE COLLE

A. Etat de l'art sur les méthodes expérimentales pour caractériser le comportement mécanique d'un assemblage collé

Un joint adhésif est caractérisé par ses dimensions : une épaisseur faible (quelques centaines de micromètres) par rapport à sa largeur et sa profondeur (Jouan and Constantinescu, 2018). Cette géométrie et la nature de l'adhésif (parfois hétérogène) (Arcan et al., 1978; Jouan and

Constantinescu, 2018) rendent difficile la mesure des propriétés mécaniques d'un assemblage collé. De plus, plus l'épaisseur est faible, plus l'interphase influe sur le comportement général de l'assemblage (Fischer and Pasquier, 1989; Jouan and Constantinescu, 2018). Ainsi, pour caractériser le comportement d'un assemblage collé, il est important de réaliser une étude expérimentale avec des éprouvettes d'épaisseur similaire à celle utilisée lors de l'application industrielle (Cognard et al., 2005; Fischer and Pasquier, 1989). Dans le cadre de cette thèse, c'est le dispositif Arcan qui a été choisi. Celui-ci présente plusieurs avantages : plusieurs types de sollicitations peuvent être appliqués à l'éprouvette avec un même bâti grâce aux différents trous présents sur l'éprouvette (Créac'hcadec et al., 2015), une géométrie spécifique en forme de becs est utilisée proche de la surface collée (Figure 3) afin d'obtenir une contrainte plus homogène dans l'adhésif par rapport à d'autres dispositifs (Cognard et al., 2005; Créac'hcadec et al., 2015).

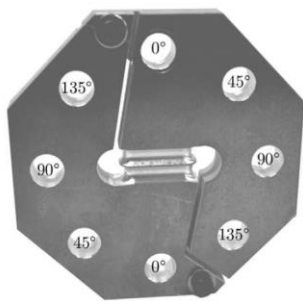


FIGURE 8. Schéma d'une éprouvette de type Arcan (Valès et al., 2017)

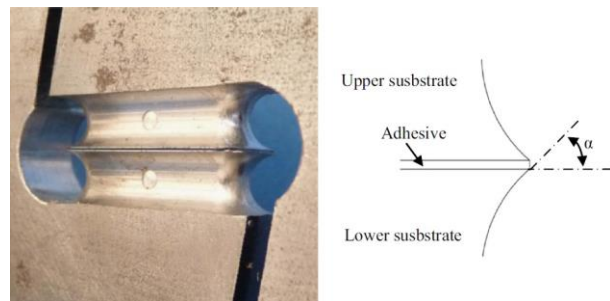


FIGURE 9. Becs au niveau des surfaces collées d'une éprouvette Arcan (Créac'hcadec et al., 2015)

B. Conception d'un banc d'essais de fluage adapté à l'essai Arcan

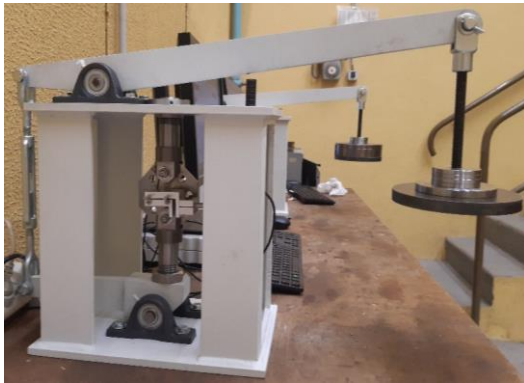


FIGURE 10. Bâti de fluage



FIGURE 11. Support capteurs adaptés aux éprouvettes Arcan

Afin de solliciter en fluage des éprouvettes de type Arcan, il a été nécessaire de concevoir un bâti de fluage adapté. Ce bâti est représenté sur la [FIGURE 10](#). Le chargement est appliqué par des masses posées sur le support. Leur poids est amplifié par deux bras de levier en série. La charge permet de solliciter une éprouvette qui se situe entre les deux chapes au centre du bâti. Le bras supérieur du bâti repose sur une tige filetée, laquelle est retirée progressivement lors de la mise en charge de l'essai.

Pour étudier le comportement de l'assemblage collé lors d'un essai, un support capteurs a été mis au point pour suivre les déplacements au plus proche des surfaces collées (FIGURE 11). Les déplacements sont mesurés par deux capteurs LVDT dans deux directions (parallèle et perpendiculaire au plan de collage). De plus, ce support est adapté pour l'ensemble des types de sollicitation possible avec un essai Arcan.

C. Protocole expérimental

L'épaisseur du joint de colle est déterminée par la géométrie de l'éprouvette. Dans cette étude, les éprouvettes utilisées permettent d'obtenir une épaisseur d'adhésif de 200 μm . La conception des éprouvettes permet d'assurer une incertitude de 20 μm sur cette épaisseur. Cette incertitude a été vérifiée grâce à des observations au microscope.

Le protocole de collage suivant est celui utilisé : ponçage des surfaces, nettoyage des surfaces à l'acétone, séchage des surfaces, applications de la colle sur les deux surfaces avec une spatule, mise en place des tiges puis des pinces pour maintenir les deux coques de l'éprouvette, retrait du surplus de colle, polymérisation à 25°C pendant au moins 24h en laissant sur l'éprouvette les tiges et les pinces.

Les essais sont réalisés pour des sollicitations de 50% à 80% de la force à rupture, notée T_{ult} . Chaque essai a été répété trois fois, exceptés ceux à 50% et 80% de T_{ult} . Les essais ont été réalisés à trois niveaux de température : 20°C, 35°C et 50°C. Les investigations n'ont pas été réalisées jusqu'à 70°C comme cela a été le cas pour les essais sur connecteurs, car cette température est assez proche de la température de transition vitreuse de l'adhésif (d'environ 100°C), ce qui induisait une forte dispersion des résultats.

D. Résultats des investigations expérimentales

L'étude en fluage à l'échelle du joint de colle a permis tout d'abord de comparer le temps à rupture de l'assemblage en fonction de l'échelle d'étude. Le TABLEAU 2 donne les temps à rupture des essais Arcan en fluage. La FIGURE 12 compare les temps à rupture des deux échelles d'assemblage à des niveau d'effort équivalent. A 20°C, peu d'écart est observé à la dispersion près. Cependant à 50°C, les essais sur connecteur sont plus sensibles à l'effet de la température.

TABLEAU 2. Temps à rupture pour les essais Arcan de fluage en traction avec l'Adekkit A310-1

Température	Effort appliqué (T/T_{ult})	Temps à rupture			
		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
20°C	50%	31,2 jours			31,2 jours
	60%	5h14	2,3 jours	3h06	21h02
	70%	1h03	1h09	26 min	52 min
	80%	16 min			16 min
35°C	50%	3h42	5h28	5h41	4h57
50°C	42%	3h55	7h06	2h13	4h25
	50%	1h12	50 min	1h15	1h06

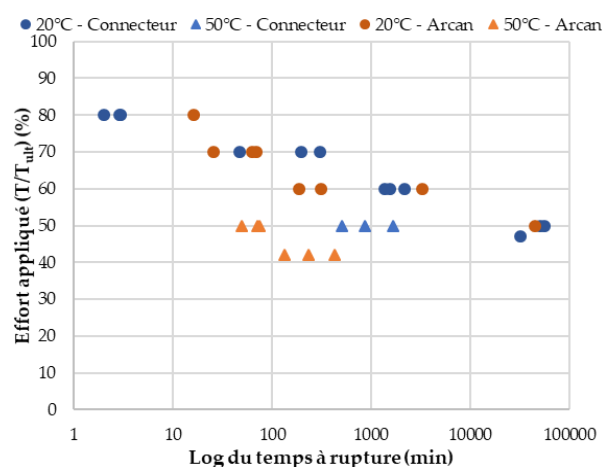


FIGURE 12. Courbe de l'effort de fluage en fonction du logarithme du temps à rupture pour les essais Arcan et ceux sur connecteur en traction avec l'Adekit A310-1

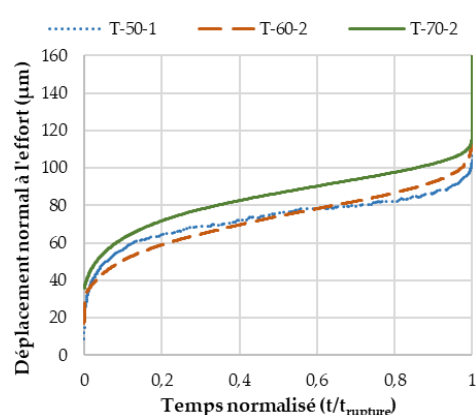


FIGURE 13. Déplacements expérimentaux en fonction du temps normalisé des essais Arcan de fluage en traction

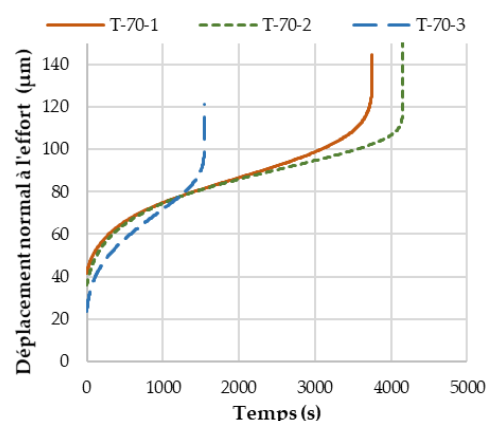


FIGURE 14. Déplacements expérimentaux issus des trois essais Arcan de fluage en traction à 70 % de T_{ult}

La **FIGURE 13** représente les déplacements normaux à la sollicitation du joint de colle pendant les essais de fluage pour les niveaux de chargement à 20°C de 50% à 70% de T_{ult} . En termes de valeur de déplacements, il est difficile de comparer ces résultats aux essais sur connecteurs. En effet, les joint de colle ont une épaisseur d'adhésif constante, tandis que l'assemblage avec connecteur a une épaisseur variable. Toutefois, le déplacement semble augmenter avec le niveau d'effort pour les essais Arcan, même si ce phénomène est moins marqué que pour les essais sur connecteur. La **FIGURE 14** montre également une dispersion des temps à rupture et du déplacement pour les essais Arcan.

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cet article analyse les résultats d'investigations en fluage d'assemblages collés à deux échelles : celle du joint mince avec des essais Arcan ; celle à échelle de la structure avec des essais sur connecteurs collés. L'analyse du comportement a montré plusieurs caractéristiques similaires aux deux échelles : dépendance linéaire entre le logarithme du temps à rupture et le niveau de charge,

augmentation du déplacement avec le niveau de charge, diminution du temps à rupture à haute température. Ces résultats seront à confirmer avec une analyse similaire pour d'autres types de chargement, comme le cisaillement.

L'ensemble de cette étude en fluage sera exploité afin de développer un modèle du comportement selon plusieurs facteurs influents (niveau de charge, température) de façon indépendante de la géométrie de connecteur. Ce modèle permettra de concevoir le connecteur vis-à-vis du fluage et de connaître les investigations nécessaires utiliser ce modèle avec d'autres adhésifs.

REFERENCES

Arcan, M., Hashin, Z., Voloshin, A., 1978. A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials. *Experimental Mechanics* 18, 141–146. <https://doi.org/10.1007/BF02324146>

Cognard, J.Y., Davies, P., Gineste, B., Sohier, L., 2005. Development of an improved adhesive test method for composite assembly design. *Composites Science and Technology* 62, 359–368. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.09.008>

Court, J.P., 2017. Bonded assembly and bonding method. WO2017089668 (A1).

Créac'hcadec, R., Sohier, L., Cellard, C., Gineste, B., 2015. A stress concentration-free bonded arcan tensile compression shear test specimen for the evaluation of adhesive mechanical response. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 61, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.05.003>

Fischer, M., Pasquier, M., 1989. Shear behaviour of structural adhesives in the bondline. *Construction and Building Materials* 3, 31–34. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(89\)80040-6](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(89)80040-6)

Jouan, A., Constantinescu, A., 2018. A critical comparison of shear tests for adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 84, 63–79. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.02.035>

Meyers, M.A., Chawla, K.K., 2008. *Mechanical Behavior of Materials*, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810947>

Sokairge, H., Elgabbas, F., Rashad, A., Elshafie, H., 2020. Long-term creep behavior of basalt fiber reinforced polymer bars. *Construction and Building Materials* 260, 120437. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120437>

Spathis, G., Kontou, E., 2012. Creep failure time prediction of polymers and polymer composites. *Composites Science and Technology* 72, 959–964. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.03.018>

Valès, B., Marguet, S., Créac'hcadec, R., Sohier, L., Ferrero, J.-F., Navarro, P., 2017. Experimental & numerical study of the Tensile/Compression-Shear Arcan test under dynamic loading. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 78, 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.06.010>