SOUDAGE ET RÉPARATION DE COMPOSITES THERMOPLASTIQUES PAR CHAUFFE PAR INDUCTION

par

Julien DICKSON

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE M. Sc. A

MONTRÉAL, LE 19 JUIN 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Cette licence <u>Creative Commons</u> signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Martine Dubé, directrice de mémoire Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Yves Mathieu, codirecteur de mémoire Ingénieur du CDCQ

M. Vincent Demers, président du jury Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Ilyass Tabiai, membre du jury Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 5 JUILLET 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Dans un premier temps, j'aimerais remercier ma directrice de mémoire, Martine Dubé, professeure à l'École de technologie supérieure (ETS) de Montréal, ainsi que mon codirecteur, Yves Mathieu, chargé de projet au Centre de développement des composites du Québec (CDCQ), pour leur aide technique, leurs conseils judicieux qui ont contribué à alimenter ma réflexion, mais aussi pour leur capacité à m'encadrer et à me réaligner dans la bonne direction lorsque ma recherche de solutions foisonnait parfois.

J'adresse ma reconnaissance au Centre de recherche sur les systèmes polymères et composites à haute performance (CREPEC) ainsi qu'au CDCQ pour l'existence ainsi que le développement de ce projet. Sans leurs supports financiers combinés et l'expertise du CDCQ, ce projet n'aurait pas pu voir le jour. Je les remercie aussi plus personnellement pour m'avoir offert deux bourses qui ont soutenu mon cheminement tout au long de ma maîtrise.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance à toute l'équipe technique de l'ETS pour leur support mécanique (Mario Corbin et Serge Plamondon) et en programmation/électrique (Michel Drouin). Je remercie aussi mes collègues du cycle supérieur en radiologie (Morgan Letenneur) et en thermographie (Maryam Jamshidi) pour leurs connaissances et aide dans ces champs d'expertise. Encore de mes collègues, mais aussi bons amis, je remercie Corentin Bobet, Vincent Rohart, Andre Correa et Jacques Lengaigne. J'ai aussi de bons souvenirs avec l'équipe technique du CDCQ. De ces équipes je remercie particulièrement Christophe Renaud.

J'aimerais particulièrement remercier Noémie Lalumière, mon amour, pour son support moral continu tout au long de ma maîtrise malgré les difficultés et l'incertitude qu'apportait la crise de la COVID-19 durant laquelle j'ai écrit ce présent mémoire. Je remercie également ma mère, Christine Chapeau, pour son aide dans la révision et la correction de mon ouvrage mais aussi pour son soutien. Je remercie aussi mes amis Daniel Dufour et Alexandre Dupont, ainsi que leur compagnie TechAuPoint, pour leur support mécanique, en impression 3D et en informatique, lié à mon projet.

SOUDURE ET RÉPARATION DE COMPOSITES THERMOPLASTIQUES PAR CHAUFFE PAR INDUCTION

Julien DICKSON

RÉSUMÉ

Cette étude vise à prouver l'applicabilité et même l'avantage des procédés de réparation et de soudure de composites thermoplastiques par induction au niveau industriel afin d'encourager un fonctionnement plus vert et durable. La chauffe est fournie par un procédé d'induction où une pièce conductrice, nommée suscepteur, est chauffée par des courants de Foucault. Par la suite, le suscepteur transmet sa chaleur au composite thermoplastique par conduction et une pression est appliquée pour consolider le joint ou la réparation. La position, le type et le nombre du ou des suscepteurs ainsi que le mode d'application de la pression sont adaptés s'il s'agit d'un procédé de réparation ou de soudure. La résine utilisée est une résine acrylique Elium 188. Elle a l'avantage de pouvoir être infusée à température ambiante, tout comme l'époxy, et présente des propriétés mécaniques similaires aux résines époxy concurrentes retrouvées dans l'industrie.

Pour la première partie du projet, soit la réparation, des échantillons d'essai de compression après impact sont produits, puis impactés avec une tour à impact à 80 J. Par la suite, une méthode de réparation par induction est développée avec pour objectif de récupérer le plus possible les propriétés mécaniques détériorées. Les échantillons réparés sont compressés jusqu'à leur rupture, puis comparés aux échantillons vierges de référence et aux échantillons impactés et non réparés pour évaluer le pourcentage de recouvrement des propriétés mécaniques dégradée de 21,5 % par rapport aux propriétés de référence puis, une fois réparés, parviennent à récupérer 13,8 % des propriétés perdues. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues par les partenaires du CDCQ avec une méthode de réparation par lumière infrarouge. En revanche, le temps de cycle de la réparation par induction est plus court de 4 minutes 30 secondes pour un cycle total de 10 minutes.

La deuxième partie du projet, la soudure en continu, développe une méthode pour obtenir un joint fort en un court temps de cycle. Le temps de cycle visé est évalué par rapport au temps de cycle d'une colle et estimé à une vitesse équivalente de soudure de 8,33 mm/sec. Cet objectif est atteint avec une vitesse de soudure en continu de 9 mm/sec. Pour les performances mécaniques en cisaillement à recouvrement simple, les joints soudés atteignent 9,21 MPa, une performance supérieure à celle des colles (7,82 MPa). Les valeurs se rapprochent même des performances d'un joint moulé (10,09 MPa). Un enduit gélifié est appliqué sur la surface du dessus et permet de confirmer que le procédé n'influence pas l'esthétisme de la pièce. Ces résultats sont encourageants pour la réparation et la soudure par induction des composites thermoplastiques au niveau industriel ainsi que pour leur utilisation.

Mots-clés : Composite thermoplastique, réparation, soudure en continu, induction.

SOUDURE ET RÉPARATION DE COMPOSITES THERMOPLASTIQUES PAR CHAUFFE PAR INDUCTION

Julien DICKSON

ABSTRACT

This study tries to prove the applicability and advantages of thermoplastic composite induction repair and welding processes in the industrial world in an effort to promote a greener and more durable approach. The heating is provided by the induction process, where a conductive part, named susceptor, generates heat via Eddy currents. Afterwards, the susceptor transmits its heat by conductivity to the workpiece and a pressure is applied to consolidate the sample. The position, the type, and the number of susceptors combined with the type of pressure medium are adapted with the respective process whether reparation or welding is the objective. The resin used is an acrylic resin named Elium 188. This resin has the advantage of having the possibility to be infused at ambient temperature, as epoxies, and presents similar mechanical properties as their competing industrial epoxy counterparts.

For the first component of the project, which is repair, compression after impact samples were produced and then impacted by an impact tower at 80 J. Afterwards, an induction repair method was developed with the objective of regaining the most out of the previously lost mechanical properties. The samples were then compressed until failure, then compared with reference and only impacted samples to evaluate the percentage of compressive mechanical properties recovered. The samples were initially degraded of 21,5 % of their base reference value following the impact, then, once repaired, 13,8 % of the lost properties were restored. These values are comparable to the values obtained from the project partner at CDCQ with their infrared heating repair method. But the cycle time of the induction repair proved faster by 4 minutes and 30 seconds for a total cycle time of 10 minutes.

The second section of the second component of the project, continuous welding, creates a method to obtain a strong welded joint with a low cycle time. The ideal cycle time is evaluated at 8,33 mm/sec welding speed that represents the equivalent gluing time of a work piece. This objective is fulfilled by continuous welding at a speed of 9 mm/sec. This time, mechanical performance of the lap shear test for a continuously welded joint reaches 9,21 MPa which surpasses the performances of the glue at 7,82 MPa. The values are closer to the moulded joint (10,09 MPa) that represent the apparent maximum performance that can be obtained. A gel coat, which was applied to the upper surface of the lap shear samples to evaluate the effect of the process on the aestheticism, was unaffected. These results are encouraging for induction repair and welding of thermoplastic composites in the industrial world and for thermoplastic usage in general.

Key words: Thermoplastic composites, repair, continuous welding, induction.

TABLE DES MATIÈRES

INTR	DDUCTION	1
CHAF	ITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1	Polymères thermodurcissables et thermoplastiques amorphes et semi-cristallins.	5
1.2	Résines acryliques	7
1.3	Consolidation	
	1.3.1 Généralités	
	1.3.2 Déconsolidation	9
	1.3.1 Reconsolidation	9
1.4	Chauffe par induction	10
	1.4.1 Principe physique	10
	1.4.2 Influence des paramètres physiques principaux	12
	1.4.2.1 Paramètres électriques	12
	1.4.2.2 Paramètres de distance	13
	1.4.3 Concentrateur de flux magnétique	14
	1.4.4 Effets de bord	15
	1.4.5 Effet de la géométrie de l'inducteur	16
	1.4.6 Type de suscepteur	17
	1.4.6.1 Plaque homogène conductrice	17
	1.4.6.2 Fibres longues conductrices	18
	1.4.6.3 Modification de la géométrie de suscepteur	20
	1.4.7 Choix de matériaux	21
1.5	Travaux similaires sur la réparation et la soudure par induction	22
	1.5.1 Réparation	22
	1.5.2 Soudure	22
1.6	Qualité du procédé	23
	1.6.1 Chauffe	23
	1.6.2Méthodes d'application de pression	25
	1.6.3Amélioration de la qualité d'une soudure	27
1.7	Justification d'originalité du projet	27
СНАГ	ΙΤΡΕ 2 - DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE	29
2.1	Méthodologie	2) 29
2.1	Montage de chauffe par induction	31
2.2	Fabrication des stratifiés	32
2.5	2 3 1 Matrice	32
	2.3.1 Procédé d'influsion sous vide	33
	2.3.3 Échantillons pour essais de réparation	
	2 3 4 Échantillons pour essai de soudure	35
	2.3.5 Échantillons consolidés	37
	2.3.6 Échantillon collé	38
2.4	Procédés par induction	
	1	

	2.4.1	Réparation par chauffe par induction	. 38
	2.4.2	Soudure statique	. 40
	2.4.3	Soudure en continu	. 41
2.5	Caractéris	ation de l'endommagement	. 43
	2.5.1	Essais de compression après impact	. 43
	2.5.2	Thermographie avec lampe infrarouge	. 44
2.6	Caractéris	ation des joints	. 45
	2.6.1	Essai mécanique de cisaillement sur échantillon	
		de joint à recouvrement simple	. 45
	2.6.2	Tomographie par rayon X	. 47
	2.6.3	Thermographie lors de soudure	. 48
	2.6.4	Micrographie	. 49
		,	
CHAF	PITRE 3 R	LÉSULTATS ET DISCUSSION	. 51
3.1	Réparation	1	. 51
	3.1.1	Développement d'une méthode de chauffe	. 51
	3.1.2	Évaluation de l'endommagement par impact	. 55
	3.1.3	Essais destructifs de compression après impact	. 57
	3.1.4	Suivi de l'endommagement par thermographie	. 59
3.2	Soudure st	tatique	. 65
	3.2.1	Développement d'une méthode de chauffe	. 65
	3.2.2	Essais de cisaillement de joint à recouvrement simple	. 68
	3.2.3	Tomographie par rayon x et porosité	. 71
3.3	Soudure c	ontinue	. 73
	3.3.1	Développement d'une méthode de chauffe	. 73
		3.3.1.1 Analyse du gradient de température par thermographie	. 81
	3.3.2	Essais de cisaillement de joint à recouvrement simple	. 85
	3.3.3	Micrographie et défauts macroscopiques	. 87
	3.3.4	Ajout d'un démonstrateur	. 90
3.4	Erreur de	lecture des thermocouples et pistes de solutions	. 91
	3.4.1	Correction par compensation logicielle	. 92
	3.4.2	Capteur thermique et imagerie thermique	. 94

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Comparaison de propriétés thermomécaniques entre une résine Elium® et époxy (Obande et al., 2019)	7
Tableau 1.2	Comparaisons de propriétés mécaniques entre des stratifiés FV/Elium® et FV/époxy (Obande et al., 2019)	8
Tableau 2.1	Type d'échantillon selon lot d'échantillon	
Tableau 3.1	Comparaison des performances mécaniques CAI et du temps de cycle avec les résultats des partenaires du projet	58
Tableau 3.2	Pourcentages de différence avec les données CAI et calculées selon le type de comparaison	64
Tableau 3.3	Performances apparentes en cisaillement à recouvrement simple et porosité par rapport à la pression de soudure	71
Tableau 3.4	Résumé des performances de soudure selon le type de suscepteur	79
Tableau 3.5	Pourcentages de surface de porosité visible par micrographie selon le type de suscepteur comparés aux performances apparentes en cisaillement à recouvrement simple	87

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Influence de la température sur le module de Young (Combette et Ernoult, 2005)
Figure 1.2	Processus de chauffe par induction11
Figure 1.3	Loi de Biot-Savart (Daryl Janzen, 2018)13
Figure 1.4	Influence de la distance sur le temps de chauffe pour une puissance donnée (Rudolf, Mitschang et Neitzel, 2000)14
Figure 1.5	Concentrateur de flux magnétique (Haimbaugh, 2001)15
Figure 1.6	Effet de bord selon de différentes géométries de suscepteur (Ahmed et al., 2006)16
Figure 1.7	Mécanismes de chauffe par induction dans un composite à fibres conductrices (Becker et Mitschang, 2017)19
Figure 1.8	Ouverture et diamètre de fil (Gouin O'Shaughnessey, 2016)20
Figure 1.9	Profil de chauffe pour soudure continue par induction (Bayerl et al., 2014)25
Figure 1.10	Montage d'installation de soudure continue par induction (Bayerl et al., 2014)26
Figure 2.1	Schéma du plan d'étude30
Figure 2.2	 (a) Bobine épingle à cheveux en forme de « T » (b) Bobine épingle à cheveux en forme de « I »
Figure 2.3	(a) Concentrateur de flux magnétique (b) Concentrateur de flux magnétique qui entoure l'inducteur
Figure 2.4	 (a) Montage de moulage par infusion de résine sous vide (El-Hajjar et al., 2013) (b) Infusion in-situ d'une résine Elium 188 à température ambiante
Figure 2.5	(a) Orientation des plis d'un échantillon de réparation standard (b) Échantillon de réparation
Figure 2.6	(a) Orientation et composition des deux plaques d'un échantillon de cisaillement à recouvrement simple (b) Plaques lors du moulage

XVIII

Figure 2.7	 (a) Étapes de production des échantillons moulés (b) Échantillon moulé 	37
Figure 2.8	(a) Schéma du montage initial (b) Montage de réparation	39
Figure 2.9	(a) Schéma du montage de soudure statique(b) Photo du montage de soudure statique	40
Figure 2.10	(a) Schéma du montage de soudure continue vue de face(b) Photo du montage de soudure continue (c) Schéma du montage de soudure continue vue de profil	41
Figure 2.11	(a) Schéma des treillis d'acier inox (b) Intégration du treillis dans la composition de l'échantillon	42
Figure 2.12	(a) Montage d'essai CAI (b) Gabarit de compression d'échantillon Adapté d'ASTM D7137 (ASTM International, 2017)	43
Figure 2.13	Montage de fixation d'échantillon pour essai d'impact Adapté d'ASTM D7136M-12 (ASTM International, 2012)	44
Figure 2.14	Montage de thermographie	45
Figure 2.15	(a) Échantillon d'essai de cisaillement à recouvrement simple typique (b) Échantillon dans machine de traction bicolonne Alliance RF/200 (Awaja, 2016)	45
Figure 2.16	Joints à recouvrement simple testés à des chevauchements de 12,5 mm, 25 mm et 50 mm ayant des supports d'acier à (a) faible résistance (b) résistance intermédiaire (c) forte résistance (Silva et al., 2006)	46
Figure 2.17	 (a) Source émettrice de rayon X dirigée vers les lots d'échantillons fixés sur une table rotatrice (b) Section d'un joint soudé 	47
Figure 2.18	Camera thermique à proximité du montage de soudure (gauche) et exemple de données d'IRT analyser 5.6 (droite)	48
Figure 2.19	(a) Microscope Olympus GX51 (b) Section d'échantillon Elium/fibre de verre endommagée par impact (agrandissement de 6,7x)	50
Figure 3.1	(a) Schéma du montage à doubles suscepteurs(b) Photo du montage à doubles suscepteurs	52
Figure 3.2	(a) Schéma du montage avec échangeur de chaleur(b) Photo du montage avec échangeur de chaleur	53

Figure 3.3	 (a) Schéma du montage avec suscepteur distal de treillis (b) Suscepteur fait d'un assemblage de 12 feuilles de treillis 200x200 d'inox 304 chemisées de Kapton®
Figure 3.4	Endommagement typique des échantillons suite à un impact de 80 J (a) Face impactée (b) Face opposée56
Figure 3.5	Apparence suite à la réparation (a) Face avant (b) Face arrière57
Figure 3.6	Contrainte apparente de rupture en compression après impact57
Figure 3.7	Image infrarouge d'un échantillon CAI (a) après l'impact de 80 J (b) après la réparation (c) après la rupture finale lors de l'essai CAI
Figure 3.8	Surface endommagée selon le type d'inspection visuelle60
Figure 3.9	(a) Échantillon impacté (b) Schéma présentant les variables présentes dans l'équation 3.361
Figure 3.10	(a) Échantillon réparé (b) Schéma supposant un endommagement nul au site d'impact suite à la réparation62
Figure 3.11	(a) Imagerie thermique d'un échantillon endommagé (b) Schéma présentant les variables présentes dans l'équation 3.463
Figure 3.12	Contrainte apparente en compression CAI et contraintes estimées par infrarouge63
Figure 3.13	Enduit gélifié affecté thermiquement par le procédé de soudure statique65
Figure 3.14	Position des thermocouples dans le joint
Figure 3.15	Profils de chauffe par induction à 260 A67
Figure 3.16	Présence de régions non soudées et de dégradation suite à la soudure statique
Figure 3.17	Contrainte apparente en cisaillement à recouvrement simple pour des échantillons soudés en mode statique69
Figure 3.18	Contrainte apparente de cisaillement à recouvrement simple selon le pourcentage de porosité au joint71

XX

Figure 3.19	Comparaisons entre les porosités détectées par tomographie et l'apparence visuelle du joint d'un même échantillon suite à l'essai destructif72
Figure 3.20	(a) Schéma de concept du suscepteur à bande simple (b) Profil de chauffe du rebord et du centre d'un échantillon à une intensité de 650 A et à une vitesse de 9mm/sec74
Figure 3.21	Suscepteur à bande simple (a) avant la soudure (b) après la soudure75
Figure 3.22	 (a) Schéma de concept du suscepteur à bandes doubles parallèles (b) Profil de chauffe du rebord et du centre d'un échantillon à une intensité de 700 A et à une vitesse de 8 mm/sec
Figure 3.23	Suscepteur à bandes doubles parallèles (a) avant la soudure (b) après la soudure76
Figure 3.24	 (a) Schéma de concept du suscepteur à bandes doubles superposées (b) Profil de chauffe du rebord et du centre d'un échantillon à une intensité de 700 A et à une vitesse de 8 mm/sec
Figure 3.25	Suscepteur à bandes doubles superposées (a) avant la soudure (b) après la soudure
Figure 3.26	 (a) Schéma de concept du suscepteur à bandes triples superposées (b) Profil de chauffe du rebord et du centre d'un échantillon à une intensité de 700 A et à une vitesse de 8 mm/sec
Figure 3.27	Suscepteur à bandes triples superposées (a) avant la soudure (b) après la soudure (c) Dégagement de gaz lors de soudure avec suscepteur à bandes triples superposées
Figure 3.28	Échantillon avec suscepteur à bandes triples superposées soudés par induction80
Figure 3.29	Imagerie thermique de la surface chauffante d'un échantillon avec suscepteur selon le type de suscepteur durant une simulation de soudure
Figure 3.30	Région d'intérêt thermique présentant la température en fonction du temps pour tous les types de suscepteurs
Figure 3.31	Région d'intérêt thermique présentant la température en fonction du temps pour tous les types de suscepteurs

Figure 3.32	Imagerie thermique de la surface chauffante d'un échantillon avec suscepteur selon le type de suscepteur durant une simulation de soudure
Figure 3.33	Contrainte apparente en cisaillement à recouvrement simple selon les lots d'essais
Figure 3.34	Échantillon avec suscepteur à bandes triples superposées suite à la rupture
Figure 3.35	Micrographie 100X d'un échantillon soudé avec suscepteur à bandes doubles superposées
Figure 3.36	Micrographie 100X d'un échantillon soudé avec suscepteur à bandes triples superposées90
Figure 3.37	 (a) Montage de soudure continue d'un renfort « oméga » sur une plaque composite (b) Échantillon suivant la soudure par induction (c) Échantillon vue de dessus
Figure 3.38	(a) Schéma de rôles des thermocouples(b) Montage de compensation logiciel

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ABS	Acrylonitrile butadiène styrène		
DAQ	Systèmes d'acquisition de données (abréviation de l'anglais, data aquisition)		
BMC	Mélange de moulage en vrac (abréviation de l'anglais, <i>bulk molding compound</i>)		
CDCQ	Centre de développement des composites du Québec		
CFM	Concentration de flux magnétique		
DSC	Calorimétrie à analyse différentielle (abréviation de l'anglais, <i>Differential scanning calorimetry</i>)		
NDT	Essai non destructif (abréviation de l'anglais, non-destructive testing)		
МЕКР	Peroxyde de méthyléthylcétone (abréviation de l'anglais, <i>methyl ethyl ketone peroxide</i>)		
PEEK	Polyétheréthercétone (abréviation de l'anglais, polyetheretherketone)		
PEI	Polyétherimides		
PEK	Polyéthercétone (abréviation de l'anglais, polyetherketone)		
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle (abréviation de l'anglais, <i>polymethyl methacrylate</i>)		
PTFE	Polytétrafluoréthylène		
VARTM	Moulage par transfert de résine sous vide (abréviation de l'anglais, vacuum- assisted resin transfer molding)		
ZAT	Zone affectée thermiquement		

INTRODUCTION

Une forte croissance de l'utilisation des thermoplastiques se produit au niveau industriel, en particulier dans le secteur automobile. Cette croissance est portée par leurs propriétés chimiques, thermiques et mécaniques intéressantes, ainsi que leur aspect écologique. De par leur nature, les thermoplastiques peuvent être moulés une seconde fois lorsqu'on les chauffe à une température supérieure à leur température de transition vitreuse (Tg) ou température de fusion (Tm). Leurs compétiteurs, les thermodurcissables, ne peuvent être déformés significativement sans engendrer une forme de bris ou d'endommagement permanent à cause de leur structure moléculaire rigide ; ils ne peuvent donc pas être moulés une seconde fois ni être recyclés. Mais, grâce à cette structure rigide, les thermodurcissables ont pendant longtemps présenté de meilleures propriétés thermomécaniques, d'où leur prévalence dans les applications structurales. Or, les nouvelles résines thermoplastiques les ont rattrapés au niveau de ces performances et il devient alors nécessaire de réévaluer leur rôle dans le secteur industriel.

Le fait de pouvoir les faire fondre permet de les recycler simplement en fin de vie, bien qu'il subsiste encore des défis à cet égard lorsqu'on discute plutôt de composites thermoplastiques. En revanche, le recyclage est associé à la fin d'utilisation d'un produit ; s'il est possible de prolonger cette durée de vie en réparant, il est aussi possible de diminuer d'emblée le besoin de produire. En réparant le matériau, il est possible de recouvrer la majeure partie des propriétés mécaniques perdues lors d'un impact ou même de résorber une partie de l'endommagement lié à la fatigue.

Cette même propriété de pouvoir être mis en forme à plusieurs reprises permet également d'assembler des pièces de composites thermoplastiques par soudage. Cette méthode de liaison est moins intrusive que les attaches mécaniques et les adhésifs qui sont souvent utilisés pour lier les pièces de composites thermodurcissables. Certains procédés, tels que la chauffe par induction, ont pour avantage de chauffer une région localisée au joint grâce à un matériau conducteur inclus dans la construction, le tout sans nécessiter un accès direct à la région soudée. Cela diminue la taille de la zone affectée thermiquement (ZAT) ainsi que la possibilité de déformer les pièces soudées (Ahmed et al., 2006).

Le plus souvent, la recherche est effectuée sur des résines hautement performantes telles que les polyétheréthercétones (« PEEK »), les polyéthercétones (« PEK ») et les polyétherimides (« PEI »). Mais la recherche fait souvent abstraction des résines thermoplastiques disponibles au niveau industriel. De plus, ces technologies font l'objet de secrets commerciaux au niveau industriel, et on ne dispose ainsi que de peu de publications sur le sujet. Ce faible niveau d'exposition et de promotion rend cette technologie peu visible ou peu attrayante pour les compagnies de ce niveau. L'industrie n'utilise alors les thermoplastiques que lorsqu'un grand nombre de pièces doivent être moulées puisque leur production standard nécessite des presses chauffantes chères, complexes et qui n'offrent que peu de flexibilité. En comparaison, les méthodes traditionnelles employées avec l'époxy sont d'une simplicité élégante et peuvent accommoder des formes complexes. Rares sont les compagnies qui veulent se lancer dans un développement couteux de technologies thermoplastiques s'il n'est pas nécessaire d'apporter des changements et qu'il y a peu de bénéfices associés.

Or, de nouvelles résines thermoplastiques voient le jour, des résines pouvant imiter l'époxy au niveau de sa mise en forme. Les récentes résines thermoplastiques Elium® d'Arkema sont une nouvelle option comportant des propriétés mécaniques ainsi que de viscosité à température ambiante similaires à l'époxy (Obande et al., 2019). Ces résines peuvent donc être utilisées avec le même équipement que celui qui est employé pour les résines époxy (i.e., elles peuvent être infusées). Le risque pour les compagnies de se diriger vers les thermoplastiques est donc amoindri, puisqu'il ne nécessite pas d'investir dans de nouveaux équipement couteux et complexes. Il y a donc intérêt à faire les premiers pas, pour inclure les technologies de soudure et de réparation par induction dans l'arsenal du monde industriel. Cela pourrait favoriser le mouvement vert collectif en fournissant deux arguments de plus concernant des avantages techniques en faveur de l'utilisation de ces résines.

Cette étude utilise une résine Elium® 188. La chauffe par induction est utilisée pour ces deux procédés, le soudage et la réparation, car elle présente le genre de rapidité et d'efficacité recherchées dans le monde industriel. Les objectifs du projet sont :

- Prouver la faisabilité de la réparation et de la soudure en continu avec un composite thermoplastique infusable tout en simulant un environnement industriel pour les essais.
- Obtenir des performances mécaniques similaires ou supérieures aux autres options disponibles dans l'industrie, tout en visant un temps de cycle plus court.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Cette revue de littérature vise à présenter les points clés liés aux polymères thermoplastiques, à leur capacité à être réparés ou soudés, et aux procédés de réparation et de soudage. Il existe plusieurs techniques qui permettent de générer la chauffe nécessaire à ces deux procédés. Parmi ceux-ci, la chauffe par induction est choisie et est donc couverte en détail afin de permettre une meilleure compréhension des travaux présentés dans le présent mémoire.

1.1 Polymères thermodurcissables et thermoplastiques amorphes et semicristallins

La polymérisation représente la génération initiale des chaines formant la matrice par l'association de monomères. La géométrie et la nature des chaines qui constitue les structures de base de la matrice affectent l'ensemble des propriétés mécaniques qui en découlent.

Les thermodurcissables et thermoplastiques sont fondamentalement différents au niveau de la structure des chaines de polymère. Les thermoplastiques forment des chaines linéaires ou des chaines avec des embranchements lors de leur polymérisation qui s'entrecroiser et de former des nœuds. En comparaison, les thermodurcissables forment des réticules ; les chaines séparées forment des liaisons croisées entre elles. La polymérisation donnera lieu à une structure formée d'un réseau tridimensionnel de chaines interreliées. Ce réseau ne laissera que peu de possibilités d'être altéré sans qu'il y ait une forme de bris. La force des liaisons chimiques de ce réseau est aussi ce qui rend les thermodurcissables impropres au recyclage. Un polymère thermoplastique peut être amorphe ou semi-cristallin et un polymère thermodurcissable est forcément amorphe.



Figure 1.1 Influence de la température sur le module de Young (Combette et Ernoult, 2005)

La structure d'un thermoplastique amorphe est comparable à un liquide bien que le matériau se comporte comme un solide en raison de leur grande viscosité. Pour une matrice thermoplastique amorphe, une température supérieure à la température de transition vitreuse (Tg) redonne aux chaines leur mobilité en diminuant la viscosité et permet un assouplissement du matériau au niveau macroscopique (*Voir* Figure 1.1). Le matériau passe d'un état solide à un état ressemblant davantage à celui d'un liquide visqueux. Un chargement confère alors une nouvelle forme au matériau. S'il est suivi d'un refroidissement, il y a fixation de la structure, et le matériau repasse à l'état solide, mais avec une nouvelle forme (Krishan K.Chawla., 1987).

1.2 Résines acryliques

Au niveau industriel, il existe une multitude de résines thermoplastiques économiques qui présentent des propriétés mécaniques adaptées aux applications structurales. Les résines acryliques Elium® d'Arkema présentent des propriétés mécaniques (*Voir* Tableau 1.1) ainsi que de mise en forme similaire à celles de l'époxy et donc un intérêt pour l'industrie. Sa faible viscosité et faible température de polymérisation non caractéristique des thermoplastiques lui confèrent un avantage au niveau industriel face aux autres matrices thermoplastiques qui nécessitent souvent des équipements de mise en forme complexes et couteux.

Tableau 1.1 Comparaison de propriétés thermomécaniques entre une résine Elium® et époxy (Obande et al., 2019)

Property	Elium® 188 O	SR 1710/SD 7820
Tensile strength (MPa)	66	78
Tensile modulus (GPa)	3.2	2.8
Elongation at break (%)	2.8	6.2
Flexural strength (MPa)	111	117
Flexural modulus (GPa)	2.9	2.8
Glass transition temperature (°C)	120 ^a	127
^a Value for Elium® 280.		

Les résines Elium sont amorphes elles ont une viscosité comprise, selon leur gamme, entre 100 cP et 200 cP (Kazemi et al., 2019 ; Muthuraj, Grohens, Seantier, 2017) à température ambiante. En comparaison, l'époxy SR1710/SD 7820 a une viscosité de 450 cP ce qui est plus élevé que la résine Elium et offre donc plus de résistance lors de son moulage. Il est donc possible d'infuser sous vide ces résines telles de l'époxy à température ambiante. La viscosité plus faible permet à la résine Elium de bénéficier d'un temps de cycle de moulage plus court que l'époxy lors d'une étude qui comparent leurs performances lorsque qu'infusé sous vide en stratifiés de fibres de verre (Obande et al., 2019). Les propriétés mécaniques sont par la suite investiguées et révèlent une similitude hormis au niveau de la résistance en traction transversale où la résine acrylique bénéficie d'un avantage de performance de 33% plus élevé que l'époxy (*Voir* Tableau 1.2).

Tableau 1.2 Comparaisons de propriétés mécaniques entre des stratifiés FV/Elium® et FV/époxy (Obande et al., 2019)

Tensile, flexural and shear properties.			
		GF/acrylic	GF/epoxy
Tensile properties (transverse)	Strength (MPa)	73 ± 3.9	54 ± 4.1
	Modulus (GPa)	13 ± 0.6	13 ± 0.5
	Failure strain (%)	1.2 ± 0.3	2.1 ± 0.2
Flexural properties (longitudinal)	Strength (MPa)	879 ± 49	869 ± 42
	Modulus (GPa)	40 ± 1.7	38 ± 2.3
	Failure strain (%)	3.3 ± 0.4	3.4 ± 0.6
Flexural properties (transverse)	Strength (MPa)	91 ± 5.4	94 ± 7.2
	Modulus (GPa)	11 ± 0.2	12 ± 0.4
	Failure strain (%)	1.7 ± 0.3	2.0 ± 0.2
Short beam shear properties	Strength (MPa)	58 ± 1.7	57 ± 1.0

La résine Elium® est basée sur un mélange d'acide 2-propénoïque, 2-méthyle-, d'ester de méthyle (MMA) et d'un copolymère d'acrylique qui n'est pas précisé pour des impératifs de secret commercial (Zhong, Frieldrich et Fakirov, 2005). La réaction de polymérisation peut être initiée avec des groupes peroxyde tels que le peroxyde de benzoyle (Raponi et al., 2018). (Luperox®) ou le peroxyde de méthyle éthyle cétone (Hendlmeier et al., 2019) (MEKP). La conversion se fait rapidement à température ambiante et, selon l'utilisation, il n'est pas nécessaire de procéder au recuit par la suite.

1.3 Consolidation

1.3.1 Généralités

La consolidation nécessite de porter le composite à une température supérieure à la Tg ou à la Tm de la matrice et à appliquer une pression lors du moulage. La température liquéfie la matrice et permet sa réorganisation. La pression permet à l'air, aux gaz pouvant être émis et à la résine excédentaire d'être éjectés. Cela permet de diminuer la porosité et d'obtenir un taux volumique de fibres (Vf) voulu.

1.3.2 Déconsolidation

Les cycles de chauffe ont un impact sur les structures mésoscopiques des composites et donc un impact sur leurs propriétés mécaniques au niveau macroscopique. Une chauffe se rapprochant de la Tg ou de la Tm pour les matrices semi-cristallines, mais inférieures au point où la matrice adopte un comportement réellement liquide, active une croissance de vides dans le matériau. La chaleur engendre une diminution de la viscosité des chaines de polymère, qui retrouvent un comportement plus caoutchouteux. Lorsque le composite se retrouve dans ces conditions, l'énergie élastique résiduelle emmagasinée dans la matrice suite à sa consolidation est alors relâchée. Elle agit en force motrice sur les chaines avoisinantes maintenant assouplies, résultant en une déconsolidation. La température peut aussi mener à l'expansion thermique de gaz piégés dans la matrice et contribuer à la croissance de vides (Ageorges et Yee, 2001 ; Moser, 2012). L'augmentation de porosité causée par la déconsolidation se traduit par une baisse de rigidité ainsi que de résistance mécanique au niveau macroscopique.

1.3.1 Reconsolidation

Si la température est supérieure à la Tg ou à la Tm et que la pression extérieure excède la pression des vides dans le matériau on assiste à une reconsolidation où les vides se referment (Zhong, Frieldrich et Fakirov, 2005). Si la température est suffisamment élevée au travers de l'épaisseur du matériau, le front de reconsolidation peut éventuellement parvenir à refermer la majeure partie des pores créés par la déconsolidation. Une chauffe encore plus élevée que ce point de transition de comportement n'influencera que peu ce processus, la pression appliquée étant le paramètre déterminant.

En revanche, lorsque la chauffe et la pression sont trop intenses, il est possible d'engendrer un fluage de la matrice sur les rebords. Lorsque le fluage commence, le fait de maintenir les paramètres cause une diminution d'épaisseur progressive selon le temps d'application, voire une éjection partielle de fibres dans les pires cas. Moins le matériau est visqueux, plus la quantité de résine fui rapidement sur les côtés.

1.4 Chauffe par induction

1.4.1 Principe physique

L'envoi d'un courant alternatif dans une bobine génère un champ magnétique alternatif autour de celle-ci. L'objet conducteur soumis à ce champ magnétique réagit en étant magnétisé ; un courant et un champ magnétique s'établissent dans la pièce conductrice subordonnée au mouvement réactif des électrons. Dans le cas d'un champ magnétique continu, il y aurait une force magnétique qui cherche à déplacer l'objet conducteur, comme en témoigne le cas de l'induction de Lorentz. Mais, puisqu'il s'agit d'un champ magnétique alternatif à haute fréquence, il s'agit plutôt de l'induction de Neumann. Dans ce cas, les charges n'ont pas le temps de se déplacer et le champ magnétique induit fluctue constamment. L'interaction entre la bobine et l'objet conducteur peut être modélisée comme l'interaction entre deux transformateurs. La bobine agit en tant qu'enroulement primaire et l'objet conducteur en tant qu'enroulement secondaire. Lors d'un usage de la sorte, la bobine est plutôt appelée l'inducteur.

L'interaction fréquente avec les électrons de l'objet conducteur provoque des variations de voltage et de température localisées qui à leur tour génèrent des courants de Foucault (*Voir* Figure 1.2). Ces courants forment de petites boucles électriques fermées ayant un axe perpendiculaire au champ magnétique de l'inducteur et qui produisent leur propre champ magnétique réactif. Ces courants se produisent en surface du matériau conducteur. Le mouvement des électrons de ces courants engendre un effet Joule, le matériau s'oppose au déplacement des électrons de par sa résistivité, une partie de l'énergie est convertie en énergie thermique (Ahmed et al., 2006). Un objet conducteur dont la fonction est de générer de la chaleur par induction est nommé suscepteur.



Figure 1.2 Processus de chauffe par induction

Il existe aussi une autre forme de chauffe dans le cas des matériaux ferromagnétiques, la chauffe par hystérésis. Les grains formant le matériau ferromagnétique agissent tels des domaines magnétiques ou dipôles. Les charges d'un même grain se retrouvent alignées dans un même sens par leur spin et agissent comme de petits aimants. Un champ magnétique externe peut arriver à réorienter tous les dipôles d'un matériau ferromagnétique, magnétisant alors le matériau. Mais, un changement rapide du sens du champ magnétique externe cause un changement continu de polarité de ses petits aimants. La rotation constante des dipôles engendre une interaction au niveau des électrons et des structures atomiques avoisinantes qui se traduit par une perte en énergie thermique (Haimbaugh, 2015).

Cette chaleur produite par ces deux mécanismes est transférée par conduction à la pièce composite où elle gagnera de l'importance en permettant aux chaines du polymère de s'assouplir et de se déplacer.

1.4.2 Influence des paramètres physiques principaux

1.4.2.1 Paramètres électriques

Le champ magnétique est influencé par les paramètres électriques de la source d'induction. Le voltage, l'ampérage et la puissance qui en résulte, ainsi que la fréquence dictant l'intensité de la chauffe. La pièce induite cherche à reproduire un champ magnétique similaire, mais inverse au champ de l'inducteur. Si une augmentation de puissance ou de fréquence cause une hausse de l'intensité du champ magnétique, le suscepteur cherche à reproduire ces changements. Il y a alors une augmentation de l'intensité des courants de Foucault (Ahmed et al., 2006).

Il est à noter qu'il est avantageux pour la source d'être contrôlée par la puissance plutôt que le voltage. La raison étant que le mouvement des électrons dans l'inducteur cause une hausse de température et donc de résistance. Afin de conserver le même voltage, la source diminue l'intensité et il y aura une variation de la chauffe subie par le suscepteur. Une grande partie des bobines à induction sont refroidies par la circulation d'un liquide de refroidissement, mais cela peut ajouter une variation à la puissance réelle à laquelle le suscepteur est soumis (Brassard et al., 2019).

La fréquence dicte aussi la chauffe générée par la perte d'hystérésis ainsi que la profondeur de l'effet de peau. L'effet de peau est la circulation des courants induits à la surface extérieure du matériau (Rudnev, Loveless et Cook, 2017). La majeure partie de la chauffe se produit dans cette région. Sa taille dicte la profondeur et le volume de la zone contribuant à la chauffe. Cette pénétration maximale peut être dérivée des équations de Maxwell :

$$\delta = \sqrt{\frac{p}{\pi * \mu_r * f}} \tag{1.1}$$
Une hausse de la fréquence cause une forte augmentation de la chaleur produite, mais aussi une diminution de la pénétration et du volume générant la chaleur. Il y a donc une fréquence optimale à viser pour obtenir une chauffe maximale (Rudolf, Mitschang et Neitzel, 2000).

1.4.2.2 Paramètres de distance

Le champ magnétique généré par l'inducteur interagit avec tout autre matériau conducteur à proximité, ainsi, plus l'objet est éloigné, moins l'interaction est forte. Ce comportement peut être modélisé par la loi de Biot-Savart pour un fil (*Voir* Figure 1.3) (Daryl Janzen, 2018) :



Figure 1.3 Loi de Biot-Savart (Daryl Janzen, 2018)

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 * \pi} * \int_{Wire} \frac{I d\vec{l} x \hat{r}}{r^2}$$
(1.2)

Cette même loi permet également de prévoir que l'intensité de champ magnétique \vec{B} d'un objet distancié du double d'une distance r arbitraire diminuerait de 4 fois. Bien sûr, dans un contexte plus réaliste, les concentrateurs de flux magnétique et les géométries d'inducteur ou de suscepteur sont plus complexes. Cela rend difficile la modélisation de ce comportement. Mais, il reste essentiel de comprendre qu'un faible changement de distance peut affecter grandement la puissance du champ magnétique subi par l'objet conducteur (*Voir* Figure 1.4) (Ahmed et al.,

2006 ; Daryl Janzen, 2018 ; Bayerl, 2012). Il est préférable de rapprocher le suscepteur vers l'inducteur plutôt que d'augmenter la puissance ou la fréquence pour pallier à cette perte de puissance de flux magnétique, or cela peut aussi amener des problèmes d'homogénéité de la chauffe, il est donc conseillé de trouver un équilibre entre les deux (Bayerl, 2012).



Figure 1.4 Influence de la distance sur le temps de chauffe pour une puissance donnée (Rudolf, Mitschang et Neitzel, 2000)

1.4.3 Concentrateur de flux magnétique

Les champs magnétiques sont générés tout autour des filaments de l'inducteur, mais il n'y a qu'une petite partie du champ magnétique qui est réellement utilisée par le suscepteur puisqu'en général l'inducteur est situé au-dessus de la pièce. Il est toutefois possible de rediriger cette partie non utilisée du champ magnétique avec des concentrateurs de flux magnétique. Un objet magnétiquement conducteur en forme de « C » placé autour d'un fil offre une meilleure option de passage au flux magnétique que l'air et permet de rediriger une grande partie du flux magnétique vers la région ouverte du « C » (*Voir* Figure 1.5) (Rudnev, Loveless et Cook, 2017). Cela a pour effet de concentrer grandement le flux magnétique et la chauffe qui en résulte (Haimbaugh, 2015). De plus, le fait de contrôler la direction du champ

magnétique empêche la chauffe non volontaire d'objet ou d'équipement à proximité de l'inducteur. Trois groupes de matériaux peuvent être utilisés pour composer ces concentrateurs de flux magnétique : les laminés d'acier au silicium, les ferrites et les matériaux magnétodiélectriques (Ruffini et al., 1999).



Figure 1.5 Concentrateur de flux magnétique (Haimbaugh, 2001)

1.4.4 Effets de bord

Les courants de Foucault cherchent à produire ces boucles fermées de courants. Mais, la taille et la forme du suscepteur et de son interaction avec l'inducteur ont pour effet de distordre ces boucles et il y a une augmentation ou une diminution localisée du flux magnétique. Ces distorsions de flux se traduisent par une chauffe non homogène. Une région ayant une grande surface de suscepteur distribue la densité de courant et diminue la chauffe. Cela est souvent le cas pour des plaques rectangulaires étant donné que le coin ne peut être rempli par les boucles circulaires. Cette diminution graduelle du flux magnétique entraine une baisse localisée de la chauffe dans ces coins. Une région étroite du suscepteur a tendance au contraire à concentrer et à écraser les rebords des boucles contre les parois extérieures. La conséquence est un flux d'une plus grande intensité et une surchauffe localisée sur les bords (*Voir* Figure 1.6) (Miller et al., 1990).



Figure 1.6 Effet de bord selon de différentes géométries de suscepteur (Ahmed et al., 2006)

L'effet de bord apporte son lot de problèmes. Il est en effet possible d'atteindre la température de dégradation sur les rebords sans atteindre la température de transition vitreuse au milieu d'un même joint soudé. Le contrôle de ces effets de bord est crucial pour la qualité du résultat final.

Il est possible de faire varier la géométrie de l'inducteur afin d'atténuer ces effets, mais il n'existe pas de solution générale qui fonctionnerait pour toutes les tailles et géométries de suscepteur (Mitschang, Rudolf, Neitzel, 2002).

1.4.5 Effet de la géométrie de l'inducteur

La forme de l'inducteur affecte la forme du flux magnétique qui est dirigé vers le suscepteur. Une forme symétrique de bobine entraine tout de même un champ magnétique asymétrique, car les filaments de la bobine doivent se rejoindre à leur point de connexion avec la source inductrice. Le profil de chauffe est, par ce fait, toujours distordu dans une certaine mesure (Zinn S et Semiatin, 1988). Les zones trop proches les unes des autres, ou la zone de connexion à la source sont sujettes à des annulations électromagnétiques et fournisent un champ magnétique plus faible.

Parmi les formes les plus utilisées, il y a les bobines en épingles à cheveux, hélicoïdales, coniques et enroulées à plat (*Pancake coil*). Elles sont, dans l'ordre, utilisées dans les contextes suivants : chauffe d'objet rond, chauffe d'objet rond avec de meilleurs couplages et pénétration lorsque la forme est plus complexe (Sanders, 1987), chauffe homogène adaptée à une forme extrudée, chauffe d'une plaque plane (Zinn S et Semiatin, 1988). Mais, les formes rondes devant être chauffées en surface sont rarement présentes dans les composites thermoplastiques et les bobines destinées à l'usage sont parfois aussi utilisées d'un seul côté. Dans ce cas, les bobines circulaires donnent une chauffe relativement homogène bien que le milieu présente une zone de faible intensité (Yarlagadda, Fink et Gillespie, 1998). Il est aussi décrit que les bobines « double D » ont un profil de chauffe uniforme et qu'elles pourraient être idéales pour les plaques faites de fibre de carbone tissé (Lionetto et al.2017). Il est complexe de trouver la forme propice à l'utilisation, car il est difficile de comparer les différentes géométries de bobines. Elles ont toutes leurs propres impédances (Bayerl et al., 2014), inhomogénéité de chauffe et profil d'effet de bord (Rudolf, Mitschang et Neitzel, 2000).

Un tube rectangulaire utilisé pour une bobine confère un avantage en offrant une meilleure surface de couplage de champ magnétique avec le suscepteur (Zinn S et Semiatin, 1988) ; une plus grande région sera chauffée. De plus, cette forme offre un avantage lors de la fabrication de la bobine, parce qu'il a moins tendance à s'affaisser durant le pliage.

1.4.6 Type de suscepteur

1.4.6.1 Plaque homogène conductrice

Dans les plaques de métal, les courants de Foucault circulent librement en surface du matériau conducteur. Lorsque ces courants sont établis en surface, ils génèrent leur propre champ magnétique qui combat l'influence de l'inducteur. Ces champs réactifs annulent le champ magnétique de l'inducteur dans les régions plus profondes de la plaque (Miller et al.,1990).

Souvent composées de métal, elles ne peuvent pas faire partie de la structure finale lors d'une chauffe secondaire en raison de leur manque de compatibilité chimique avec les résines thermoplastiques. Les plaques sont plutôt utilisées comme suscepteur lors de la réparation, du formage ou du moulage, car elles permettent d'obtenir une surface uniforme avec un bon fini de surface.

1.4.6.2 Fibres longues conductrices

Les treillis d'acier inoxydable et tissages de fibres longues sont les géométries les plus communément utilisées comme suscepteur en raison de leurs bonnes caractéristiques de chauffe et de leur facilité d'intégration dans des joints ou dans les constructions de renfort. Les treillis sont faits de fils d'acier inoxydable, mais se doivent d'être tissées pour donner lieu aux mécanismes de chauffe qui feront sous peu l'objet d'explications plus approfondies. Un pli de fibres unidirectionnel ne présente pas une chauffe intéressante pour ce procédé en raison du manque d'interaction entre les fibres.

Car elles sont conductrices, il est possible de générer de la chaleur avec des fibres de carbone. L'usage de tissage de carbone comme suscepteur est cependant rare, car les tissages d'acier inox ont prouvé bénéficier d'une meilleure chauffe ainsi que d'une performance mécanique accrue [39] (Hou et al.1999). En revanche, mit en contexte dans un composite a fibre de carbone, l'entièreté du renfort agit en élément chauffant et il n'y a nul besoin d'un suscepteur.

Il existe trois mécanismes de chauffe dans les tissages : les pertes de Joules, les pertes de jonction par hystérésis diélectrique et les pertes de jonction par résistance (*Voir* Figure 1.7) (Yarlagadda et al., 2002). Dans le premier cas, la résistance, la longueur et le diamètre des fibres définissent la chaleur produite par le passage des électrons. Ce mécanisme est le plus simple, le fil agit comme une résistance.

Dans le deuxième cas, il a été remarqué qu'une faible couche de résine séparant deux fils agit comme un condensateur en présence d'un champ magnétique alternant de polarité. La résine agit en matériau diélectrique polarisable entre les fibres. La chauffe provient du mouvement des charges qui se condensent aux extrémités des fibres et des molécules de résine qui se mettent à tourner entre les fibres. Ce type de chauffe peut-être dominant dans des plis préimprégnés de par la séparation des différents plis par de faibles couches de résine.

Dans le troisième cas, un contact entre deux fibres s'entrecroisant donne lieu à une résistance de contact où le courant passe et génère de la chaleur. Plus la pression et les températures sont élevées, plus la résistance de contact est élevée. Ce mécanisme devient dominant lorsqu'il y a une grande quantité d'entrecroisement de fibres avec une faible surface de contact global (Yarlagadda et al., 2002). De plus, il n'est pas forcément nécessaire d'avoir un contact physique entre les deux fibres, lorsque les fibres sont suffisamment rapprochées, les électrons peuvent sauté par tunnel quantique.



Figure 1.7 Mécanismes de chauffe par induction dans un composite à fibres conductrices (Becker et Mitschang, 2017)

La taille des maillages et le diamètre des fibres ont une influence considérable sur les propriétés finales du composite (*Voir* Figure 1.8). La première raison est que les fibres ayant un diamètre trop grand agissent comme des inclusions et servent de site de germination de vides. La deuxième raison est que des ouvertures trop étroites nuisent au fluage de la résine lors de la chauffe et résultent en une diminution de la surface de résine disponible pour supporter un chargement (Dubé et al., 2011). Mais, lorsqu'il y a trop peu de fibres et d'entrecroisements par

rapport au volume, la qualité de la chauffe peut en souffrir. Un équilibre doit être atteint pour maximiser les performances mécaniques.



Figure 1.8 Ouverture et diamètre de fil (Gouin O'Shaughnessey, 2016)

1.4.6.3 Modification de la géométrie de suscepteur

Il est possible de modifier la forme du suscepteur pour contrer les effets de bord et obtenir une forme plus homogène. Dans une étude de S. Yarlagadda et al., (1998) des segments sont découpés dans différentes régions d'un tissage d'acier inox soumis à l'induction d'une bobine circulaire. En modifiant la façon dont les boucles de courants de Foucault se comportent dans le tissage, il devient possible d'obtenir une chauffe plus homogène à partir d'un champ magnétique non homogène. L'auteur propose un modèle basé sur les lois électriques fondamentales qui permet d'évaluer l'intensité des courants ainsi que le gradient de température. Il arrive à diminuer le gradient d'inhomogénéité de chauffe de 80°C à 40°C avec une conception de découpe relativement simple (Yarlagadda, Fink et Gillespie, 1998). De cette étude, il est possible d'évaluer qu'une modification géométrique puisse constituer l'une des solutions les plus simples à essayer en raison du faible coût des tissages en acier inoxydable, ainsi que la facilité à apporter des modifications. En comparaison, les bobines sont difficiles à modifier et un changement de géométrie au niveau du suscepteur peut annuler les bienfaits de l'optimisation de la bobine.

1.4.7 Choix de matériaux

Dans le cas de la chauffe par induction, sachant que la pièce est chauffée, il est impératif que le suscepteur soit un matériau conducteur. En revanche, la conductivité thermique est ce qui permet au matériau de transférer cette chaleur aux échantillons. De plus, si le suscepteur reste dans l'assemblage comme dans le cas des soudures, il faut prévoir sa compatibilité avec la matrice.

Il est également possible de concevoir le suscepteur avec des matériaux qui lui permettent de maintenir une température uniforme, tout en contrôlant les effets de bord dans un cas bien précis. Le point de Curie est la température au-delà de laquelle un matériau magnétique perd ses propriétés ferromagnétiques pour devenir non magnétique. La température a pour effet de désordonner l'alignement des domaines électriques et il s'ensuit une perte localisée du magnétisme. Lors d'une chauffe par un élément externe, l'intensité des courants induits en surface diminue en se répartissant sur toute l'épaisseur et la chauffe par hystérésis disparaît. Une zone, d'un élément chauffant atteignant cette température, est soumise à de faibles courants électriques induits et augmente de température très lentement par rapport au reste du matériau. Pendant ce temps, le processus de chauffe se poursuit dans les zones plus froides où le courant est plus intense, jusqu'à l'obtention d'une température uniforme (Smith, 2010). Un matériau magnétique ou un alliage composé de ces éléments qui a une température de Curie supérieure à la Tg ou à la Tm de la résine sélectionnée peut être utilisé pour obtenir une température uniforme pour le suscepteur. Or, la qualité et la composition du mélange d'alliage sont cruciales à l'obtention d'une valeur stable et uniforme du point de Curie.

Dans le cas de particules ferromagnétiques, il est aussi possible de baser la chauffe principale sur les pertes d'hystérésis plutôt que sur les courants de Foucault. Dans ce cas, le seuil de percolation n'a pas forcément besoin d'être atteint, bien que la quantité et la répartition des particules régissent la chauffe et son homogénéité. La fréquence de transition du courant alternatif a avantage à être élevée si on envisage mettre de l'avant ce mécanisme de chauffe, car elle définit la fréquence de rotation des dipôles et la chaleur qui en résulte. Cette fois, la fréquence de changement de polarité de l'inducteur doit d'être de l'ordre des MHz (Suwanwatana, Yarlagadda et Gillespie, 2006). En revanche, il est encore possible de contrôler la température maximale en prévoyant un matériau de suscepteur avec un point de Curie adapté à la résine employée. La température est alors très stable une fois le point de Curie atteint, car il y a une disparition locale de l'unique mécanisme de chauffe et une régulation de la température.

1.5 Travaux similaires sur la réparation et la soudure par induction

1.5.1 Réparation

La réparation par induction peut offrir une méthode rapide, peu couteuse et fiable de prolonger la vie d'une pièce endommagée. Une chauffe avec une pression reconsolide les sites de délaminations après un impact et peut aussi restaurer des marques peu profondes de surface s'il y a ajout de matrice (Reyes et Sharma, 2010). Lorsqu'un dommage est tel qu'il cause une rupture ou une amorce de fissures dans les fibres du renfort, une partie des propriétés mécaniques ne peut plus être récupérée puisque ces dommages sont irréversibles. Ce type de réparation cible plutôt les défauts présents dans la matrice, entre les plis ou à l'interface entre les fibres et la matrice, mais une réparation de la sorte permet de restaurer la majeure partie des propriétés mécaniques (Reyes et Sharma, 2010).

Une autre étude démontre qu'il est possible de réparer l'endommagement lié à un impact effectué préalablement à un test de fatigue sur des thermoplastiques de grade aéronautique avec une presse chauffée (Tarpani et al., 2014).

1.5.2 Soudure

La soudure par induction peut permettre un joint avec moins de contaminants, des propriétés mécaniques intéressantes et un temps de cycle faible en comparaison au joint collé. Pour ces raisons, il y a un effort industriel qui cherche à optimiser ces caractéristiques dans le but de fournir une option qui peut remplacer les colles ou les adhésifs.

Une publication investigue la résine Elium 188 dans l'optique de souder éventuellement des pales d'éolienne. Ils produisent des soudures par résistance et par induction, puis les comparent aux adhésifs utilisés dans l'industrie. Ils arrivent par ailleurs à dépasser les performances des adhésifs avec les deux méthodes. D'après leur recherche, les joints soudés qui se sont avérés être les plus forts sont issus d'une chauffe de 200°C avec une pression de 0,345 MPa sur une surface de 645 mm². Les auteurs évaluent la qualité de leur joint selon la norme ASTM D5868 pour les tests de cisaillement à recouvrement simple (Murray, Roadman, Beach, 2019). Ces paramètres sont une bonne piste de départ pour orienter les tests de paramètres de chauffe de cette étude.

1.6 Qualité du procédé

De multiples paramètres influencent les qualités de la soudure ou la réparation finale. Certains de ces paramètres sont communs aux deux procédés et méritent d'être couverts simultanément alors que d'autres sont spécifiques à chacun des procédés.

Lors d'une soudure, la chauffe doit être localisée à l'interface du joint afin d'éviter une grande zone affectée thermiquement dans les adhérents. Or, pour une réparation il faut essayer de faire pénétrer la température au travers de toute l'épaisseur du matériau afin de réparer la plus grande épaisseur de matériau endommagé.

1.6.1 Chauffe

La qualité de la réparation ou de la soudure est influencée par la chauffe ainsi que le temps de chauffe. Une température élevée maintenue trop longtemps engendre la dégradation thermique du polymère. Cette dégradation peut aussi survenir localement dans les régions les plus chaudes d'une chauffe non homogène. Cette dégradation se caractérise par la scission de liens chimiques faibles unissant des chaines de polymères ainsi que par l'évaporation de composés dégradés (Raponi et al., 2018 ; Lionetto et al., 2017). Ces composés gazeux peuvent alors former des cavités dans le matériau et augmenter la porosité. La scission des liens cause une

réduction de longueur des chaines moléculaires et diminue l'enchevêtrement. Le mouvement des chaines est facilité. Ces deux conséquences diminuent l'ensemble des performances mécaniques du matériau.

Il est aussi important de s'assurer que la température redescende avant de relâcher la pression. Une coupure précoce de la pression peut mener à une déconsolidation et à la formation de pores dans la région venant d'être réparée ou soudée. S'il s'agit d'une installation fixe, cela veut dire qu'il faut attendre que la température soit inférieure à la Tg en tout point du matériau avant de relâcher la charge. Dans ce cas, il peut être pertinent d'ajouter une méthode de refroidissement pour diminuer le temps de cycle. S'il s'agit de soudure continue, il devient crucial de gérer ce refroidissement ainsi que la chauffe précédant le passage de la source de pression. Étant donné que la plupart des systèmes fonctionnent avec des rouleaux pour appliquer une pression, il y existe des pertes par convexion entre le passage de l'inducteur et le passage du rouleau. Une chauffe plus élever est recommandé pour compenser cette perte (*Voir* Figure 1.9). Or, si la chaleur est trop élever suivant le passage du rouleau, cette chaleur latente peut mener à la déconsolidation qui diminue la qualité du joint. Il est conseillé d'installer un système de refroidissement telle une buse à air comprimé dirigée vers la région située après la zone soudée (Mitschang, Rudolf, Neitzel, 2002 ; Lionetto et al., 2017).

Cette technique est idéale lorsque l'épaisseur du laminé est mince, une forte épaisseur n'est que peu sensible aux flux de chaleur causés par ces influences extérieures. Lorsque le laminé comporte des fibres ayant une nature d'isolant thermique telles que les fibres de verre, il se peut aussi que cela nuise à cette influence thermique extérieure.



Figure 1.9 Profil de chauffe pour soudure continue par induction (Bayerl et al., 2014)

1.6.2 Méthodes d'application de pression

Il existe plusieurs méthodes pour appliquer une pression permettant la reconsolidation sur un échantillon composite. Si l'installation est statique, il est possible de doter le système d'un piston pneumatique muni d'un régulateur et de contrôler la surface qui applique cette pression. On peut aussi utiliser une serre de fixation, mais la pression appliquée peut être plus difficile à contrôler. Dans tous les cas, une attention particulière doit être portée à la composition des matériaux du montage. Les matériaux conducteurs chauffent par induction et modifient le champ magnétique autour de l'inducteur. Il est donc conseillé d'éviter ou de distancier les matériaux conducteurs de l'inducteur (Stokes, 2003).

Lorsque l'installation est dynamique ou continue, une solution viable consiste à installer un rouleau (*Voir* Figure 1.10) qui suit l'inducteur. Ce rouleau tourne par friction avec l'échantillon. La chauffe, n'arrivant pas simultanément avec la pression, cause un front de déconsolidation suivi d'un front de reconsolidation en dessous du rouleau. De plus, il y aura une perte de chaleur causée par le délai entre l'inducteur et l'arrivée du rouleau. Cette perte

doit être compensée par une chauffe plus intense lors du passage de l'inducteur (Mitschang, Rudolf, Neitzel, 2002). Il est à noter qu'il vaut mieux diminuer la distance entre le rouleau et l'inducteur que de surchauffer. La surchauffe peut causer de la dégradation localisée lorsque la température est déjà élevée. De plus, une grande distance implique une plus forte perte de chaleur par convection. Cela pourrait nuire au contrôle de la température avant le passage du rouleau et donc nuire à la reproductibilité, en particulier si la température ambiante n'est pas régulée et que les pertes par convection sont ainsi variables. Certaines installations refroidissent le rouleau ou la surface la succédant avec des jets d'air comprimé afin d'enlever toute température résiduelle du laminé qui pourrait causer une seconde vague de déconsolidation (Mitschang, Rudolf, Neitzel, 2002).



Figure 1.10 Montage d'installation de soudure continue par induction (Bayerl et al., 2014)

Une alternative est l'usage d'ensachage sous vide. Cette méthode consiste à appliquer une pression uniforme sur toute la pièce, mais nécessite un environnement scellé de l'air ambiant (Mahdi et al., 2003). Cette technique se limite aux thermoplastiques avec une faible viscosité à haute température, qui nécessitent une faible pression de consolidation (pression atmosphérique) (Ahmed et al., 2006).

1.6.3 Amélioration de la qualité d'une soudure

L'ajout de film de polymère sur le site du joint a été publié dans la littérature comme une méthode valable pour améliorer la résistance du joint de soudure. Selon l'auteure d'une étude récente, Francesca Lionetto, un joint soudé par induction entre deux bandes de PEEK peut bénéficier d'une hausse de performance lors de la tenue de test de cisaillement à recouvrement simple *« lap shear »* de presque 6 MPa lorsqu'un film d'une épaisseur de PEEK est ajouté au joint préalablement à la soudure. Cette différence de performance peut être expliquée par le fait que la surface n'ayant pas de film présente des régions faiblement imprégnées en comparaison à l'échantillon doté d'un film qui ne présente pas ce manque de recouvrement. L'auteure suppose qu'il y avait une quantité limitée de matrice à la surface qui était disponible pour développer cette bonne adhésion aux fibres et que l'ajout du film pallie à ce manque (Lionetto et al., 2017).

1.7 Justification d'originalité du projet

Puisque le procédé de soudage par induction fait objet de secrets industriel il n'y a que peu d'ouvrage de disponibles qui utilisent les résines thermoplastiques présentes au niveau industriel. La résine utilisée dans les présents travaux pourrait parvenir à faire concurrence à l'époxy au niveau de ses propriétés mécaniques ainsi que de sa facilité à mettre en forme et offrir une option plus verte aux compagnies. Mais des propriétés similaires à l'époxy ne suffisent pas à justifier le changement d'une résine connue à une inconnue ; il doit y avoir un avantage clair. Cet avantage se situera plutôt avec les procédés qui sont associé à l'existence de ces résines ainsi que leurs composites.

Si la réparation et la soudure de composites thermoplastiques peuvent être mises en valeur par rapport aux méthodes de réparation par remplacement de pièce et de collage par adhésif, il devient plus avantageux de sélectionner l'option verte plutôt que l'opposé. Pour les composites thermoplastiques, il est possible de réparer sans utiliser de nouvelle matière et de souder sans utiliser de colle nécessitant des traitements de surface. La chauffe par induction est sélectionnée

comme méthode de chauffe puisqu'elle est intense, localisée et peut être incorporée à de divers contextes industriels. La chauffe intense produite par l'induction pourrait fournir un meilleur temps de cycle critique à l'incorporation de ces technologies. Or, la chauffe par induction n'est pas homogène à cause des effets de bords et plus la chauffe est intense, moins la chauffe est homogène. Il faut donc développer des techniques qui assurent l'obtention d'un joint ou d'une réparation homogène et mécaniquement performant tout en ne sacrifiant pas le temps de cycle.

Si les propriétés mécaniques obtenues avec ces procédés sont comparables à leurs homologues, l'induction a la possibilité d'être un avantage concurrentiel. Cette étude tente d'atteindre les performances requises lors de la réparation et de la soudure de composites thermoplastiques par induction pour faire mettre en valeur les avantages de ces procédés et promouvoir leur utilisation.

CHAPITRE 2

DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

Ce chapitre couvre les démarche technique et équipements utilisés au court du projet.

2.1 Méthodologie

L'étude est divisée en trois phases. La première phase porte sur la réparation, la deuxième et la troisième phases traitent de la soudure. Toutes les phases comportent un essai non destructif qui apporte des données supplémentaires aux prochains essais, puis un essai destructif qui vise à évaluer les propriétés mécaniques ultimes lors de la rupture d'un échantillon et une étape de validation des résultats obtenus. Les étapes de travaux sont présentées dans le schéma de la figure 2.1.

Dans le cas de la réparation, des captures de thermographie sont effectuées sur les échantillons lors des différentes étapes liées au processus de réparation. Ces échantillons sont impactés, puis réparés avant d'être compressés jusqu'à rupture dans un gabarit pour évaluer la qualité de la réparation. Cet essai, nommé compression après impact, évalue aussi un lot d'échantillon non endommagé et un lot d'échantillon impacté, mais pas réparé en plus du lot réparé tout juste mentionné. Par la suite, les valeurs obtenues de ces essais sont comparées aux valeurs des partenaires de projet du CDCQ avec leur méthode de réparation par lumière infrarouge. Leur méthode consiste en la chauffe du composite endommagé par lumière infrarouge dans un gabarit d'aluminium rigide puis la fermeture du moule et sa mise sous presse. Par la suite, le composite séjourne dans la presse jusqu'à son refroidissement complet.

Dans le cas des deux phases de projet liées à la soudure, les échantillons pour la soudure statique sont photographiés par une imagerie rayon X afin de produire un modèle 3D par tomographie et les échantillons soudés en continu sont évalués par micrographie. Par la suite, des essais de cisaillement sur des échantillons liés par un joint à recouvrement simple évaluent la résistance ultime en cisaillement. En plus des échantillons soudés par induction, deux autres lots sont ajoutés pour des fins de comparaison. Le premier lot est composé d'échantillons collés avec une colle industrielle utilisée par nos partenaires dans le but de comparer nos résultats avec ce qui est déjà présent et utilisé dans le marché. Le deuxième est composé d'échantillons qui ne sont ni souder ou collé ; ils sont plutôt moulés ensemble en une seule étape. Les échantillons de soudure statique et continue sont comparés à ces deux lots supplémentaires ainsi qu'entre eu pour estimer la qualité de soudure.

Type d'échantillon	Réparation	Soudure statique	Soudure continue	Collés	Moulés
Échantillon CAI	Х				
Triaxiale avec suscepteur		Х	Х		
Mat avec enduit gélifié		Х	Х	Х	Х
Triaxiale sans suscepteur				Х	Х

Tableau 2.1 Type d'échantillon selon lot d'échantillon



Figure 2.1 Schéma du plan d'étude

2.2 Montage de chauffe par induction

Le montage de chauffe par induction est composé d'une source inductrice « EASYHEAT LI » d'une puissance maximale de 10 kW avec une fréquence pouvant varier entre 150 et 400 Hz. L'inducteur est en forme d'épingle à cheveux en forme de « T ». Il est utilisé pour les réparations et la soudure statique. Un inducteur en forme d'épingle à cheveux en forme de « I » est utilisé pour les essais de soudure continue. Les deux inducteurs (*Voir* Figure 2.2) sont des tubes de cuivre creux permettant le refroidissement par de l'eau en circulation.



Figure 2.2 (a) Bobine épingle à cheveux en forme de « T » (b) Bobine épingle à cheveux en forme de « I »

Un concentrateur de champ magnétique dont la section est en en forme de «M» (*Voir* Figure 2.3) composé de Ferrotron 559H de la compagnie Fluxtrol est utilisé lors des essais afin de concentrer le champ magnétique dans le bas de l'inducteur, près du matériau à chauffer. La pâte thermique améliore le couplage thermique entre les deux composantes



Figure 2.3 (a) Concentrateur de flux magnétique (b) Concentrateur de flux magnétique qui entoure l'inducteur

La pression est appliquée sur le matériau à réparer ou souder par un vérin pneumatique de 2,5 po. Durant les essais de réparation et de soudure statique, l'extrémité du piston est une tête rectangulaire en acier et lors des essais de soudure en continu, il s'agit d'un rouleau en PEEK contenu dans un assemblage non conducteur. Finalement, une table linéaire actionnée par un petit moteur électrique rotatif avec une vis sans fin à bille fournit le mouvement longitudinal nécessaire aux essais de soudure continue.

Les échantillons ont passé une semaine à température et humidité ambiantes avant d'être réparés ou soudés. Le contexte industriel du projet cherche à présenter des résultats se rapprochant le plus possible des conditions rencontrées en usine et pour cette raison, il n'y a pas de séchage d'échantillons avant une opération de réparation ou de soudure.

2.3 Fabrication des stratifiés

2.3.1 Matrice

La matrice Elium 188 est utilisée dans toutes les constructions du projet. C'est une résine amorphe présentant une faible viscosité avant la polymérisation qui se situe à 100 cP. Cette faible viscosité permet de choisir le procédé d'infusion pour produire l'ensemble des échantillons du projet. Une analyse par calorimétrie à analyse différentielle (*DSC*, « *Differential scanning calorimetry* ») est effectuée par nos partenaires de recherche du CDCQ et présente la Tg du matériau à une température de 103,1°C. La matrice est infusée lors de sa polymérisation à température ambiante tel que prescrit par le fournisseur.

L'initiateur utilisé est le Luperox AFR-40 d'Arkema, il contient 40 % de peroxyde de benzoyle dissout dans une solution de phtalate de dibutyle. Une concentration de 4 % massique d'AFR-40 est mélangée à la solution d'Elium 188. La concentration finale obtenue correspond à un pourcentage de 1,6 % de peroxyde de benzoyle, toutefois, lors des tests de soudure en continu, la concentration est modifiée à 3 % d'AFR-40, pour obtenir une concentration finale de 1,2 % de peroxyde de benzoyle dans le but de suivre les recommandations d'une étude portant sur

l'influence de la quantité de l'initiateur (Raponi et al., 2018). Il a été avancé qu'un pourcentage massique de 1,2 % aboutirait en une masse moléculaire plus élevée et un indice de polydiversité plus faible. En somme, les chaines sont en moyenne plus longues et il y a aussi moins de variations de longueur par rapport à cette moyenne. Le fait d'avoir de longues chaines est associé à des propriétés mécaniques accrues (Hendlmeier et al., 2019).

2.3.2 Procédé d'infusion sous vide

Les échantillons sont produits en utilisant une méthode de moulage par transfert de résine sous vide à température ambiante puisque la matrice le permet. La matrice est infusée sous vide dans le renfort sur des surfaces planes préalablement nettoyées avec du « *Waterclean* » de Zyvax, puis traitée avec 4 couches de scellant « *Sealer GP* » de Zyvax et finalement 2 couches d'agent démoulant « *Chemlease # 41-90 EZ* » de Chem-Trend. Les temps et la méthode d'application de ces produits respectent les recommandations prescrites par les fournisseurs.

Les échantillons pour la réparation sont produits par RTM, soit par injection de résine sous vide dans un moule fermé en aluminium. Les échantillons pour la soudure sont produits par infusion sur une table de verre. Dans ce cas, les différents plis sont placés puis couverts d'une pellicule démoulante (« *Release film* » ou « *Peel ply* ») afin d'assurer un démoulage simple (*Voir* Figure 2.4). Par la suite, une couche de médium d'infusion (« *Distribution medium* » ou, plus précisément « *Greenflow* » dans le cadre du projet) est placée par-dessus afin de faciliter le cheminement et la bonne imprégnation de la résine. Lorsqu'un mat est utilisé comme renfort, il n'y a pas de médium d'infusion puisque le matériau choisi agit tel un médium d'infusion. Un tube d'un diamètre de 1/4" est connecté à un serpentin pour la sortie du vide ainsi que pour l'entrée de la résine. La sortie du vide est enrobée d'une pellicule ne laissant passer que l'air (« *Airflow* ») afin de s'assurer de ne pas pomper la matrice. Un ruban adhésif gommeux (« *Tacky tape* ») assure l'étanchéité avec une pellicule d'ensachage (« *Vacuum bag* » ou « *Bagging film* »). Le vide est connecté dans un piège à résine, afin de protéger la pompe à vide auquel ce réservoir se connecte. Le vide lors de l'infusion est tenu à une valeur de 15 po Hg, soit un demi-vide. Un vide plus élevé cause la vaporisation de composantes



contenues dans la matrice qui mène à une forme d'ébullition de la résine. Cette ébullition cause de la porosité et est non souhaitable.

Figure 2.4 (a) Montage de moulage par infusion de résine sous vide (El-Hajjar et al., 2013) (b) Infusion in-situ d'une résine Elium 188 à température ambiante

Lors des essais de soudure statique, le fini de surface des plaques composées de mat a fortement nuit à la qualité de la soudure. Afin de remédier à cette situation, une attention particulière est portée à la qualité de cette surface lors des essais de soudure continue. Pour ce faire, une plaque de PTFE préalablement découpée avec des rebords tronqués est placée au-dessus de la pellicule démoulante sur la surface se trouvant à l'opposé de la table lors de l'infusion.

Une scie à dent est utilisée pour la découpe des échantillons puisque les scies a diamant, normalement utilisé pour les composites thermodurcissables, deviennent inefficaces lorsque les résines thermoplastiques fondent et remplissent les éléments abrasif du disque. Ces plaques moulées ont des dimensions de 1,5 m x 1,5 m x 4 mm pour les essais de réparation et de 450 mm x 180 mm pour des épaisseurs de 2 mm et 3 mm pour les essais de soudure.

2.3.3 Échantillons pour réparation

Dans le cas de la réparation, des fibres de verre E sont utilisées en provenance de Texonic. Le renfort est composé de 2 plis de « TG-10-T » (tissu sergé 2x2), puis de 4 plis de « TG-33-N » (tissu tridimensionnel NC-PLY^{MC}) et 2 plis de « TG-10-T ». Les plis sont tous orientés selon l'axe longitudinal de l'échantillon, soit à $[0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}]$ (*Voir* Figure 2.5). La dimension de l'échantillon est en accord avec les standards d'essai d'impact ASTM D7136-12, soit de 150 mm par 100 mm avec une épaisseur de 4 mm.



Figure 2.5 (a) Orientation des plis d'un échantillon de réparation standard (b) Échantillon de réparation

2.3.4 Échantillons pour soudure

Dans le cas de la soudure, deux plaques de composition différentes sont produites afin d'être soudées ultérieurement et finalement testées selon les normes d'essais de cisaillement à recouvrement simple pour des plastiques renforcés (*« Single lap shear »*), soit ASTM D5868 (2014).

Un enduit gélifié est appliqué sur la première plaque afin de vérifier que le procédé n'affecte pas l'esthétisme de l'enduit et un suscepteur est intégré à l'autre. L'échantillon avec l'enduit gélifié est composé de 2 plis de « *polymat hi-flow* » (Mat) de la compagnie Scott & Fyfe.

L'enduit est appliqué sur la table. L'autre échantillon, ayant le suscepteur, est composé de 3 plis de « E-TLX 1900 » (tissage triaxial 0/45/-45) de la compagnie Vectorply. La face contre la table de verre de cet échantillon est munie d'un suscepteur, cela permet d'obtenir un beau fini de surface pour la face devant être jointe. Les épaisseurs sont respectivement de 3 mm et 2 mm.

Les fibres du tissage triaxial sont orientées à $[0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}]$ selon l'axe présenté à la figure 2.5. Du côté de la table de verre, il y a un film de matrice PMMA d'une épaisseur de 0,016" suivi du suscepteur. Le suscepteur varie de géométrie au travers des diverses itérations utilisées lors des d'essais de chauffe, mais est toujours composé d'un treillis de métal d'une largeur de 0,5", soit la distance de chevauchement du joint. Le treillis est de rapport 200x200 en d'acier inox 304. Le diamètre des brins et la dimension des mailles moyennes du grillage d'acier sont respectivement de 40,5µm et 86,5 µm.



Figure 2.6 (a) Orientation et composition des deux plaques d'un échantillon de cisaillement à recouvrement simple (b) Plaques lors du moulage

2.3.5 Échantillons consolidés

Les échantillons consolidés ont pour but de former des échantillons de cisaillement à recouvrement simple n'ayant pas besoin d'être unis ultérieurement. Les deux plaques qui sont normalement soudées ultérieurement sont donc jointes lors du moulage. Lors des essais suivants, ces échantillons représentent le résultat d'une soudure parfaite, puisqu'une union produite lors de la polymérisation sous vide représente une soudure ayant pleinement consolidé. Pour ce faire, les plis des deux supports sont combinés en un seul empilement rectangulaire ayant la longueur finale d'un échantillon de cisaillement à recouvrement simple et une largeur qui permet de découper un nombre suffisant d'échantillons. Entre la composition de la première plaque (Mat) et la composition de la deuxième plaque (à tissage triaxial), il y a une pellicule démoulante. Suite au moulage, une fraiseuse 3 axes découpe les régions excédentaires entourant le joint afin de permettre l'accès aux pellicules démoulantes. En retirant l'épaisseur excédentaire, les coupons de cisaillement à recouvrement simple sont formés (*Voir* Figure 2.7). Ils ont un chevauchement de 0,5". Cette fois-ci, il n'y a pas de suscepteur dans la construction.



Figure 2.7 (a) Étapes de production des échantillons moulés (b) Échantillon moulé

2.3.6 Échantillon collé

Dans le cas des coupons collés, les mêmes constructions et supports que lors des essais de soudure statique sont utilisés. Il n'y a pas de suscepteur, mais plutôt un adhésif Plexus MA310 qui respecte à la fois les recommandations du fournisseur ainsi que les recommandations de la norme ASTM D5868 (2014).

2.4 Procédés par induction

2.4.1 Réparation par chauffe par induction

Le montage pour la réparation (*Voir* Figure 2.8) est un assemblage fixe où l'échantillon est en contact direct avec le suscepteur et entouré de céramiques isolantes. Les céramiques isolantes ont une épaisseur de 0,4 po et sont composées d'un mélange d'époxy et de sable. La distance entre le premier suscepteur et l'inducteur est minimisée afin d'améliorer sa génération de chaleur. La pression est appliquée sur le concentrateur de flux magnétique par le cylindre pneumatique, de manière à ce qu'elle se transfère ensuite à la céramique du dessus. Le suscepteur du dessus est une feuille de 6 po x 3,5 po x 0,045 po en acier inoxydable 304 ayant été nettoyée avec du « *Waterclean* » de Zyvax, puis traitée avec 4 couches de scellant « *Sealer GP* » de Zyvax et finalement avec 2 couches d'agent démoulant « *Chemlease* 41-90 EZ » de Chem-Trend. Cette feuille d'acier permet, lors de la réparation, de rentrer les lots de fibres extrudant des échantillons impactés et d'accomplir une réparation avec une surface plus régulière.

Des essais préliminaires ont démontré la nécessité d'utiliser deux suscepteurs, l'un sur le dessus, de l'échantillon et l'un sur le dessous, afin de garantir une température suffisamment élevée au centre de l'échantillon. Celui du dessus, le plus proche de l'inducteur est nommer proximale et celui du dessous, le plus éloigner de l'inducteur est nommé distal. De plus, un échangeur de chaleur à air est placé dans la construction de la céramique sur le suscepteur le plus proche de l'inducteur. Il y a une grande différence de température entre le suscepteur proximal et distal de l'inducteur, cette différence peut mener à une surchauffe bien que la

température moyenne dans l'échantillon n'atteigne pas la cible visée. Afin de mieux contrôler cet effet, un assemblage de 12 feuilles de treillis d'acier inox 200x200 entouré dans du ruban adhésif Kapton® est utilisé en tant que suscepteur distal. Cet assemblage a prouvé lors d'essais préliminaires une meilleure capacité de production de chaleur. Le ruban adhésif Kapton® empêche le fluage de la matrice dans le grillage et ne risque pas de se dégrader grâce à sa température maximale d'utilisation de 400°C. Les détails de ces essais sont discutés plus tard au chapitre « Résultats et discussion ».



Figure 2.8 (a) Schéma du montage initial (b) Montage de réparation

Les paramètres de réparation finaux sont situés à un ampérage de 370 A, une fréquence de 256 kH, une force de contact de 650 N avec un cycle de chauffe de 6 minutes et un cycle de refroidissement de 4 minutes.

2.4.2 Soudure statique

Pour le montage de soudure statique, un gabarit de maintien imprimé en 3D à partir d'ABS assure un bon positionnement des paires d'échantillons de soudure, ainsi qu'un bon alignement avec l'inducteur (*Voir* Figure 2.9). Des céramiques sont placées afin de combler les vides et de diminuer les pertes de chaleur par conduction et par convection. Une cale ayant une dimension de 12,7 mm x 25,4 mm x 2 mm est placée entre l'inducteur et l'échantillon afin d'assurer que les échantillons puissent s'écraser s'il y a éjection de résine et réduction de l'épaisseur lors de la soudure. Si cette cale n'est pas présente, il y a un risque que l'inducteur s'appuie sur le gabarit et que la pression ne soit pas totalement transférée à l'échantillon. Pour permettre ce mouvement, la céramique inférieure est de plus faible épaisseur que l'échantillon adjacent. Une petite cale de mousse est insérée sous cette céramique de manière à pouvoir s'écraser sous la pression, mais permettre un contact lors du début de la soudure. Ces essais utilisent une chauffe à 260A durant 10 minutes, suivi d'un refroidissement de 5 minutes. Trois lots d'échantillons soudés sont produits avec une pression respective de 0,5 MPa, 0,1 MPa ou 0,05 MPa.



Figure 2.9 (a) Schéma du montage de soudure statique (b) Photo du montage de soudure statique

2.4.3 Soudure en continu

Pour le montage de soudure continue, deux grandes plaques de composite d'une longueur de 430 mm sont soudées puis découpées en échantillons de cisaillement à recouvrement simple. Afin d'assurer un bon positionnement, un gabarit en bois est produit à l'aide d'une fraiseuse numérique 3 axes. Lors de la soudure, l'inducteur est tenu en contact sur l'échantillon afin de diminuer la distance avec le suscepteur et d'augmenter la puissance de chauffe (*Voir* Figure 2.10). La distance entre l'inducteur et le suscepteur est de 6 mm.



Figure 2.10 (a) Schéma du montage de soudure continue vue de face (b) Photo du montage de soudure continue (c) Schéma du montage de soudure continue vue de profil

Un rouleau applique une pression suite au passage de l'inducteur et consolide le joint. Le rouleau et son assemblage sont faits en « PEEK » qui est suffisamment rigide pour ne pas se déformer de façon importante lorsque la force de compression est appliquée et aussi afin de ne pas chauffer par induction. La distance entre l'inducteur et le rouleau doit être minimale, puisqu'il existe une zone entre les deux composantes où le suscepteur ne génère plus de chaleur, mais qu'il existe une perte par convection. Ces pertes forcent l'inducteur à produire une plus haute température afin de compenser pour l'énergie qui est dissipée avant le passage du rouleau. Le rouleau est placé de manière à toucher le concentrateur de flux magnétique, et le point de contact du rouleau. Les échantillons sont tenus en place par 4 serres en « C » en époxy ou par du ruban adhésif. Le suscepteur est composé de 3 bandes de treillis d'acier inox superposées ayant une largeur diminuant entre chacune des bandes (*Voir* Figure 2.11). Les paramètres de soudure finaux sont situés à un ampérage de 700 A, une fréquence de 256 kHz, une force appliquée sur le rouleau de 400 N et une vitesse d'avance de 9 mm/sec.



Figure 2.11 (a) Schéma des treillis d'acier inox (b) Intégration du treillis dans la composition de l'échantillon

2.5 Caractérisation de l'endommagement

2.5.1 Essais de compression après impact

La validation de la qualité de la réparation s'effectue par un essai destructif de compression après impact (*Voir* Figure 2.12). Les échantillons sont tout d'abord endommagés par une tour à impact, puis sont placés dans un gabarit selon la norme ASTM D7137 et compressés par une machine Instron 5900R 5584 jusqu'à la rupture.



Figure 2.12 (a) Montage d'essai CAI (b) Gabarit de compression d'échantillon Adapté d'ASTM D7137 (ASTM International, 2017)

L'endommagement des échantillons est produit par une tour à impact Ceast 9350 de la compagnie Instron. Dans la tour à impact, un montage fixe en place l'échantillon afin d'obtenir la même position des sites d'endommagement ainsi qu'une rigidité appropriée, en vue d'assurer la répétabilité des essais (*Voir* Figure 2.13). L'impact a une force de 80 J et est effectué par un impacteur à tête hémisphérique d'un diamètre de 16 mm fait en acier inoxydable. L'acquisition numérique est faite avec une carte d'acquisition Ceast DAS 64 k.



Figure 2.13 Montage de fixation d'échantillon pour essai d'impact Adapté d'ASTM D7136M-12 (ASTM International, 2012)

Trois lots de coupons sont produits soit le lot de référence, qui n'est pas endommagé avant l'essai destructif, le lot endommagé par impact avant l'essai destructif et le lot endommagé par impact, puis réparé avant l'essai destructif. Un logiciel suit la position selon la force appliquée et permet de mesurer la force en compression ultime des coupons.

2.5.2 Thermographie avec lampe infrarouge

Pour suivre l'évolution de l'endommagement, des thermographies sont effectuées avant l'impact, après l'impact, après la réparation et après la rupture finale lors des essais de réparation. Le gabarit pointe une caméra thermique FLIR T630sc vers une lampe infrarouge. L'échantillon y est inséré entre la caméra et la lampe (*Voir* Figure 2.14). Une vidéo est démarrée simultanément à l'activation de la lampe infrarouge. En chauffant la face opposée à la lampe, il devient possible d'observer les défauts liés à la délamination puisque les séparations physiques créées par ces défauts nuisent à la propagation de la chaleur et se présentent en zone froide. Les impacts de 80 J utilisés engendrent des dommages suffisamment sévères pour bien fonctionner avec cette technique. Cette méthode peut être appliquée si les défauts sont de l'échelle macroscopique, car la diffusion de la chaleur a tendance à cacher les régions froides qui proviennent de défauts microscopiques.



Figure 2.14 Montage de thermographie

2.6 Caractérisation des joints soudés

2.6.1 Essai mécanique de cisaillement sur échantillon de joint à recouvrement simple

L'essai de cisaillement à recouvrement simple « *Lap shear* » (*Voir* Figure 2.15) applique une tension aux extrémités de deux échantillons rectangulaires unis par le centre. Il est possible par la suite d'évaluer la contrainte nécessaire pour rompre l'entièreté du joint en divisant la force maximale par la surface de chevauchement unie entre les deux parties de l'échantillon.



Figure 2.15 (a) Échantillon d'essai de cisaillement à recouvrement simple typique (b) Échantillon dans machine de traction bicolonne Alliance RF/200 (Awaja, 2016)

Il est recommandé d'utiliser des mors désaxés ou des cales afin de réduire l'influence du moment de flexion causé par la forme des coupons. Il faut aussi porter attention à la rigidité des deux supports liés ensemble s'ils n'ont pas la même composition ou épaisseur (tel que dans le cas de cette étude). La différence de rigidité peut causer une déformation qui influence la géométrie du joint, en lui donnant une forme de « S ». Un tel comportement ajoute une contrainte de pelage (Silva et al., 2006) (*Voir* Figure 2.16) qui fausse les résultats. Selon une analyse ANOVA de l'étude, la distance de chevauchement acompte pour 77,5 % de l'influence des résultats en comparaison à 12,2 % lié à la rigidité du renfort et 0,9 % d'influence pour l'adhésif (voir t'étude pour l'influence des paramètres non indiqués dans ce texte). La distance de chevauchement entre les deux coupons est de 0,5" plutôt que le 1 po recommandé afin de limiter l'effet de pelage (Silva et al., 2006).



Figure 2.16 Joints à recouvrement simple testés à des chevauchements de 12,5 mm, 25 mm et 50 mm ayant des supports d'acier à (a) faible résistance (b) résistance intermédiaire (c) forte résistance (Silva et al., 2006)

Lors des essais de soudure statique et de joint collé, une machine de traction Instron 5900R 5584 a été utilisée avec des mors translatables et lors des essais portant sur les échantillons moulés ainsi que soudés en continu, une machine de traction Alliance RF/200 de MTS a été utilisée avec des cales collées à l'époxy aux extrémités agrippées par les mors. Les essais ont suivi la norme ASTM D5868 (ASTM International, 2014).

2.6.2 Tomographie par rayon X

La tomographie est une technique où une prise d'images successives est utilisée afin de reconstruire numériquement un volume. Il devient alors possible avec les images 2D tirées d'imagerie à rayons X de former un modèle tridimensionnel des structures internes d'une pièce si ces structures ont différentes densités par exemple ; la porosité contenue dans un échantillon. Tout comme pour le contraste dans la photographie standard, la densité définit la luminosité d'un objet. La faible densité de la matrice peut ressembler à une région poreuse lorsque l'étendue des densités est mal calibrée. Un autre défi peut survenir lorsque deux matériaux ayant une grande différence de densité sont analysés telle la résine et le treillis d'acier utilisé dans cette étude. Similaire encore à la photographie standard, si une image contient à la fois une zone d'intérêt sombre et une zone d'intérêt clair, il devient plus difficile de mettre en valeur l'une des deux zones sans nuire à la visibilité de l'autre. L'ajustement de cette étendue est critique afin d'être en mesure de distinguer les porosités de la résine. La machine utilisée est une « XT H 225 » de Nikon et le logiciel de tomographie et d'analyse sont respectivement « Dragonfly » et « VGStudios Analysis workstation » (Voir Figure 2.17). Un exemple visuel d'un modèle traité dans VGStudios analysis est présenté dans la figure 2.17, b ; la partie finement grillagée blanche est le suscepteur en acier inox et les couleurs représentent différents réseaux de volumes poreux.



Figure 2.17 (a) Source émettrice de rayon X dirigée vers les lots d'échantillons fixés sur une table rotatrice (b) Section d'un joint soudé

Pour obtenir un modèle 3D des échantillons, un intervalle 0,5 mm est placé des deux côtés du centre du joint afin de former une zone rectangulaire d'analyse. Cette zone est, par la suite, étirée afin de former un volume d'analyse qui englobe le joint. La tomographie permet de trier les volumes internes de cette zone d'intérêt selon leur densité de cette manière il est possible d'isoler les porosités et de calculer leur fraction volumique au joint.

Dans le cas présent, trois échantillons de cisaillement à recouvrement simple ayant été soudés par induction de manière statique sont analysés simultanément. Les trois échantillons sont joints avec une pression différente, avant d'être analysé simultanément. Le logiciel permet, par après, de séparer ces trois échantillons en trois différents modèles 3D.

2.6.3 Thermographie lors de soudure

Des essais à l'aide d'une caméra thermique sont effectués sur les échantillons de soudure contenant un suscepteur afin de contourner les difficultés de prise de mesures liées à l'usage de thermocouples à proximité d'un champ magnétique. La caméra thermique est une *« VarioCAM*® *HD head 900 »* et le logiciel d'imagerie thermique est *« IRT Analyser 5.6 » (Voir* Figure 2.18).



Figure 2.18 Camera thermique à proximité du montage de soudure (gauche) et exemple de données d'IRT analyser 5.6 (droite)
Ces essais visent à capter les gradients de température des différents suscepteurs utilisés dans le projet afin de fournir une deuxième méthode de vérification des données. Pour ce faire, certaines modifications sont nécessaires. Premièrement, la plaque du dessus ayant l'enduit gélifié noir doit être enlevée afin d'avoir une bonne visibilité de la chauffe dans le suscepteur. Cela représente un changement important quant à la dissipation de chaleur puisque l'autre plaque agit normalement en tant qu'isolant thermique. Deuxièmement, la résine Elium est transparente, ce qui peut nuire à la lecture et l'étalonnage de la caméra. Afin de pallier à ces défis, les échantillons sont peints de couleur noir mât du côté de la face observée, cela assure aussi que l'émissivité ne varie pas entre chacun des essais une fois qu'elle est corrigée.

Avant de faire les tests, la température ambiante est vérifiée et l'émissivité est corrigée selon la norme ASTM E1933-14 (ASTM International, 2018) à l'aide d'une plaque chauffante et de thermocouples. La température voulue est trouvée à une émissivité de 0,96. Lors de l'étalonnage, la peinture de couleur noir mât agît en tant que simulateur de corps noir d'où le chiffre élevé que l'on observe pour l'émissivité. L'essai est effectué à une intensité de 400 A et à une vitesse de 3 mm/sec.

2.6.4 Micrographie

Des échantillons provenant de joints soudés sont découpés puis figés dans des rondelles d'époxy. Ces rondelles sont par la suite polies avec des papiers sablés de plus en plus fins sur une table de polissage (*Voir* Figure 2.19). Les rondelles passent à travers de papiers ayant successivement 80, 120, 240, 600 et 1000 grains par pouce carré. Lorsque le fini de surface est satisfaisant, les échantillons sont placés en dessous d'un microscope Olympus GX51 et analysés.



Figure 2.19 (a) Microscope Olympus GX51 (b) Section d'échantillon Elium/fibre de verre endommagée par impact (agrandissement de 6,7x)

Lors des essais de soudure continue, des échantillons ayant été soudés en même temps que les échantillons prévus pour les essais de cisaillement à recouvrement simple sont découpés afin de révéler l'apparence d'une section située au centre du cordon de soudure. Les images sont par après traitées par un logiciel de traitement d'image, nommé Fiji afin de définir le pourcentage approximatif de porosités au joint. La micrographie permet aussi d'identifier les sites de formations de porosité et de mieux comprendre l'influence des divers effets thermiques associés à la chauffe par induction.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre traite des défis, méthodes trouvés ainsi que des résultats obtenues pour la réparation et la soudure de composites thermoplastiques.

3.1 Réparation

Cette section se concentre sur la réparation de composites thermoplastiques. A cause de l'épaisseur de 4mm sélectionné, une stratégie doit être mit au point pour contourner les défis lié à la chauffe par induction.

3.1.1 Développement d'une méthode de chauffe

Les premiers essais effectués démontrent qu'il est impossible d'obtenir une température suffisante au milieu de l'échantillon avec un seul suscepteur situé à la surface supérieure. Afin de parer à cette faiblesse, un deuxième suscepteur est ajouté de l'autre côté de l'échantillon (*Voir* Figure 3.1). Le suscepteur le plus proche de la source, le suscepteur proximal, est sujet à une forte chauffe par rapport au suscepteur éloigné, le suscepteur distal, en raison de l'épaisseur de l'échantillon et du champ magnétique affecté par le premier suscepteur. Selon l'équation 1.2, le suscepteur distal est soumis à un champ magnétique 2,18 fois moins grand que le proximal. Le défi est d'obtenir une chauffe suffisante du suscepteur distal pour favoriser l'atteinte d'une température adéquate au centre de l'échantillon, tout en évitant une chauffe trop importante du suscepteur proximal qui peut donner lieu à la dégradation du polymère à la surface de l'échantillon.



Figure 3.1 (a) Schéma du montage à doubles suscepteurs (b) Photo du montage à doubles suscepteurs

Les essais effectués après l'ajout d'un deuxième suscepteur confirment que ce gradient peut causer de la dégradation, bien que la température moyenne de l'échantillon n'atteigne pas la cible de 200°C proposé lors de la revue de littérature. Il faut alors diminuer la température du dessus tout en augmentant la température du dessous.

La céramique du dessus est percée et transformée en un simple échangeur de chaleur par l'ajout de tubes amenant un afflux d'air (*Voir* Figure 3.2), ce qui a pour effet de refroidir le suscepteur proximale. La circulation d'air alterne de direction entre les canaux, de manière à limiter le gradient de refroidissement d'un côté à l'autre de la céramique. En revanche, le distributeur pneumatique, étant à la fois utilisé par le vérin et l'échangeur de chaleur, limite la capacité de refroidissement maximale. Un refroidissement plus intense permet d'augmenter l'intensité du champ magnétique sans que la surface du dessus ne se dégrade et de supporter une meilleure chauffe du suscepteur distal. Suite à cette modification, il s'avère que la cible de température n'est pas encore atteignable. La limitation relative au refroidissement nécessite de chercher une solution approfondie au niveau du suscepteur distal. Il est alors proposé de faire varier la géométrie des suscepteurs. C'est ainsi que l'épaisseur des feuilles d'acier est modificé.



Figure 3.2 (a) Schéma du montage avec échangeur de chaleur (b) Photo du montage avec échangeur de chaleur

Lorsqu'une feuille de métal plus mince est utilisée comme suscepteur, la chauffe se propage plus rapidement, mais de façon plus hétérogène et la limite maximale de température diminue. Le fait d'augmenter l'épaisseur a un effet inverse : la chauffe est homogène avec un pic de température maximale plus élevé, mais au prix d'une chauffe lente. Il a été aussi remarqué que le champ magnétique induit par le suscepteur proximal peut influencer négativement la chauffe du suscepteur distal lorsqu'il s'agit d'une feuille d'acier trop épaisse. Aucun de ces scénarios ne propose de solution pour résoudre le problème rencontré ; il faut trouver une nouvelle approche. Dans la littérature, l'utilisation de treillis d'acier inoxydable de faible épaisseur est courante lors de soudure par induction et peut présenter un intérêt pour la réparation.



Figure 3.3 (a) Schéma du montage avec suscepteur distal de treillis (b) Suscepteur fait d'un assemblage de 12 feuilles de treillis 200x200 d'inox 304 chemisées de Kapton®

Un assemblage de treillis d'acier est entouré de Kapton® (*Voir* Figure 3.3). Lorsqu'il y a plus de treillis d'inox, la température maximale ainsi que l'intensité de génération croissent, tout en ayant peu d'influence négative sur le gradient de température. Ce comportement a mené à une nouvelle idée de montage qui est parvenue à atteindre la cible de température moyenne. De plus le temps de cycle est de 6 minutes de chauffe et 4 minutes de refroidissement.

Les raisons expliquant cette différence de comportement entre les matériaux pleins et les treillis n'ont pas été analysées en profondeur, mais plusieurs hypothèses sont émises. La principale raison de cette différence relève probablement de la profondeur de pénétration du champ magnétique tel que montré dans l'équation 1.1. Les feuilles de métal utilisées sont trop épaisses et le champ magnétique induit subit une forte perte d'intensité à partir d'une profondeur critique ; une partie de l'épaisseur ne contribue pas à la chauffe et agit en masse thermique, voire en puits de chaleur. Les treillis ayant une faible épaisseur ne peuvent dépasser ce seuil et ne sont pas sujets à ces effets négatifs lorsque le nombre de feuilles de treillis est augmenté. Mais, une autre raison contribue probablement à cette différence, les sous-mécanismes de la chauffe de Joule présents dans les treillis, telles la chauffe par résistance de contact et la chauffe diélectrique entre les fibres d'acier, produisent des sites de forte chauffe localisés aux intersections. Cette hausse localisée de chaleur cause une augmentation de la résistivité qui engendre une hausse de production de chaleur créant une boucle rétroactive positive par rapport au rythme de chauffe. Dans les feuilles d'acier, ce volume est plein et lorsqu'une région atteint localement une résistivité plus élevée, le courant favorise alors un passage vers une région plus froide. En forçant le courant à circuler dans des régions ayant une résistivité plus élevée dans les fibres du treillis, le rythme de chauffe croit plus rapidement. Il est aussi possible que le rapport volume/surface joue contre les feuilles d'acier de plus faibles épaisseurs et les treillis puisqu'ils présentent une grande surface de dissipation de chaleur par rapport à leur capacité thermique. Cela pourrait expliquer la difficulté des plaques d'acier mince à atteindre la température voulue. Mais, à la température visée, les mécanismes de chauffe l'emportent pour les treillis.

3.1.2 Évaluation de l'endommagement par impact

L'énergie d'impact sélectionnée de 80 J représente un impact relativement sévère pour les composites utilisés dans cette étude. La raison motivant ce choix est justifiée par une étude accomplie par nos partenaires de recherche du CDCQ (Society for the Advancement of, M., & Process, 2018). Un impact ayant une trop faible énergie ne causait pas suffisamment de dégâts au matériau pour qu'il soit facile de distinguer l'influence de l'endommagement lors des essais de compression après impact. Afin de mieux constater l'influence de la réparation et de l'endommagement généré lors des essais non destructifs, il a été décidé d'employer une forte énergie. En revanche, cela implique aussi qu'une partie de l'endommagement se situe au niveau du bris des fibres composant le matériau. Un tel dégât ne peut pas être réparé et la récupération des propriétés mécaniques est donc limitée à un seuil qui est difficile à estimer. Ce seuil n'est pas estimé, la présente étude tente plutôt de produire la réparation en se comparant aux résultats obtenus avec nos partenaires de recherche tout en essayant d'obtenir un temps de cycle plus favorable.

Lors d'un impact contrôlé, une énergie initiale (Ei) est fournie à l'échantillon par la combinaison de vitesse et de masse contrôlées. À partir de cet impact, l'énergie est emmagasinée dans le matériau sous forme de déformation élastique et plastique. Une partie de l'énergie est dissipée (Ed) sous forme de pertes de chaleur causées par la vibration en jonction avec de multiples mécanismes complexes qui dépendent de la nature des matériaux ainsi que de leurs interactions (Rydin, 1996). Une autre partie de l'énergie peut être absorbée (Ea) par le matériau sous forme d'endommagement et de déformation plastique si l'énergie fournie est suffisante pour endommager l'échantillon. Les surcharges localisées causées par l'impact peuvent engendrer des bris de fibres ou de lots de fibres, des glissements de fibres par décohésion, des fissures, de la délamination ou même des changements de topologie au niveau de la plaque, voire une perforation ou l'expulsion de fibres.

Suite à l'impact initial, l'énergie élastique emmagasinée par l'échantillon est retournée en réaction à la sonde sous la forme d'un rebond. Une lecture de ces données comparée à l'énergie

fournie initialement permet d'évaluer la somme de l'énergie absorbée et dissipée lors de l'impact initial. Afin de simplifier l'interprétation des résultats, la dissipation est considérée comme étant négligeable. Le rapport final E_a/E_i permet d'avoir une forme de mesure de l'intensité de l'endommagement d'un échantillon.

Au total 28 échantillons sont impactés, le rapport E_a/E_i moyen est de 0,68 avec un écart-type de 0,02. L'écart-type obtenu permet de s'assurer que l'endommagement est assez similaire entre les échantillons pour poursuivre les essais. L'endommagement cause de la délamination apparente et expulse, voire brise, des lots de fibres au niveau du site d'impact (*Voir* Figure 3.4).



Figure 3.4 Endommagement typique des échantillons suite à un impact de 80 J (a) Face impactée (b) Face opposée

Ces lots de fibres ayant rompu ne contribuent plus aux propriétés mécaniques de manière permanente après la réparation. Or, ces lots peuvent tout de même être replacés dans la plaque de manière à retrouver une géométrie extérieure similaire à la plaque d'origine (*Voir* Figure 3. 5, a). L'arrière de la plaque réparée révèle tout de même des lots de fibres au niveau du site où l'extrusion était la plus prononcée (*Voir* Figure 3.5, b) bien qu'on ne les ressent pas au toucher. La présence de cette cicatrice est sûrement due au fait que l'impact a éjecté de la résine en surface, mais que la chauffe et la réparation n'ont pas engendré un fluage de résine suffisant pour réimprégner les fibres externes.



Figure 3.5 Apparence suite à la réparation (a) Face avant (b) Face arrière

3.1.3 Essais destructifs de compression après impact

D'après les essais de compression après impact, les résultats moyens présentent une baisse de performance en compression de 21,5 % entre les échantillons non endommagés et les échantillons impactés. Suite à la réparation, il est possible de restaurer 13,8 % des propriétés mécaniques précédemment dépréciées par l'impact. Au final, le matériau ne subit qu'une dégradation de 7,7 % de ses performances mécaniques initiales (*Voir* Figure 3.6). De cet endommagement, une partie est attribuable aux lots de fibres qui se sont rompues. Cela pourrait indiquer que la réparation de la zone délaminée est plus efficace que ce qui est mesuré. Mais, la présente étude n'offre pas de méthode pour évaluer la proportion de fibres ayant cassées suite à l'impact.



Figure 3.6 Contrainte apparente de rupture en compression après impact

En revanche, il est impossible de ne pas souligner le fort écart-type présent suite à l'endommagement ainsi qu'après la réparation. Bien que l'ordre de grandeur de l'écart-type soit faible par rapport à la moyenne, il subsiste qu'il représente une forte partie de la variation des propriétés mécaniques lors des essais. Puisque les échantillons de référence ne présentent pas cette forte variation malgré leur faible nombre et que tous les échantillons proviennent d'une même plaque, il est possible d'avancer que l'impact est lié à cette incertitude. Or, si l'endommagement est concrètement réparé, cette variation devrait redescendre. Mais, ce n'est pas le cas. Il est possible que l'utilisation d'une grande force d'impact induise une incertitude face aux bris de lots de fibres, les fibres brisées ne pouvant pas être réparées pourraient aider à expliquer pourquoi la réparation semble conserver le même ordre de grandeur au niveau de l'écart-type. Le prochain tableau présente et compare les résultats de nos partenaires avec ceux de cette étude par rapport à la réparation de composite Elium avec une méthode de chauffe par infrarouge.

En comparaison, les partenaires du CDCQ ont obtenues des valeurs de 187,4 MPa pour leurs échantillons de référence (*Voir* Tableau 3.1). Suivant l'impact de 80J, ils ont subi une baisse de 18,6% de performances mécaniques et suivant la réparation, les propriétés retournent à une valeur 7,4% moins élevé que les essais de références. Les résultats mécaniques sont fort similaires bien que la présente méthode bénéficie d'un avantage de 4 minutes 30 secondes sur le temps de réparation.

Affiliation	Contrainte apparente Référence (MPa)	Contrainte apparente Après impact (MPa)	Contrainte apparente Après réparation (MPa)	Temps de cycle de réparation
CDCQ	187,4	152,5	173,5	14 m 30 sec
ETS	187,3	147,0	172,9	10 m 00 sec

Tableau 3.1 Comparaison des performances mécaniques CAI et du temps de cycle avec les résultats des partenaires du projet

3.1.4 Suivi de l'endommagement par thermographie

Des vidéos d'imagerie thermique sont captées entre chacune des étapes des essais CAI afin de suivre la progression de l'endommagement précédant leur rupture finale. De ces vidéos, des images permettant de mettre en évidence l'aspect macroscopique de l'endommagement sont utilisées afin de mieux comprendre l'étendue des dégâts ainsi que la qualité de la réparation.

Il est possible d'observer l'influence de l'impact en constatant les zones froides (bleu) situées au centre des coupons (*Voir* Figure 3.7). Cette zone froide existe car les défauts, causant une forme d'espacement, telle la délamination, créaient une poche d'air qui agit comme un isolant à la propagation de la chaleur. Ces images permettent de constater qu'il y a plusieurs régions où la température varie dans la zone froide. Cela provient du fait que les régions les plus éloignées du site d'impact sont moins endommagées, il y a un gradient d'endommagement.



Figure 3.7 Image infrarouge d'un échantillon CAI (a) après l'impact de 80 J (b) après la réparation (c) après la rupture finale lors de l'essai CAI

L'impact se propage telle une onde de choc dans l'épaisseur de l'échantillon et implique une surface d'endommagement grandissante lors de son passage entre chacun des plis. Or, il faut se rappeler que l'imagerie thermique par transmission donne un aperçu de l'entièreté de l'endommagement et superpose donc visuellement les sites endommagés, ce qui complexifie l'évaluation de l'endommagement localisé à la surface d'entrée de l'impact par rapport à la surface de sortie. Lors des essais, la surface d'endommagement détectée par infrarouge était supérieure de 16,9 % à la surface visible lors de l'inspection visuelle (*Voir* Figure 3.8), mais l'écart-type remet en doute la certitude d'un avantage de l'inspection par infrarouge. En

revanche, la résine Elium, étant clair et semi-transparente, facilite la détection des dégâts, particulièrement à la marque de sortie. Un échantillon en fibre de carbone bénéficie davantage de ce type d'inspection, vu que cette information ne pourrait être décelée visuellement à cause de l'opacité du composite.



Figure 3.8 Surface endommagée selon le type d'inspection visuelle

Il est possible de constater une diminution de 44 % de la surface d'endommagement suite à la réparation (*Voir* Figure 3.8). Or, le pourcentage de recouvrement des propriétés mécaniques des essais CAI indique une amélioration de 64 %. Un modèle sommaire et grossier est proposé afin d'établir une meilleure relation entre les propriétés mécaniques et les images thermiques. L'objectif de ce modèle est de servir de base à d'éventuels travaux futurs.

Selon la méthode D7136 de l'ASTM (ASTM International, 2017), la contrainte en compression est obtenue en divisant la force maximale par la surface de la section de l'échantillon. Un échantillon endommagé cède donc à une force plus faible qu'un échantillon de référence et l'ampleur de la dégradation des propriétés mécaniques dépend de la gravité de l'endommagement. La norme considère que la section demeure constante.

Afin de pouvoir intégrer les mesures captées lors de l'imagerie thermique, il faut ajuster la perspective de cette équation. Il faut plutôt considérer que l'impact, comme dans le cas de l'endommagement par fatigue, produit un endommagement qui réduit la surface contribuant

aux propriétés mécaniques. Cette diminution de surface force la charge à se redistribuer dans les structures adjacentes. La surcharge qui en découle est ce qui entraine la rupture précoce de l'échantillon. À partir de l'équation mentionnée précédemment, un ratio de surface est appliqué dans le but d'ajuster la contrainte maximale d'un échantillon endommagé ou réparé (3.1). Mais cette contrainte maximale est inconnue pour un échantillon, car les essais CAI engendrent la rupture des échantillons. Afin d'évaluer les contraintes maximales théoriques de ces échantillons, il faut utiliser la force moyenne obtenue lors des essais de référence (3.2). Les équations sont les suivantes :

$$\sigma_{Impacté ou réparé} = \sigma_{Max Théorique} * \frac{S_{intacte}}{S_{initiale}}$$
(3.1)

$$\sigma_{max Théorique} = \frac{F_{moyenne \, référence}}{S_{initiale}} \tag{3.2}$$

Afin de définir la surface intacte après l'impact, il faut évaluer la surface endommagé révéler par l'imagerie infrarouge. Or, l'endommagement varie, il est possible de le remarquer physiquement sur les échantillons ; la surface de la marque à l'entrée de l'impact est plus petite que celle à la sortie. Pour prendre en compte cette variation, une moyenne entre la surface d'entré d'impact et celle de sorti est ajouté (*Voir* Figure 3.9).



Figure 3.9 (a) Échantillon impacté (b) Schéma présentant les variables présentes dans l'équation 3.3

Une première équation est proposée afin d'évaluer la surface intacte :

$$S_{intacte} = S_{initiale} - e * \left(\frac{L_{entrée} + L_{sortie}}{2}\right)$$
(3.3)

Or, l'imagerie thermique par transmission ne révèle qu'une vue superposée de l'endommagement. Alors, les mesures sont fournies par l'inspection visuelle pour obtenir la largeur d'entrée. Lorsque l'échantillon est réparé, on suppose que la largeur d'endommagement est nulle puisqu'il semble y avoir résorption totale de la cicatrice laissée par l'impacteur (*Voir* Figure 3.10).



Figure 3.10 (a) Échantillon réparé (b) Schéma supposant un endommagement nul au site d'impact suite à la réparation

Puis, il est proposé qu'il existe aussi une variation d'intensité de l'endommagement au travers de la largeur d'une même face. Le site où l'endommagement est le plus sévère (bleu foncé) est considéré comme un endommagement sévère où un site qui ne contribue plus aux propriétés mécaniques. Les extrémités sont considérées comme présentant un gradient d'endommagement. Un facteur de compensation est ajouté à l'équation afin de prendre en compte cette variation. Cette variation est considérée comme étant constante entre le site d'entrée ainsi que celui de sortie de l'onde de choc (*Voir* Figure 3.11).



Figure 3.11 (a) Imagerie thermique d'un échantillon endommagé (b) Schéma présentant les variables présentes dans l'équation 3.4

L'équation (3.3) est modifiée pour donner l'équation (3.4). Par la suite, les équations (3.1), (3.2) et (3.3) sont combinées et il devient possible d'estimer l'endommagement. Les valeurs calculées sont combinées dans la figure 3.12 :

$$S_{intacte} = S_{initiale} - e * \left(\frac{L_{entrée} + L_{sortie}}{2}\right) * \frac{\left(\frac{l_{Max} + l_{Min}}{2}\right)}{l_{Max}}$$
(3.4)



Figure 3.12 Contrainte apparente en compression CAI et contraintes estimées par infrarouge

Les données réelles sont fort similaires à l'estimation mais présentent une différence des moyennes de 0,27 % et 0,16 % respectivement pour les échantillons impactés et les échantillons réparés. L'écart-type des résultats estimés est plus faible. Ce faible écart-type provient du fait que l'équation (3.2), qui estime la performance mécanique des échantillons s'ils n'étaient pas endommagés, utilise la moyenne des forces obtenues lors des essais de référence. En utilisant cette moyenne, la variabilité des calculs diminue, mais elle se rapproche aussi des valeurs CAI, ce qui pourrait expliquer cette faible différence entre les résultats.

Afin d'avoir une meilleure estimation de la différence, chacun des échantillons est isolé, puis comparé aux résultats CAI et estimés (*Voir* Tableau 3.2). Cette fois-ci, la différence des moyennes est respectivement de 0,96 % et de 0,16 % pour les échantillons impactés et les échantillons réparés. Or, il y a cette fois un écart-type de différence plus élevé qui parvient à réconcilier les estimations à l'écart-type des données CAI, bien que l'utilisation d'une moyenne dans les calculs amortisse encore ce chiffre. Un écart-type sur la différence des échantillons individuels de 8,1 % permet d'estimer l'écart-type réel d'une valeur de 11,9 MPa et de 11,0 MPa respectivement pour les résultats CAI et estimés. Cette différence semble plus acceptable étant donné qu'un calcul sous-tendant autant d'hypothèses et de variabilité au niveau de la prise de mesure des surfaces visuelles ainsi qu'en infrarouge ne devrait pas produire des résultats plus précis que les essais CAI.

Type d'erreur	Nombre de comparaison	Différence (%)	Écart-type (%)
Impact (Moyenne estimée contre moyenne CAI)	1	0,27	N/A
Impact (Échantillon individuel)	Impact 12 (Échantillon individuel)		8,1
Réparation (Moyenne estimée contre moyenne CAI)	estimée 1 renne CAI)		N/A
Réparation (Échantillon individuel)	12	0,03	6,4

Tableau 3.2 Pourcentages de différence avec les données CAI et calculées selon le type de comparaison

3.2 Soudure statique

La soudure statique agit comme étape de transition vers la soudure continue afin de mieux comprendre les facteurs déterminant pour la qualité du joint. Les leçons tirées de ces essais contribuent fortement à la réussite de la soudure continue.

3.2.1 Développement d'une méthode de chauffe

Lors des essais de chauffe statique, une chauffe de longue durée est mise de l'avant pour tenter de combattre l'inhomogénéité de la chauffe par induction. Le temps de cycle n'est pas considéré lors de cette approche, le but est plutôt d'obtenir les meilleurs résultats possibles. Une durée de chauffe de 5 minutes est choisie lors des essais et une de 10 minutes lors de la production des coupons de cisaillement à recouvrement simple. Théoriquement, une chauffe longue laisse à la chaleur le temps de se diffusé et promouvoit une chauffe homogène qui assure une consolidation complète de l'interface. Cette approche fournie une approximation de la contrainte de cisaillement maximale puisque les objectifs de vitesse des essais suivants, en soudure continue, imposent des contraintes qui nuisent à ces performances. Les échantillons refroidissent pendant 5 minutes avant que la pression ne soit retirée. Or, ce long temps de chauffe permet à la zone affectée thermiquement d'atteindre l'enduit gélifié et de nuire à l'aspect esthétique (*Voir* Figure 3.13). La courte chauffe localisée de la soudure en continu empêche ce résultat de se répéter.



Figure 3.13 Enduit gélifié affecté thermiquement par le procédé de soudure statique

Quatre thermocouples sont utilisés afin de mieux comprendre la chauffe obtenue. Les trois premiers sont placés à l'interface où se situe le suscepteur et le dernier est placé sur la surface du dessus. Parmi les thermocouples situés dans le joint, un est placé au centre du suscepteur et les deux autres sont mis aux extrémités de la surface du suscepteur afin de fournir des données sur l'inhomogénéité de la chauffe. Les thermocouples 1 à 3 sont dans le joint et le 4 est sur la surface supérieure du coupon (*Voir* Figure 3.14). Or, les thermocouples ne sont pas si fins qu'ils n'affectent pas la qualité du contact entre les deux surfaces et il faut alors produire une rainure pour les loger. Ces rainures affectent la diffusion de la chaleur et peuvent engendrer un mauvais contact entre les thermocouple du dessus permet de lier les performances de chauffe au joint à une lecture externe puisqu'il est impossible d'ajouter des thermocouples au joint lors de la production des coupons de cisaillement à recouvrement simple sans qu'ils n'affectent les performances mécaniques. Les premiers essais visent à trouver une intensité convenable, et par la suite, une deuxième série d'essais sont effectués sans thermocouple au joint et se concentrent sur la proportion de la surface qui est convenablement soudée.



Figure 3.14 Position des thermocouples dans le joint

Suite à la première série d'essais, il s'est avéré qu'un ampérage de 260 A présente des performances de chauffe atteignant la température cible de 200°C sans présenter de dégradation thermique (*Voir* Figure 3.15).



Figure 3.15 Profils de chauffe par induction à 260 A

Des ampérages plus élevés causent de la dégradation au rebord bien que les données semblent pourtant présenter un intervalle sécuritaire avant que la température de dégradation de 310°C ne soit atteinte (Manring, 1991). Or, la sonde n'est pas exactement placée à l'extrémité du joint, car il y est difficile d'obtenir un bon contact, la température au bout de l'extrémité est donc la plus intense. Cette température est suffisamment élevée pour retirer une partie de l'épaisseur de la résine couvrant le suscepteur avant que la résine du côté inverse n'ait eu l'opportunité de se réchauffer. Le contact avec les surfaces adjacentes est parfois rompu et la chaleur n'a nulle part où se dissiper. Lorsque cette épaisseur devient assez mince, la fine couche de résine isolée atteint la température de dégradation. La résine noircit et s'évapore exposant ainsi le treillis métallique à l'oxygène, ce qui a pour effet de le bleuir (*Voir* Figure 3.16). Cette intensité de chauffe à l'extrémité a été observée lors d'essais où l'intensité était nettement trop élevée ; il est possible de rendre cette région incandescente lorsqu'elle n'est pas enrobée de résine.



Figure 3.16 Présence de régions non soudées et de dégradation suite à la soudure statique

La deuxième série d'essais évalue la surface non soudée et la compare à la surface totale. Avec l'intensité de 260 A présélectionnée et une pression de 0,1 MPa, la surface non soudée est de 7,39 % avec un écart-type de 0,86 %. Les essais menés avec des valeurs d'intensité supérieures ou inférieures à 260 A fournissent un plus grand pourcentage de surfaces non soudées. Mais, les résultats autres que cette valeur d'intensité semblent variables avec des écarts-types pouvant atteindre jusqu'à 4 %. Une réévaluation de ces valeurs après la fin des essais de soudure statique a permis d'identifier la qualité du fini de surface comme étant cause principale de cette variabilité. La phase de l'étude traitant de soudure continue améliore la méthode de moulage afin de contrôler la qualité du fini.

3.2.2 Essais de cisaillement de joint à recouvrement simple

Ces essais servent aussi de base d'apprentissage afin d'obtenir des réponses sur la facilité d'intégration de ce procédé dans le domaine industriel. Par exemple, l'outillage qui est actuellement utilisé par nos partenaires lors du collage adhésif est conçu pour un chargement inférieur à celui qui est utilisé lors de la consolidation de matrices thermoplastiques. Est-il possible d'obtenir des résultats comparables aux adhésifs présentement utilisés tout en soudant à une pression plus faible afin de permettre l'utilisation de l'ancien outillage ? Pour ces essais, trois lots d'échantillons sont préparés. Le premier lot suit le minimum de pression de consolidation recommandé pour cette résine par les fournisseurs, soit 0,5 MPa. Le deuxième et le troisième lot sont soudés à 0,1 MPa et 0,05 MPa respectivement.

Les essais de cisaillement à recouvrement simple révèlent des propriétés mécaniques similaires aux colles Plexus utilisées par nos partenaires industriels à une pression de soudure de 0,5 MPa (*Voir* Figure 3.17). Les autres essais effectués à des pressions plus faibles sont considérablement moins performants mécaniquement et présentent aussi une variabilité plus importante. Il n'est donc pas possible de souder à des pressions de soudure plus faibles que celle recommandée par le manufacturier de la résine. À titre de comparaison, la colle Plexus utilisée par les partenaires industriels nécessite une force de collage de $1\frac{N}{Po^2}$, la pression de 0,5 MPa actuellement utilisée dans cette étude représente une pression 150 fois plus intense.



Figure 3.17 Contrainte apparente en cisaillement à recouvrement simple pour des échantillons soudés en mode statique

Les échantillons moulés fournissent une estimation des propriétés mécaniques maximales qui peuvent être obtenues pour le matériau. On note une différence de 2,21 MPa avec la moyenne des échantillons soudés de manière statique. À cet égard, il semble encore y avoir place à l'amélioration au niveau de la soudure puisqu'une soudure parfaite devrait attendre des valeurs

plus proches des essais moulés. Il est nécessaire de parfaire le procédé pour parvenir à obtenir de meilleures performances lors de la soudure en continu puisque la littérature semble normalement parvenir à fournir des résultats meilleurs que les adhésifs.

Tel que mentionné à la dernière section, la morphologie inégale de la surface des échantillons composés de mat a possiblement contribué à la variation observée de la région non soudée des essais préliminaires et pourrait aussi jouer un rôle dans les présents résultats. Les plus faibles pressions de soudure présentent de plus grands écarts-types, soit 1,12 et 1,68 MPa respectivement pour les pressions de 0,10 et 0,05 MPa. Une plus faible pression implique un contact intime plus long à établir entre les deux surfaces devant être jointes. Mais, puisque la soudure dure 10 minutes, il est peu probable que le temps nécessaire pour atteindre ce contact intime, ainsi que le temps de reptation des chaines de polymère, n'ait pas été atteint. La plus grande pression a permis un meilleur degré de contact intime et par après une meilleure pénétration des chaines, ce qui explique les meilleures performances au niveau de la moyenne des meilleurs échantillons, mais cette différence ne devrait pas affecter autant l'écart-type. Il est plus probable que ces grandes aspérités et ces profonds creux, engendrés par le procédé de production, aient retardé ou même localement empêché le contact initial entre certaines régions. Une pression de contact plus forte, présente dans les meilleurs résultats de soudure par induction, ainsi qu'une bonne température et un long temps de soudure ont possiblement permis une déformation plus prononcée de ces morphologies. En aplatissant le domaine, la surface de contact réelle augmente et la variabilité la diminue. Les essais de soudure continue prennent en compte ces considérations lors de la production des échantillons. Ce problème n'était pas présent lors des essais de réparation, car les plaques étaient produites par RTM et avaient un fini lisse des deux côtés.

3.2.3 Tomographie par rayon x et porosité

La tomographie permet d'obtenir une nouvelle perspective sur les défauts contenus dans les joints. Des échantillons ayant été soudés à différentes pressions de soudure sont analysés puis comparés aux propriétés apparentes de leur essai mécanique destructif.

Les résultats de l'analyse non destructive du tableau 3.3 semblent indiquer qu'une plus faible pression de soudure engendre une porosité supérieure qui par la suite contribue à la rupture de l'échantillon. La littérature supporte depuis longtemps la dégradation des propriétés mécaniques selon le taux de porosité. La dégradation des propriétés mécaniques semble inversement proportionnelle lorsque les données sont placées dans un graphique (*Voir* Figure 3.18). Mais, puisqu'il n'y a qu'un seul échantillon par catégorie de pression de soudure, les données sont insuffisantes pour attester de l'exactitude de ce comportement ; il s'agit plutôt d'une observation.

Tableau 3.3 Performances apparentes en cisaillement à recouvrement simple et porosité par rapport à la pression de soudure

Pression de soudure	Volume de porosité (%)	Performance apparente en cisaillement (MPa)	
0,50 MPa	2,18	7,55	
0,10 MPa	4,06	3,57	
0,05 MPa	4,57	2,56	



Figure 3.18 Contrainte apparente de cisaillement à recouvrement simple selon le pourcentage de porosité au joint

Afin de mieux lier le modèle 3D obtenu avec les structures physiques, une comparaison est établie avec l'échantillon après sa rupture dans la figure 3.19. Les régions colorées dans les images de tomographie, représentant des volumes vides, concordent avec des structures visibles après la rupture. Les échantillons sont placés en colonne du plus performant mécaniquement au plus faible de gauche à droite, soit (a), (b) et (c). Les plus gros vides dans les images de tomographie (a) et (b) peuvent aussi être distingués visuellement. Lorsqu'une région présente beaucoup de petits volumes poreux, comme dans les images de tomographie (b) et (c), la surface résultante suite à la rupture semble peu consolidée et ne présente presque aucune fibre arrachée de la surface inverse. La figure 3.19 ne présente pas l'ensemble des sections de tomographie, il faut considérer que ces volumes évoluent selon la position dans l'épaisseur ; l'image ne présente pas les volumes vides avant ou après la section sélectionnée. La présence de ces régions suit la diminution des propriétés mécaniques associées et pourrait être un signe avant-coureur de régions peu consolidées.



Figure 3.19 Comparaisons entre les porosités détectées par tomographie et l'apparence visuelle du joint d'un même échantillon suite à l'essai destructif

3.3 Soudure continue

Puisque cette section ajoute le mouvement au procédé déjà complexe de soudure statique, tout l'apprentissage survenu lors des autres phases du projet doit être combiné pour atteindre les performances souhaitées.

3.3.1 Développement d'une méthode de chauffe

Avant d'entamer la discussion sur cette section, il est important de discuter des difficultés rencontrées lors de ces essais de la troisième phase du projet. Premièrement, il a été remarqué que les thermocouples sont très influencés par l'erreur engendrée par l'inducteur. Lors des deux premières phases, cette erreur était considérée comme négligeable, car elle n'était que peu mentionnée et tout simplement pas corrigée dans la littérature. Or, après quelque essais visant à évaluer l'influence de cette erreur peu mentionnée, il a été remarqué qu'à une vitesse de 11 mm/sec et une intensité variant entre 600 A, 650 A ainsi que 700 A, un thermocouple isolé de toute autre source de chaleur pouvait présenter une erreur moyenne de 44°C plus élevés avec la température ambiante avec un écart-type de 1,65°C. Pour une vitesse de 3 mm/sec, l'erreur était plutôt dans les 65°C. Une section à venir se concentre sur les défis et d'éventuelles solutions face à cette complexité, voir la section 3.4.

Dans les graphiques suivants, aucun écart-type n'est présenté parce qu'il est difficile de placer les thermocouples exactement à la même position d'un essai à l'autre, et qu'une faible variation de position ou même de la position du reste du câble à proximité de l'inducteur crée une grande variation dans les résultats en raison de la même erreur tout juste mentionnée. Le fait que chacun des échantillons ne peut être soudé qu'une fois rajoute aussi de la complexité. Cela force à produire un nouvel embout à la fin de chacune des sondes entre chaque essai et diminue le nombre d'essais total qui peut être effectué, car la grande taille des plaques diminue le nombre total d'échantillons disponibles. Cette section présente les graphiques qui semblent le mieux représenter le comportement de chauffe observé lors de multiples essais menés avec des paramètres différents. Après avoir consulté les partenaires du projet, il est estimé qu'une vitesse de soudure de 8,33 mm/sec (10 mètres en 20 minutes) en continu fournit un temps de cycle similaire à un cycle de collage d'un moule standard de nos partenaires. Le succès de cette section est défini par une chauffe atteignant la cible de 200°C, une bonne homogénéité et une vitesse de soudure égale ou supérieure à 8,33 mm/sec.



Figure 3.20 (a) Schéma de concept du suscepteur à bande simple (b) Profil de chauffe du rebord et du centre d'un échantillon à une intensité de 650 A et à une vitesse de 9mm/sec

Les premiers essais de soudure continue utilisent comme suscepteur une seule bande de treillis d'acier inox ayant la largeur du joint (*Voir* Figure 3.20). Dans la partie gauche de la figure, les bandes de couleur rouge représentent les suscepteurs et les flèches indiquent la position des effets de bord. Pour le graphique à droite, les données sont issues de deux thermocouples séparés par une distance de 35 mm où un est placé au rebord du joint et l'autre est placé au centre. En revanche, il s'avère que le gradient de température causé par l'effet de bord est trop sévère avec ce suscepteur. Il est possible de remarquer ce gradient dans la figure 3.20, b, la différence entre le centre et le rebord est de 118,9°C. Ce gradient provoque l'apparition de bandes dégradées sur les rebords bien que le centre de la soudure ne semble pas avoir consolidé (*Voir* Figure 3.21) lors d'essais effectués à plus forte intensité. Lorsque soudé à de plus faibles ampérages ou à des vitesses supérieures, on observe encore moins de régions soudées et donc aucune manière d'atteindre la cible sans dégradation. Les échantillons physiques et les valeurs de chauffe obtenues aboutissent aux mêmes conclusions que les essais de soudure statique ; il

faut changer de perspective, puisqu'aucun ensemble de paramètres ne semble remédier au problème. Plusieurs concepts de géométrie de suscepteur sont imaginés afin de parer au problème et un nouveau système d'acquisition de données (DAQ) est installé afin de prendre davantage de mesures par seconde.



Figure 3.21 Suscepteur à bande simple (a) avant la soudure (b) après la soudure



Figure 3.22 (a) Schéma de concept du suscepteur à bandes doubles parallèles (b) Profil de chauffe du rebord et du centre d'un échantillon à une intensité de 700 A et à une vitesse de 8 mm/sec

Le deuxième concept de géométrie de suscepteur consiste à faire varier la position des effets de bord en plaçant deux bandes ayant une largeur plus faible, parallèles une à l'autre et à la surface du joint. Théoriquement, la moitié des effets de bord sont situés au centre du joint de soudure en raison de la géométrie (*Voir* Figure 3.22). Cela favorise l'apparition d'une région chaude au centre de l'échantillon. Or cette géométrie fournit une chauffe moins importante, de presque 60°C, que le suscepteur à bande simple comme le démontre le graphique de la figure 3.22, b. Malgré une température et une vitesse plus faibles que l'essai à bande simple, la température du rebord est plus élevée et le gradient entre les deux sondes est plus faible. En observant la figure 3.18, b, il est visible que la surface comporte peu de régions soudées de manière continue bien qu'il semble y avoir des points localisés de surchauffe au centre du suscepteur (*Voir* Figure 3.23). Les suscepteurs ont été placés manuellement et la précision du positionnement semble affecter grandement la qualité du concept bien que le rythme de génération de chaleur reste insuffisant pour la source inductrice utilisée.



Figure 3.23 Suscepteur à bandes doubles parallèles (a) avant la soudure (b) après la soudure



Figure 3.24 (a) Schéma de concept du suscepteur à bandes doubles superposées (b) Profil de chauffe du rebord et du centre d'un échantillon à une intensité de 700 A et à une vitesse de 8 mm/sec

Le troisième concept est basé sur ce qui avait été appris lors des essais de réparation ; l'empilement de plusieurs feuilles de treillis génère davantage de chaleur (Voir Figure 3.24). L'empilement de treillis d'acier inox n'ayant pas la même largeur permet de générer plus de chaleur à l'endroit où il y a superposition et de déplacer la position des effets de bords du plus petit treillis de manière à améliorer l'homogénéité de la chauffe. Le graphique de la figure 3.24, b présente une chauffe homogène entre la sonde placée au centre et celle sur le rebord avec une chauffe se rapprochant de la cible de 200°C. Or, la distance entre l'inducteur et le suscepteur ne peut pas être diminuée puisqu'il s'agit de l'épaisseur de l'échantillon du dessus, et la source inductrice atteint sa capacité maximale de chauffe à 700 A. La chauffe n'est pas suffisamment efficace pour atteindre les temps de cycle voulus. Cette fois, les échantillons sont utilisés plusieurs fois afin de mieux caractériser l'influence de la vitesse et c'est la raison pour laquelle les rebords de la surface extérieure de la figure 3.25, b sont dégradés. Il semble que l'effet de bord ne soit pas réellement éliminé et qu'un passage plus lent ainsi qu'un usage multiple d'un même échantillon favorisent la dégradation malgré les mesures encourageantes observées lors essais précédents. Le suscepteur était aussi de plus faible largeur à cause d'un défaut de production, ce qui amplifie les effets de bord. Néanmoins, le centre de l'échantillon présente maintenant une empreinte de la surface inverse bien qu'elle ne soit pas totalement soudée. La chauffe semble plus intense et plus homogène. La contrainte de temps du projet force ce candidat comme choix principal puisqu'il est le résultat se rapprochant le plus des performances voulues. Mais, une dernière possibilité de production de plaques pour les essais de cisaillement à recouvrement simple permet aussi de produire un dernier concept dans les quantités nécessaires pour les essais préliminaires ainsi que les essais mécaniques.



Figure 3.25 Suscepteur à bandes doubles superposées (a) avant la soudure (b) après la soudure



Figure 3.26 (a) Schéma de concept du suscepteur à bandes triples superposées (b) Profil de chauffe du rebord et du centre d'un échantillon à une intensité de 700 A et à une vitesse de 8 mm/sec

Ce dernier concept de géométrie améliore le suscepteur à bandes doubles superposées en ajoutant une bande de treillis supplémentaire (*Voir* Figure 3.26). Cette fois-ci, les objectifs de chauffe sont atteints pour le suscepteur à bandes triples superposées, la chauffe du rebord atteint une température dépassant le 200°C ciblé, soit 273,9°C pour le rebord. Cette température peut sembler élevée, mais en prenant compte que l'erreur à ces vitesses se situait entre 44°C pour 11 mm/sec et 65°C pour 3 mm/sec, il peut être considéré que cette température est légèrement supérieure à la valeur cible. La chauffe du thermocouple du centre semble aussi être supérieure, mais une analyse thermographique menée en parallèle au processus d'essai mécanique permet de mieux comparer les différents concepts entre eux et est discutée à la prochaine section. En le comparant aux autres suscepteurs, ce concept semble bien performer (*Voir* Tableau 3.4).

Type de suscepteur	Ampérage (A)	Vitesse de soudure (mm/sec)	Température Maximale sonde #1 (°C)	Température Maximale sonde #2 (°C)
Bande simple	650	9	164,30	45,40
Bandes doubles parallèles	700	8	105,89	62,23
Bandes doubles superposées	700	8	173,43	165,28
Bandes triples superposées	700	8	273,9	185,55

Tableau 3.4 Résumé des performances de soudure selon le type de suscepteur

Une analyse visuelle de l'échantillon (*Voir* Figure 3.27, b) semble correspondre aux données présentées dans les graphiques. Il y a, cette fois, seulement une faible épaisseur non soudée au centre avec des interruptions. De plus, lorsque les surfaces ont été séparées, plusieurs morceaux de matrice ainsi que des sections entières de treillis ou de fibres sur les rebords ont été arrachés lors du bris. Le gain en génération de chaleur permet d'augmenter la vitesse de soudure tout en conservant la température moyenne voulue ainsi qu'un gradient de température acceptable. La chauffe est si intense qu'il est d'ailleurs possible de voir des émanations de gaz lors de la soudure finale (*Voir* Figure 3.27, c). L'absence de marque de dégradation suite aux essais

semble indiquer que les émanations proviennent de monomères non polymérisé ou d'un faible niveau de dégradation. Les deux suscepteurs n'endommagent pas l'apparence physique de l'enduit gélifié, les échantillons soudés sont indistincts des échantillons non soudés (*Voir* Figure 3.28).



Figure 3.27 Suscepteur à bandes triples superposées (a) avant la soudure (b) après la soudure (c) Dégagement de gaz lors de soudure avec suscepteur à bandes triples superposées



Figure 3.28 Échantillon avec suscepteur à bandes triples superposées soudés par induction

3.3.1.1 Analyse du gradient de température par thermographie

Une analyse thermographique est effectuée en parallèle aux essais mécaniques. Les essais sont effectués à de plus faibles vitesses et ampérage, soit 3 mm/sec et 400 A. Avec du recul, il aurait été judicieux que les valeurs choisies aient été les mêmes que celles sélectionnées pour les soudures finales puisqu'il aurait été intéressant d'obtenir les données de chauffe liées aux choix de vitesses finales. Mais, cette analyse avait pour but initial de comparer les concepts entre eux. Bien que les valeurs diffèrent, une faible vitesse avec une intensité moyenne simule une forte intensité de courant.

La comparaison commence avec l'analyse des échelles calorimétriques de l'imagerie thermique lors de la soudure telle que montrée à la figure 3.29. Le suscepteur à bandes doubles parallèles présente une chaleur maximale de 69,9°C ce qui est la plus faible des quatre concepts. Le suscepteur à bande simple à une valeur 155°C. Les échelles des suscepteurs superposés sont similaires, soit 239°C pour celui à bandes doubles et 218°C à bandes triples. En revanche, une analyse plus profonde est requise pour déterminer si la chauffe est en fait homogène, bien que les images fournissent une appréciation générale de cette homogénéité.



Figure 3.29 Imagerie thermique de la surface chauffante d'un échantillon avec suscepteur selon le type de suscepteur durant une simulation de soudure

Le logiciel d'analyse infrarouge permet de faire la moyenne de groupements de pixels et d'obtenir des graphiques qui suivent la variation de ces régions d'intérêt selon le temps, tel que présenté à la figure 3.30. La courbe vert clair (souvent celle du dessus, sauf dans le cas des bandes doubles parallèles) représente la température du rebord et la vert foncé, celle de la température du milieu. Il faut premièrement comprendre que dans chacun des graphiques apparaissent deux creux proéminents témoignant de la présence de thermocouples à la surface, tenus par des petits bouts d'adhésif Kapton®. Le but initial était aussi de comparer les valeurs obtenues par les thermocouples et de les comparer aux valeurs de la caméra thermique. Malheureusement, les thermocouples, n'étant pas serrés entre deux plaques et étant recouverts de pâte thermique, avaient tendance à se décoller de la surface et à fournir des mesures erronées. Il n'y aura donc pas de comparaison entre les deux. Mais, les données de la caméra thermique sont tout de même intéressantes. Pour le suscepteur à bandes doubles parallèles, le centre devient plus chaud que le rebord, bien que la variation soit chaotique en raison des défauts de production.



Figure 3.30 Région d'intérêt thermique présentant la température en fonction du temps pour tous les types de suscepteurs

Les suscepteurs à bande simple et à bandes doubles superposées semblent tenir une température de rebord ainsi que de milieu relativement similaire, la différence est plutôt située entre les deux zones d'intérêt. Il en reste que ces résultats sont étonnants puisqu'ils contredisent les valeurs collectées par les thermocouples. Il est possible que les sondes aient subi un champ magnétique plus élevé qu'anticipé et aient donné lieu à une erreur plus élevée. La température du suscepteur à bandes triples superposées est tout de même plus élevée au niveau des deux régions d'intérêt de l'imagerie thermique et augmente pour la région d'intérêt du milieu lorsqu'il arrive vers la fin. Le front de chaleur, étant possiblement plus proche du centre, se propage entre les régions d'intérêts du rebord et du centre lorsque l'échantillon arrête de bouger et la caméra capte ce transfert de chaleur grâce à leur proximité. Afin de mieux comprendre, une région d'intérêt parcourant le rebord jusqu'au centre du côté n'ayant pas de thermocouple est recalculé à partir des données déjà acquises telle que présentée dans la figure 3.31. Cette fois-ci, il est possible de voir la différence entre les suscepteurs à bande simple et le suscepteur à bandes doubles superposés. Bien que les régions extrêmes soient similaires, la région entre les deux points d'intérêt est plus homogène et permet une moyenne de température beaucoup plus élevée. La même différence est visible entre les échantillons à bandes doubles superposées et à bandes triples superposées, lequel présente un niveau global de chaleur plus élevé.



Figure 3.31 Région d'intérêt thermique présentant la température en fonction du temps pour tous les types de suscepteurs

Finalement, des images prises après la fin de la chauffe sont comparées afin de capter l'homogénéité générale de la température après l'arrêt de la source inductrice (*Voir* Figure 3.32). Il est encore possible de constater la présence de points locaux de surchauffe sur le suscepteur à bandes doubles parallèles. Le suscepteur à bande simple semble présenter une bonne homogénéité après l'arrêt de la source. En revanche, l'échelle colorimétrique atteint une température de 63°C, ce qui est la température la plus faible de la catégorie, bien que comparable au suscepteur à bandes doubles parallèles. Encore une fois les suscepteurs à bandes superposées ont une température similaire située à 119°C pour celui à bandes doubles et à 118°C pour celui à bandes triples. Mais, le suscepteur à bande triples superposées semble montrer un niveau de chaleur plus régulier et arrive presque à joindre les rebords au centre de l'échantillon. L'apparence de la répartition de la chaleur rappelle la surface finale trouvée lors de la soudure de ces mêmes joints à la figure 3.27, b.



Figure 3.32 Imagerie thermique de la surface chauffante d'un échantillon avec suscepteur selon le type de suscepteur durant une simulation de soudure
3.3.2 Essais de cisaillement de joint à recouvrement simple

Les joints soudés avec des suscepteurs à bandes superposées doubles et triples sont sélectionnés pour l'essai mécanique destructif. Étant contraint par le temps, moins d'essais préliminaires ont été appliqués sur ce dernier type de suscepteur, mais il a tout de même été ajouté aux essais mécaniques finaux du projet. Les deux suscepteurs sont soudés à une intensité de 700 A, mais la vitesse du suscepteur à bandes doubles superposés est de 8 mm/sec et la vitesse du suscepteur à bandes triples superposées est de 9 mm/sec. Les performances mécaniques sont présentées au tableau suivant (*Voir* Figure 3.33) avec les résultats d'intérêt des essais de soudure statique ainsi que les références de colle industrielle et d'échantillon moulé.



Figure 3.33 Contrainte apparente en cisaillement à recouvrement simple selon les lots d'essais

Les performances mécaniques obtenues avec le suscepteur à bandes doubles superposées se rapprochent de celles de la colle ainsi que des essais de soudure statique. Mais, l'écart-type est supérieur malgré l'amélioration de la technique de production, qui avait été jugée être la cause de la variabilité lors des essais de soudure statique. La moyenne et l'écart-type de ce type de suscepteur ne permettent pas de conclure que les performances mécaniques sont supérieures à celles des colles pour un temps de cycle équivalent. En revanche, le suscepteur à bandes triples superposées présente d'excellentes performances et se rapproche même des performances des échantillons moulés. Étant donné que les échantillons moulés représentent théoriquement une soudure parfaite, la proximité de la moyenne des échantillons soudés à cette valeur ainsi que les performances mécaniques supérieures aux adhésifs de nos partenaires tendent vers l'accomplissement des objectifs mécaniques. De plus, les échantillons sont soudés à 9 mm/sec, ce qui représente un temps de cycle plus court que l'objectif visé.

Quant au mode de rupture, il s'agit d'un bris mixte entre une rupture cohésive et une rupture adhésive. En observant la figure 3.34, il apparait que les régions où l'effet de bord se produit semblent être mieux soudées, car une plus grande section de la surface inverse est arrachée. Lors de la rupture, certaines régions arrachent des régions du treillis d'acier ; ce qui peut démontrer que les chaines de polymères traversant les mailles du treillis ont bien cicatrisé. En revanche, il y a une moins grande surface du genre que lors des essais préliminaires à cause de la vitesse de soudure plus élevée. Des sections brisées révèlent des lots de fibres et qu'une partie de la résine est manquante en raison de la nature fragile du bris des résines Élium. Le centre révèle une empreinte provenant de la surface inverse qui n'est initialement pas présente sur l'autre surface. Cette empreinte prouve qu'une forme de fusion est survenue bien qu'elle n'ait pas suffisamment pénétré pour causer l'arrachement d'une plus grande partie du suscepteur. La quantité de chaleur moindre, le fait que le suscepteur soit tout de même robuste, étant composé d'acier inoxydable, et qu'il agisse en tant qu'élément intrusif pourraient expliquer ce manque de pénétration. Le milieu est composé de 3 bandes posées l'une sur l'autre ; la superposition des treillis nuit aux mouvements des chaines de polymère puisqu'elles doivent passer au travers de trois obstacles plutôt qu'un. Le nombre de couches de suscepteurs selon une taille de mailles de treillis donnée doit être adapté en fonction de l'intensité ainsi que de l'homogénéité de la chauffe. Si le nombre de couches est trop faible, la chauffe est insuffisante, mais s'il est trop élevé, le suscepteur nuit à la cicatrisation ; il existe un nombre optimal selon les objectifs de soudure.



Figure 3.34 Échantillon avec suscepteur à bandes triples superposées suite à la rupture

3.3.3 Micrographie et défauts macroscopiques

La micrographie vise à améliorer la compréhension des défauts créés par le procédé de soudure en continu. En ce qui concerne le traitement des images, les tons de couleurs de l'image sont trop similaires entre les porosités et la résine et, bien que les porosités soient visuellement faciles à isoler, la similitude pose une difficulté pour le logiciel de traitement d'image. Les images sont retravaillées et une couleur noire est utilisée pour mettre en évidence les porosités. Le logiciel parvient, suite à cette modification, à calculer le pourcentage de la surface qui est de la porosité. La région analysée a la forme d'une boite qui entoure le suscepteur, les défauts se situant hors de cette boite ne sont pas considérés bien qu'il soit possible que ces porosités émergent du mécanisme de migration de vide. Les données sont présentées au tableau suivant :

Type d'échantillon	Surface poreuse (%)	Performance apparente en cisaillement a recouvrement simple (MPa)
Bandes doubles superposées	2,19	7,19
Bandes triples superposées	1,80	9,21

Tableau 3.5 Pourcentages de surface de porosité visible par micrographie selon le type de suscepteur comparés aux performances apparentes en cisaillement à recouvrement simple

Le pourcentage de surface poreuse semble encore suivre ce qui avait été observé lors des essais de tomographie. Le pourcentage de surface poreuse et les performances mécaniques sont similaires aux résultats statiques pour le suscepteur à bandes doubles superposées malgré l'augmentation de la force appliquée à cause du court temps de chauffe. Le suscepteur à bandes triples superposées semble présenter une moins grande quantité de porosité qui coïncide avec de meilleures performances mécaniques.

Dans la figure 3.35, il est visible que les zones de porosité se situent autour des fils du treillis d'acier ou dans une région plus éloigné sous le suscepteur. Les régions où les porosités se sont concentrer sur les rebords des suscepteurs sont sujettes aux effets de bords du champ magnétique et subissent les plus fortes températures. Il est fort probable que cette haute température ne soit pas totalement dissipée suivant le passage du rouleau et qu'il subsiste une température qui permette localement la déconsolidation suivant l'union des plaques. Une autre possibilité est que la proximité du rebord du joint peu permettre à une partie de la résine de s'échapper par fluage et contribuer à la croissance des vides. Mais lors de ces essais, il ne semble pas y avoir trace apparente de fluage dirigeant l'explication vers le premier scénario énoncé. Un refroidissement du rouleau ou une source de refroidissement externe après son passage pourrait améliorer cette situation.

Les porosités situées dans des régions éloignées pourraient provenir du mécanisme de migration des vides décrit dans la revue de littérature, si tel est le cas, des travaux ultérieurs pourraient éventuellement se pencher sur le développement de ces régions. Mais, ce mécanisme ne semble pas être aussi présent dans les échantillons avec suscepteur à bandes triples superposées. Une hypothèse qui pourrait en partie expliquer ce qui est observé est proposée à la fin de cette section.



Figure 3.35 Micrographie 100X d'un échantillon soudé avec suscepteur à bandes doubles superposées

En observant maintenant la figure 3.36, la zone de porosité est totalement concentrée sur un seul des deux rebords, mais il ne semble pas y avoir d'indication visuelle expliquant pourquoi l'un des deux rebords se porte mieux que l'autre. Normalement, une chauffe plus homogène explique une plus faible porosité, car il y a moins de régions non soudées au centre de l'échantillon. Or, la porosité apparait dans les régions les plus chaudes et, dans des images non présentées, les régions d'apparition de ces porosités sont les mêmes pour les deux types de suscepteurs. Une explication pourrait être que la surchauffe génère des sites de porosités après le passage du rouleau pour les deux suscepteurs, mais que la chauffe moins homogène du suscepteur à bandes doubles superposées favorise la croissance de ces vides ainsi qu'une contrainte interne. À cause de la différence d'expansion thermique plus importante entre une région sur le rebord et une région au centre, le refroidissement cause aussi une tension interne entre ces régions qui peut favoriser la croissance de ces vides. En comparant la forme générale des porosités entre les deux types de suscepteurs de la figure 3.35 et de la figure 3.36, on peut remarquer que les porosités du suscepteur à bandes doubles superposées semblent avoir une morphologie étirée vers le centre par rapport aux porosités rondes du suscepteur à bandes triples superposées. Cette morphologie pourrait aussi indiquer la présence d'une contrainte résiduelle qui pourrait nuire aux performances mécaniques et expliquer pourquoi une faible

variation du pourcentage de surface poreuse aurait un aussi grand effet sur les performances mécaniques finales. Le nombre limité d'échantillons de micrographie ne permet toutefois pas de confirmer cette hypothèse.



Figure 3.36 Micrographie 100X d'un échantillon soudé avec suscepteur à bandes triples superposées

3.3.4 Ajout d'un démonstrateur

Finalement, un excédent de matériaux à la fin du projet permet de rajouter un démonstrateur pour simuler une application pratique du procédé. Un renfort de forme « oméga » et une grande plaque avec enduit gélifié, représentant le revêtement, sont produits puis totalement soudés en utilisant la méthode afin de faire preuve de l'applicabilité du concept pour des formes simples (*Voir* Figure 3.37). Le rouleau applique une pression sur la surface extérieure du revêtement comme dans les essais de la dernière phase et un gabarit soutient le renfort « oméga » pour simuler une soudure provenant de l'extérieur. L'échantillon ne présente pas de défaut esthétique lié au procédé. La soudure est réussie et le fini de surface non altéré.



Figure 3.37 (a) Montage de soudure continue d'un renfort « oméga » sur une plaque composite (b) Échantillon suivant la soudure par induction (c) Échantillon vue de dessus

3.4 Erreur de lecture des thermocouples et pistes de solutions

Les thermocouples sont composés de deux fils de différente nature connectés aux deux extrémités. Lorsque l'une des deux jonctions est chauffée, sa chaleur diffuse vers la jonction froide. Les métaux, dont les électrons sont très mobiles, les utilisent pour diffuser la chaleur et créent simultanément une différence de potentiel, c'est-à-dire un voltage. La différence de nature des matériaux force le courant à s'établir dans un sens défini étant donné que certains métaux ont une meilleure conductivité que d'autres, permettant une conduction continue et prévisible. Ce comportement est nommé l'effet Seebeck. Les thermocouples utilisés dans le cadre de notre expérience sont de type k.

Or, les fils métalliques dans les thermocouples sont aussi influencés par les champs magnétiques produits par l'inducteur. Premièrement, le champ magnétique alternant vient induire le fils et y génère donc de la chaleur parasitaire. Mais, le champ magnétique influence aussi le coefficient de Seebeck entre les deux matériaux, ce qui engendre une erreur au niveau du DAQ qui s'attend à lire une valeur avec un coefficient fixe et prédéfini. De plus, cette erreur peut varier selon différents facteurs, tels que la fréquence d'alternance de polarité du champ

magnétique, la longueur de la région du fil affectée par le champ magnétique, la puissance du champ magnétique et le torsadage des fils (Shir, Mavriplis et Bennett, 2005).

Il y a donc une limitation à prendre des thermocouples comme instrument de mesure, puisque nombre de paramètres influencent les mesures et qu'il est difficile de quantifier au préalable l'influence de l'erreur sur la mesure prise. Tout cela est particulièrement vrai lors de la mise en contexte dans un montage présentant un déplacement et un concentrateur de flux magnétique qui déforme le profil du champ magnétique. Il devient alors difficile de bien prédire l'influence du champ magnétique puisque le champ varie selon sa position par rapport au thermocouple. Une maîtrise réalisée par M.D. Dhondt se concentre sur ces différents défis (Dhondt, 2019). Il est proposé d'utiliser des fils ayant le plus petit diamètre possible en conjonction avec des matériaux le moins magnétique possible afin de diminuer l'erreur de lecture. Les thermocouples type E et T sont les meilleurs candidats bien que le type T ne soit pas capable de résister aux plus hautes températures présentes dans les thermoplastiques haute performance tels le PEEK. Sinon, l'erreur se dissipe rapidement lorsque la source inductrice est arrêtée, des arrêts rapides peuvent laisser l'opportunité de collecter des données sûres si une telle interruption peut être permise. Lors de cette étude, il a été remarqué que cette erreur avait une grande influence sur les résultats au début de la phase sur la soudure continue. Comme précédemment mentionnée, l'erreur pouvait être aussi intense que 65°C à une vitesse de soudure de 3 mm/sec et une intensité élevée. Plusieurs solutions sont essayées afin d'atténuer ou de contourner ce problème.

3.4.1 Correction par compensation logicielle

Dans le but de corriger l'erreur engendrée par le champ magnétique, il est premièrement proposé de programmer une solution logicielle à faible coût qui permette de corriger une partie de l'erreur. En utilisant LabVIEW conjointement avec un DAQ NI 9213, il est possible de trouver l'erreur à une position donnée en utilisant une sonde de référence ainsi qu'une sonde de température ambiante. La sonde de référence est positionnée à proximité d'une sonde ou d'une série de sondes de mesure, elle conserve la même distance entre l'inducteur et la sonde

de mesure. Sa position est telle qu'elle n'est pas en contact avec le suscepteur, mais qu'elle se situe en dessous de l'inducteur et du concentrateur de flux magnétique. La sonde doit être à température ambiante puisqu'elle n'est pas en contact avec un élément chauffant. Or, le champ magnétique lui ajoute une erreur. En soustrayant cette valeur de la température ambiante réelle, l'erreur devient isolée et peut à son tour être soustraite activement de la valeur obtenue par les thermocouples de mesure (*Voir* Figure 3.38).



Figure 3.38 (a) Schéma de rôles des thermocouples (b) Montage de compensation logiciel

Cette méthode comporte encore une fois des limitations, car les thermocouples ne sont pas placés exactement de la même manière que la référence pour mesurer la température au milieu ou sur les rebords, car le profil du champ magnétique sortant d'une bobine en épingle à cheveux avec un concentrateur de flux magnétique n'est pas uniforme. Il est donc important de tenter de limiter la longueur du fils sujet au champ magnétique ainsi que de reproduire les mêmes parcours au niveau des fils de mesure et de référence qui mènent à la zone d'intérêt. Une configuration symétrique des fils est utilisée afin d'améliorer la qualité des résultats. Suite à de multiples essais, il s'avère que la plus subtile différence de symétrie des fils cause tout de même une grande variation de la correction de l'erreur. L'inducteur en épingle à cheveux et le concentrateur de flux magnétique n'ont pas les dimensions nécessaires pour reproduire une symétrie acceptable au niveau des fils des thermocouples et la compensation devient très

instable. Après de nombreux essais, cette partie du projet est laissée pour compte à cause de l'instabilité des résultats. Une nouvelle approche par caméra thermique est suggérée afin de supporter les données obtenues par thermocouples.

3.4.2 Capteur thermique et imagerie thermique

Puisque le champ magnétique influence la lecture des thermocouples, il est préférable d'utiliser un appareil optique qui n'est pas influencé de la sorte. Les caméras thermiques utilisent les ondes infrarouges émises par les surfaces pour reconstituer une image digitale de la température. Mais, il n'est possible de voir partiellement au travers d'un objet que lorsque l'épaisseur et la résistivité thermique de cet objet sont faibles. Cela constitue ainsi une bonne option lorsque les soudures sont effectuées sur de faibles épaisseurs de laminé. En revanche, un laminé plus épais, comme celui utilisé dans ce projet, dérobe la visibilité du joint de soudure. Toutefois, il est possible d'altérer la configuration du montage. Il est possible d'enlever la partie du dessus des deux éléments devant être soudés puisque le suscepteur peut être placé sur la partie du dessous. Dans ce cas, il est possible de faire un test visant à exposer le profil de chauffe à l'aide de la caméra thermique. Mais, il est important de prendre en compte que la chauffe est affectée par l'enlèvement d'une partie de l'isolation en retirant la section du dessus et qu'on ajoute aussi des effets de convection naturelle. Cette technique est principalement employée pour comparer les différents suscepteurs entre eux et pour mieux comprendre les effets de bords générés par la chauffe par induction.

CONCLUSION

La présente étude s'est concentrée sur l'adaptabilité du procédé de chauffe par induction en ce qui concerne la réparation et la soudure de composites thermoplastiques dans un contexte industriel. Des essais ont été effectués avec une résine thermoplastique ayant des propriétés de mise en forme comparables à l'époxy, dans le but d'encourager l'utilisation de ces résines pouvant être soudées, réparées et, peut-être dans un avenir proche, convenablement recyclées. Cette étude comporte trois phases, la première s'est concentrée sur réparation, la deuxième sur la soudure statique et la troisième sur la soudure en continu.

En préparation de la phase de réparation, une méthode a été développée pour accommoder les défis posés par l'épaisseur des échantillons composites face au procédé d'induction. L'utilisation de deux types de suscepteurs a permis d'utiliser les forces de chacun pour donner un meilleur résultat. Le premier suscepteur, composé d'une feuille de métal pleine, aide à retourner les lots de fibres éjectés de la surface à l'intérieur du composite et offre un fini de surface similaire au fini initial. Le deuxième suscepteur, qui consiste en une union de feuilles de treillis d'acier, fournit suffisamment de chaleur au suscepteur distal pour compenser la baisse d'intensité du champ magnétique associée à la plus grande distance de l'inducteur. En ce qui concerne les propriétés mécaniques en compression suivant l'impact, cette méthode a permis de ramener les propriétés mécaniques à une valeur inférieure de 7,7 % par rapport aux échantillons de référence suivant une perte initiale de 21,5 % après l'impact. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues par les partenaires de recherche du CDCQ. Le procédé arrive à ce résultat en 10 minutes plutôt qu'aux 14 minutes 30 secondes des essais menés au CDCQ avec des lampes infrarouges.

Les essais de soudure statique effectués à la deuxième phase ont servi à simuler des situations possibles dans le secteur industriel quant à la qualité du procédé et à observer si les propriétés mécaniques obtenues étaient similaires à celles des colles utilisées par les partenaires industriels du projet. Un long temps de chauffe, 10 minutes, est utilisé dans le but d'obtenir des résultats qui négligent l'inhomogénéité de la chauffe causée par les effets de bord.

Toutefois, ce long temps affecte fortement l'esthétisme de l'enduit gélifié. Lors des essais, les matériaux sont soudés à de plus faibles pressions que celles recommandées par le fabricant de la résine pour essayer d'établir s'il est possible de souder avec une pression dans le même ordre de grandeur que le collage. Si les performances mécaniques sont similaires avec une plus faible pression, cela pourrait permettre de conserver l'outillage actuellement utilisé pour le collage. Or, la résine et le procédé de souder statique actuels ne performent pas assez bien mécaniquement pour permettre de soudé à une faible pression. En cisaillement à recouvrement simple, le joint soudé à la plus forte pression utilisée lors de ces essais performe à 7,88 MPa contre 7,82 MPa pour le joint collé. On constate qu'une modification du suscepteur s'avère essentielle pour permettre la réalisation de la soudure en continu. Une attention particulière est aussi portée au fini des surfaces devant être jointes lors des essais de soudure en continu.

Les essais de soudure en continu appliquent les leçons tirées lors des deux dernières phases et modifient le suscepteur ainsi que la méthode de moulage des plaques tout en incorporant un rouleau et un mouvement unidirectionnel. Suite à de multiples essais, une configuration de suscepteur pouvant générer la chaleur nécessaire pour souder à des vitesses de soudure de 9 mm/sec avec un contrôle légèrement supérieur de l'homogénéité de la chauffe est proposée. Suite à des essais en cisaillement à recouvrement simple, les performances du meilleur type de suscepteur, le suscepteur à bandes triples superposés, atteignent 9,21 MPa. Cette valeur se rapproche de celle des échantillons moulés qui est de 10,09 MPa et dépasse celle des colles à 7,82 MPa. Cette fois, l'esthétisme de l'enduit gélifié n'est pas affecté par le procédé grâce à la courte chauffe localisée au joint. Étant donné que la soudure dépasse maintenant les performances mécaniques du joint collé, que l'esthétisme de l'enduit gélifié est conservé et que l'objectif d'un rythme de soudure de 8,33 mm/sec est dépassé par le 9 mm/sec de la présente méthode, les objectifs initiaux de la soudure en continu sont considérés comme étant atteints.

RECOMMANDATIONS

Il serait judicieux pour une prochaine étude de solutionner les défis liés à l'acquisition de données à proximité d'un champ magnétique. Bien qu'il existe plusieurs pistes de solutions, il ne semble pas y en avoir aucune qui propose une alternative économique. Peut-être qu'un développement de ce côté lié à une meilleure compréhension et une meilleure correction des valeurs obtenues par des thermocouples pourraient inciter ainsi que faciliter la recherche liée aux procédées de réparation et de soudure par induction

Pour la réparation, une avenue intéressante de développement pourrait être d'incorporer des couches de suscepteur à l'intérieur des différentes épaisseurs d'un échantillon avant de l'endommager par impact. Dans ce scénario, plus la distance avec l'inducteur est grande, plus il devra y avoir de suscepteurs pour compenser la baisse de la chauffe. Autrement dit, la distance entre chacun des suscepteurs diminuera avec l'éloignement de l'inducteur. Des treillis d'acier pourraient être inclus à l'intérieur de cette construction dans cette configuration afin de garantir une chauffe homogène tout au long de l'épaisseur.

Pour la soudure, une simulation par élément finit peut aussi être utilisé pour simuler de diffèrent type de suscepteur afin d'identifier de nouveaux concepts plus efficaces au niveau de la génération de chaleur et moins intrusifs. Le suscepteur bande triples superposés peut aussi être remplacé par une grande bande plier en trois, ce qui peut faciliter la production des suscepteurs puisqu'il n'est pas envisageable que les bandes soient placées les unes sur les autres à la main dans un contexte industriel.

Finalement, la production d'un démonstrateur « oméga » à la fin du projet soutien l'applicabilité de cette technologie. La prochaine étape logique consiste à ajouter un axe de déplacement supplémentaire au montage présent afin d'accommoder la soudure de formes plus complexes.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ageorges, C., & Ye, L. (2001). Resistance welding of thermosetting composite/thermoplastic composite joints. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 32(11), 1603-1612. doi:https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00183-4
- Ahmed, T. J., Stavrov, D., Bersee, H. E. N., & Beukers, A. (2006). Induction welding of thermoplastic composites—an overview. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 37(10), 1638-1651. doi:10.1016/j.compositesa.2005.10.009
- ASTM international. (2012). D7136M-12 Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. doi: 10.1520/D7136_D7136M-12 (Is superseded by D7136 D7136M-20 since 2020)
- ASTM International. (2017). ASTM D7137 / D7137M-17, Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates. doi: 10.1520/D7137_D7137M-17
- ASTM International. (2018). E1933-14, Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers. doi: 10.1520/E1933-14R18
- Awaja, F. (2016). Autohesion of polymers. Polymer, 97, 387-407. doi:10.1016/j.polymer.2016.05.043
- Bayerl, T. (2012). Application of Particulate Susceptors for the Inductive Heating of Temperature Sensitive Polymer-Polymer Composites. Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern. doi: <u>https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-47153</u>

- Bayerl, T., Duhovic, M., Mitschang, P., & Bhattacharyya, D. (2014). The heating of polymer composites by electromagnetic induction – A review. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 57, 27-40. doi:10.1016/j.compositesa.2013.10.024
- Becker, S., & Mitschang, P. (2017). INFLUENCES OF TEXTILE PARAMETERS ON THE INDUCTION HEATING BEHAVIOR OF CFRPC.
- Brassard, D., Dubé, M., & Tavares, J. R. (2019). Resistance welding of thermoplastic composites with a nanocomposite heating element. Composites Part B: Engineering, 165, 779-784. doi:10.1016/j.compositesb.2019.02.038
- Combette, P.. Ernoult, I., (2005). Physique des Polymères. Presses internationales Polytechniques.
- Daryl Janzen. (2018). Introduction to Electricity, Magnetism and Circuits. University of Saskatchewan.
- Dhondt M.C. (2019). Focused heat generation in weld zones of carbon fiber laminates by magnetic field manipulation and carbon fiber susceptors. Thèse de maîtrise en science, Université de Delft.
- Dubé, M., Hubert, P., Gallet, J. N. A. H., Stavrov, D., Bersee, H. E. N., & Yousefpour, A. (2011). Metal mesh heating element size effect in resistance welding of thermoplastic composites. Journal of Composite Materials, 46(8), 911-919. doi:10.1177/0021998311412986
- El-Hajjar, R., Tan, H., & Pillai, K. M. (2013). 3 Advanced processing techniques for composite materials for structural applications. In N. Uddin (Ed.), Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Civil Engineering (pp. 54-77e): Woodhead Publishing.

- Gouin O'Shaughnessey, P., Dubé, M., & Fernandez Villegas, I. (2016). Modeling and experimental investigation of induction welding of thermoplastic composites and comparison with other welding processes. Journal of Composite Materials, 50(21), 2895-2910. doi:10.1177/0021998315614991
- Haimbaugh, R. E. (2015). Practical Induction Heat Treating: ASM International. doi: https://doi.org/10.31399/asm.tb.piht2.9781627083119
- Haimbaugh RE. (2001). Practical induction heat treating. ASM International. doi: https://www.asminternational.org/materials-resources/results/-/journal_content/56/10192/25576493/PUBLICATION
- Hendlmeier, A., Marinovic, L. I., Al-Assafi, S., Stojcevski, F., & Henderson, L. C. (2019). Sizing effects on the interfacial shear strength of a carbon fibre reinforced twocomponent thermoplastic polymer. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 127. doi:10.1016/j.compositesa.2019.105622
- Hou, M., Yang, M., Beehag, A., Mai, Y.-W., & Ye, L. (1999). Resistance welding of carbon fibre reinforced thermoplastic composite using alternative heating element. Composite Structures, 47(1), 667-672. doi:https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00047-7
- Kazemi, M. E., Shanmugam, L., Lu, D., Wang, X., Wang, B., & Yang, J. (2019). Mechanical properties and failure modes of hybrid fiber reinforced polymer composites with a novel liquid thermoplastic resin, Elium®. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 125, 105523. doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105523

- Krishan K.Chawla. (1987). Composite Materials: Science and Engineering. Springer Science & Business Media.
- Lionetto, F., Pappadà, S., Buccoliero, G., & Maffezzoli, A. (2017). Finite element modeling of continuous induction welding of thermoplastic matrix composites. Materials & Design, 120, 212-221. doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.024
- Mahdi, S., Kim, H. J., Gama, B. A., Yarlagadda, S., & Gillespie, J. W. (2003). A Comparison of Oven-cured and Induction-cured Adhesively Bonded Composite Joints. Journal of Composite Materials, 37(6), 519-542. doi:10.1177/0021998303037006776
- Manring, L. E. (1991). Thermal degradation of poly(methyl methacrylate). 4. Random sidegroup scission. Macromolecules, 24(11), 3304-3309. doi:10.1021/ma00011a040
- Miller, A., Chang, C., Payne, A., Gur, M., Menzel, E., & Peled, A. (1990). The nature of induction heating in graphite-fiber, polymer-matrix composite materials. SAMPE Journal, 26, 37-54.
- Mitschang, P., Rudolf, R., & Neitzel, M. (2002). Continuous Induction Welding Process, Modelling and Realisation. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 15(2), 127-153. doi:10.1177/0892705702015002451
- Moser, L. (2012). Experimental Analysis and Modeling of Susceptorless Induction Welding of High Performance Thermoplastic Polymer Composites. Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern. Retrieved from https://kluedo.ub.unikl.de/frontdoor/index/index/docId/4740 https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-47404

- Muthuraj, R., Grohens, Y., & Seantier, B. (2017). Mechanical and thermal insulation properties of elium acrylic resin/cellulose nanofiber based composite aerogels. Nano-Structures & Nano-Objects, 12, 68-76. doi:10.1016/j.nanoso.2017.09.002
- Murray, R. E., Roadman, J., & Beach, R. (2019). Fusion joining of thermoplastic composite wind turbine blades: Lap-shear bond characterization. Renewable Energy, 140, 501-512. doi:10.1016/j.renene.2019.03.085
- Obande, W., Mamalis, D., Ray, D., Yang, L., & Ó Brádaigh, C. M. (2019). Mechanical and thermomechanical characterisation of vacuum-infused thermoplastic- and thermoset-based composites. Materials & Design, 175. doi:10.1016/j.matdes.2019.107828
- Raponi, O. d. A., Barbosa, L. C. M., de Souza, B. R., & Ancelotti Junior, A. C. (2018). Study of the influence of initiator content in the polymerization reaction of a thermoplastic liquid resin for advanced composite manufacturing. Advances in Polymer Technology, 37(8), 3579-3587. doi:10.1002/adv.22142
- Reyes, G., & Sharma, U. (2010). Modeling and damage repair of woven thermoplastic composites subjected to low velocity impact. Composite Structures, 92(2), 523-531. doi:10.1016/j.compstruct.2009.08.038
- Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. (2017). Handbook of induction heating. Retrieved from https://doi.org/10.1201/9781315117485
- Rudolf, R., Mitschang, P., & Neitzel, M. (2000). Induction heating of continuous carbon-fibrereinforced thermoplastics. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 31(11), 1191-1202. doi:https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00094-4

- Ruffini, R., Ruffini, R., Nemkov, V., and Goldstein, R. (1999). Advanced Design of Induction Processes and Work Coils for Heat Treating and Assembly in Automotive Industry. SAE Technical Paper 1999-01-3379. <u>https://doi.org/10.4271/1999-01-3379</u>.
- Rydin, R. W. (1996). Using the drop weight impact tower to evaluate impact resistance of FRP composite plates. (Ph.D.). University of Delaware, Ann Arbor. Retrieved from <u>https://www.proquest.com/dissertations-theses/using-drop-weight-impact-tower-evaluate/docview/304313019/se-2?accountid=27231</u>
- Sanders, P. (1987). Electromagnetic welding: an advance in thermoplastics assembly. Materials & Design, 8(1), 41-45. doi:https://doi.org/10.1016/0261-3069(87)90059-8
- Shir, F., Mavriplis, C., & Bennett, L. H. (2005). Effect of Magnetic Field Dynamics on the Copper-Constantan Thermocouple Performance. Instrumentation Science & Technology, 33(6), 661-671. doi:10.1080/10739140500311239
- Silva, L. F. M., Ramos, J., de Figueiredo, M., & Strohaecker, T. (2006). Influence of the Adhesive, the Adherend and the Overlap on the Single Lap Shear Strength. 7. https://etsmtl.on.worldcat.org/atoztitles/link?sid=ProQ:&issn=&volume=&issue= &title=Using+the+drop+weight+impact+tower+to+evaluate+impact+resistance+of +FRP+composite+plates&spage=&date=1996-01-01&atitle=Using+the+drop+weight+impact+tower+to+evaluate+impact+resistance
 +of+FRP+composite+plates&au=Rydin%2C+Richard+Warren&id=doi: ProQuest Dissertations & Theses Global database. (9632612)
- Smith, G. (2010). Induction consolidation/molding of thermoplastic composites using smart susceptors. International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings).

- Society for the Advancement of, M., & Process, E. 2018. Impact Behaviour and Repair of Long Fiber in situ Polymerized Thermoplastic. In CAMX - The Composites and Advanced Materials Expo, October 15-18, 2018 - Conference/October 16-18, 2018
 Exhibits, Kay Bailey Hutchison Convention Center/Dallas, TX: Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE).
- Stokes, V. K. (2003). Experiments on the induction welding of thermoplastics. Polymer Engineering & Science, 43(9), 1523-1541. doi:https://doi.org/10.1002/pen.10129
- Suwanwatana, W., Yarlagadda, S., & Gillespie, J. W. (2006). Influence of particle size on hysteresis heating behavior of nickel particulate polymer films. Composites Science and Technology, 66(15), 2825-2836. doi:10.1016/j.compscitech.2006.02.033
- Tarpani, J. R., Canto, R. B., Saracura, R. G. M., Ibarra-Castanedo, C., & Maldague, X. P. V. (2014). Compression After Impact and Fatigue of Reconsolidated Fiber-reinforced Thermoplastic Matrix Solid Composite Laminate. Procedia Materials Science, 3, 485-492. doi:10.1016/j.mspro.2014.06.081
- Yarlagadda, S., Fink, B. K., & Gillespie, J. W. (1998). Resistive Susceptor Design for Uniform Heating during Induction Bonding of Composites. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 11(4), 321-337. doi:10.1177/089270579801100403
- Yarlagadda, S., Kim, H. J., Gillespie, J. W., Shevchenko, N. B., & Fink, B. K. (2002). A Study on the Induction Heating of Conductive Fiber Reinforced Composites. Journal of Composite Materials, 36(4), 401-421. doi:10.1177/0021998302036004171
- Zhong Zhang, K Frieldrich, S Fakirov. (2005). Polymer composites: from nano to macro scale. Springer Science & Business Media. doi: <u>https://doi.org/10.1007/b137162</u>

Zinn S, Semiatin SL. (1988). Coil design and fabrication: basic design and modifications. Heat Treat 1998:32–6. Doi: https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/coil_design.pdf