



HAL
open science

Endommagement des structures hybrides collées

Olga Klinkova

► **To cite this version:**

Olga Klinkova. Endommagement des structures hybrides collées. Mécanique des structures [physics.class-ph]. Sorbonne Université, 2021. tel-03558606

HAL Id: tel-03558606

<https://hal.science/tel-03558606>

Submitted on 4 Feb 2022

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

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

Habilitation à Diriger des Recherches

Olga KLINKOVA

Maître de Conférences à ISAE-SUPMECA
Laboratoire Quartz EA 7393

Endommagement des structures hybrides collées

Soutenue le 9 Novembre 2021 à Saint-Ouen

devant un jury composé de :

Peng WANG, Professeur, ENSISA de Mulhouse	Rapporteur
Mohamed ICHCHOU, Professeur, École Centrale de Lyon	Rapporteur
Frédéric JACQUEMIN, Professeur, Université de Nantes	Rapporteur
Gilles REGNIER, Professeur, ENSAM de Paris	Examineur
Zoheir ABOURA , Professeur, Roberval - UTC	Examineur
Corrado MAURINI, Professeur, UPMC	Examineur
Imad TAWFIQ, Professeur, ISAE-Supmeca	Examineur

Remerciements

La réalisation de ce travail a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance. Je voudrais tout d'abord remercier M. Peng, M. Jacquemin et M. Ichchou pour avoir accepté de rapporter ces travaux et m'avoir prodigué des conseils enrichissants en vue d'améliorer la qualité de ce manuscrit. Je remercie également M. Regnier, M. Maurini et M. Tawfiq pour avoir participé à mon jury, ainsi que Mr. Aboura pour l'avoir présidé.

Je tiens à remercier les stagiaires et doctorants qui apportent un regard neuf et nous permettent de mieux apprendre. Les résultats présentés ici doivent beaucoup à ces jeunes en particulier à Georges Zambelis, Rawdha Kessentini, Amal Bechikh, Oumeyma Hamlaoui et Ichrak Ben Amor.

Je remercie l'ensemble de mes collègues du laboratoire avec qui j'ai pu avoir des discussions riches. Je remercie M. Imad Tawfiq, pour m'avoir donné des conseils et qui de par ses exigences m'a permis d'améliorer en permanence la qualité de ce manuscrit. Je remercie également M. Tony Da Silva Botelho pour ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion, M. Florent Couffin et Mme Geneviève Inglebert qui ont permis d'améliorer la clarté de ce document. Je tiens à remercier mes collègues de l'équipe de tribologie et de matériaux, en particulier Mme Isabelle Lemaire Caron et Mme Muriel Quilien pour leur soutien et l'aménagement de mes activités d'enseignement, me permettant de mener à bien mes activités de recherche, Mme Dhurata Katundi pour son soutien et l'encouragement depuis ma prise de poste, M. Julien Fortes Da Cruz, M. Jean-Philippe Crête et Mme Maria Letizia Raffa, M. Emin Bayraktar pour toutes leurs réflexions sur ce travail et le temps qu'ils m'ont consacré. Et j'en oublie sûrement, qu'ils me pardonnent...

Je voudrais adresser toute ma gratitude à Fabien, mon mari, pour son engagement, sa patience, sa disponibilité qui ont largement permis la rédaction de ce travail. Je souhaite également dire un grand merci à Victor, Maxime et Angela, mes électrons libres, qui sont la source de ma motivation et mon de mon courage.

Table des matières

Remerciements	3
Introduction	8
1 Parcours académique et professionnel	9
1.1 Curriculum Vitae	10
1.1.1 Parcours	10
1.1.2 Activités d'enseignement	11
1.1.3 Responsabilités pédagogiques et scientifiques	12
1.1.4 Responsabilités collectives	14
1.1.5 Mandats	15
1.1.6 Distinctions particulières	15
1.2 Publications et production scientifique	15
1.2.1 Revues internationales à comité de lecture	16
1.2.2 Conférences internationales avec actes	17
1.2.3 Conférences nationales avec actes	18
1.2.4 Conférences sans actes	19
1.2.5 Brevet	20
1.2.6 Articles en cours d'évaluation	20
1.3 Encadrements scientifiques	21
1.3.1 Thèses doctorales	21

1.3.2	Masters recherche	22
1.4	Participation à des projets nationaux et internationaux	23
1.5	Collaboration internationales	24
1.6	Expertises scientifiques	25
2	Synthèse des activités de recherche	27
2.1	Identification d'endommagement et vieillissement de matériaux composites	28
2.2	Endommagement à l'échelle microscopique	33
2.3	Endommagement à l'échelle meso/macrosopique	40
2.4	Assemblages collés	42
2.4.1	Contexte	42
2.5	Traitement de surface et caractérisation de l'adhérence dans les assemblages	43
2.6	Modélisation thermo-hygro-mécanique couplée	52
2.7	Vieillessement	57
2.8	Tolérance aux dommages	59
2.8.1	Caractérisation expérimentale des assemblages collés	60
2.8.2	Calcul du taux de restitution d'énergie	61
2.8.3	Nouvelle méthode d'essai en fatigue	63
2.9	Régénération des composites	65
3	Projet scientifique	67
3.1	Axe modélisation multi-échelles de l'assemblage multi-matériaux	68
3.1.1	FATCOM: Modélisation du comportement en fatigue d'assemblages collés multi-matériaux	68
3.1.2	MultiBIOCOMP : Modélisation multi-échelle des assemblages collés intégrant des bio-composites.	69
3.2	Axe d'instrumentation et caractérisations avancées	71
3.2.1	SHMonit: Monitorat des procédés et de durée de vie et de l'intégrité	71
3.2.2	SMARTComp: Durabilité des composites intelligents	74
3.3	Axe transversal: FrottCompUs: Étude du comportement tribologique et de l'usure de composites.	75

Table des matières

Conclusion	79
Bibliographie	92

Introduction

J'ai préparé ma thèse de doctorat en Mécanique et Ingénierie à l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSM-SE) et à l'école Nationale d'Ingénieurs de Saint-Étienne (ENISE), au Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), UMR CNRS 5513. Les travaux de ma thèse, intitulés "Simulation numérique de la cuisson et de l'usinage de matériaux composites", ont été effectués puis soutenus le 13 juin 2012, sous la direction de Jean-Michel Bergheau et Sylvain Drapier. Durant ma thèse, la simulation numérique de fabrication des composites a été traitée par une approche macroscopique couplée faiblement pour ce problème complexe de la thermo-mécanique, et également thermo-physico-chimique. Le modèle numérique tridimensionnel de cuisson d'un matériau composite stratifié a été validé en le confrontant à une étude expérimentale. D'autre part, la simulation numérique de fraisage a été mise en place en modélisant l'enlèvement de matière couplé à la fabrication. Les analyses expérimentales microscopiques sur les différents matériaux composites testés ont mis en évidence la présence possible d'endommagement au sein de matériaux générés soit lors de la préparation du matériau avant la phase de la fabrication, soit lors de la cuisson ; elles ont orienté ma recherche vers le domaine d'endommagement des structures composites multi-échelles.

En Septembre 2012, j'ai été recrutée en tant que chercheur postdoctoral, au Centre des Matériaux de l'École des Mines de Paris, sous la direction de Lucien Laiarinandrasana, Thilo Morgeneyer et Henry Proudhon. Mes travaux portaient sur la modélisation multiaxiale du comportement, de l'endommagement et de la rupture de polymères semi-cristallins à partir d'observations 3D en tomographie X à haute résolution. Durant mon postdoctorat, les observations tomographiques nous ont permis de révéler la microstructure sphérolitique des polymères semi-cristallins, une germination de craquelures, ainsi que de mettre en évidence le gradient d'endommagement très prononcé. Les modèles mathématiques d'analyses d'images sous Matlab sont ensuite utilisés afin d'analyser ces volumes reconstruits en termes de d'histogramme, de fraction volumique et de dispersion spatiale.

Puis en Septembre 2013, j'ai été recrutée à l'Institut Supérieur de Mécanique de Paris (Supméca) au laboratoire de l'Ingénierie des Systèmes Mécaniques et des Matériaux (LISMMA) EA2336 en tant que Maître de Conférences sur le poste 4019 (Matériaux composites : comportement mécanique sous sollicitations thermo-hygro-mécaniques). En 2015, les laboratoires ECS-Lab, LARIS et LISMMA ont fusionné pour donner naissance au Laboratoire Quartz (EA 7393). Les thématiques de nos recherches concernent l'analyse des endommagements des matériaux sous l'action de sollicitations. Je travaille sur des problématiques liées à l'étude des matériaux composites assemblés par collages, leurs comportements mécaniques sous sollicitations thermo-hygro-mécaniques, dans l'équipe Tribologie et Matériaux, dirigée par Tony Da Silva Botelho, Professeur des Universités. Ma contribution se situe en interface entre la méca-

nique de la rupture et la mécanique d'endommagement des composites et structures hybrides collées. Je m'intéresse plus particulièrement à une approche expérimentale ainsi qu'analytique afin de déterminer les paramètres qui interviennent dans le modèle numérique.

Cette Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) se veut une synthèse de mes activités d'enseignement, de responsabilités administratives, de recherche et leurs perspectives. Le présent rapport est divisé en trois parties :

La première partie concerne mon Curriculum Vitae, synthétisant mon expérience professionnelle et mon parcours depuis mon doctorat. Je présenterai mes activités d'enseignement, de responsabilités scientifiques, pédagogiques et administratives, d'encadrement doctoral, de diffusion scientifique. Cette partie se termine par une synthèse de ma production scientifique.

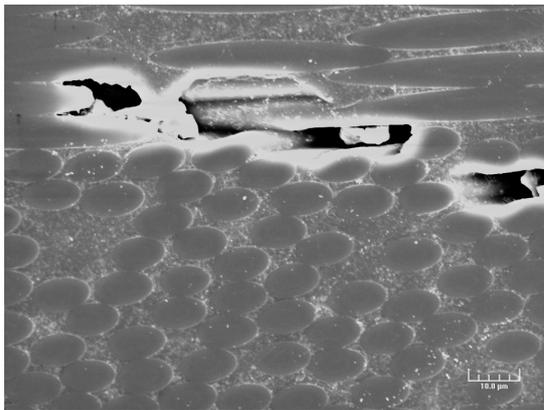
Dans une deuxième partie, je présente mes activités de recherche, dont la thématique est l'endommagement des structures hybrides collées. A cette occasion, je décrirai plusieurs activités de recherche basées sur :

- Micromécanismes des déformation et cavitation à l'aide de la tomographie
- Endommagement à l'échelle méso et macroscopique
- Assemblage par collage
- Traitement de surfaces, caractérisation de l'adhérence et de l'énergie libre des surfaces
- Modélisation des assemblages collés
- Durabilité des assemblages collés
- Tolérance aux dommages
- Régénération des composites

Cette partie s'achève par une conclusion. Dans la dernière partie, je présente mon projet de recherche ainsi que les références bibliographiques.

Chapitre 1

Parcours académique et professionnel



Résumé

Dans cette première partie, je détaille mes activités pédagogiques et administratives. Je présente ensuite une synthèse de mes travaux de recherche sur l'endommagement des matériaux organiques et des assemblages collés. Je détaille mes encadrements scientifiques, et enfin mes projets de recherche internationaux et nationaux, ainsi que les expertises scientifiques.

1.1 Curriculum Vitae

Olga KLINKOVA, Maître de Conférences

Née le 12 septembre 1982 à Tachkent, Ouzbékistan

Nationalité : Française

Situation de famille : 3 enfants

Adresse professionnelle : 3 rue Fernand Hainaut, 93407 Saint Ouen Cedex

email : olga.klinkova@isae-supmeca.fr

Tel. : +33 (0)1 49 45 29 57

Mob. : +33 (0)6 29 19 55 55

ORCID : [0000-0002-0820-3502](https://orcid.org/0000-0002-0820-3502)

Section CNU : 60, qualifiée en 2012

1.1.1 Parcours

Depuis 2013 : Maître de Conférences (CNU 60 emploi MCF4019) à ISAE-Supméca.

2012 - 2013 : Chercheur associé (Post doc) au Centre des Matériaux de l'École des Mines de Paris, ARMINES : Modélisation multiaxiale du comportement, de l'endommagement et de la rupture de polymères semi-cristallins à partir d'observations 3D en tomographie X à haute résolution, en collaboration avec M. Lucien Laiarinandrasana, M. Thilo Morgeneyer et M. Henry Proudhon.

2008 - 2012 : Ingénieur de recherche contractuel (doctorante) à l'École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne et l'École des Mines de Saint-Etienne, au laboratoire LTDS, UMR CNRS 5513. La thèse de Doctorat soutenue le 13/06/2012 à Saint-Étienne, intitulée : Simulation numérique de la cuisson et de l'usinage de matériaux composites [88], devant le jury composé de :

M. Henri PARIS, Professeur des universités, G-SCOP, INPG - Grenoble (Président), M. Frédéric JACQUEMIN, Professeur des universités, GeM - Saint-Nazaire (Rapporteur), M. Philippe OLIVIER, Professeur des universités, Institut Clément Ader - Toulouse (Rapporteur), M. Jean-Michel BERGHEAU, Professeur des universités, LTDS, Ecole Centrale de Lyon (Directeur de thèse), M. Sylvain DRAPIER, Professeur des universités, SMS, ENSM - Saint-Étienne (co-encadrant), M. Joel RECH, Maître de Conférences, LTDS, ENISE - Saint-Étienne (Examinateur), Mme Michelle SALVIA, Maître de Conférences, LTDS, Ecole Centrale - Lyon (Examinatrice) et M. Claude DAUPHIN, Ingénieur, HEX-CEL Composites - Dagneux (Invité).

2005 - 2008 : Master de Sciences en Mécatronique, Université de Siegen, Allemagne.

2003 - 2005 : Ingénieur système informatique au Centre d'Aérogéodésie, Cartographie et Cadastre de la République d'Ouzbékistan.

1999 - 2003 : BSc Ingénieur en Automatisation et Contrôle, Université Polytechnique de Tachkent, Ouzbékistan.

1.1.2 Activités d'enseignement

Mes activités d'enseignement ont débouté à l'ENISE durant une période de 2 ans comme vacataire dans les domaines de la mécanique, des mathématiques et des matériaux. Puis elles se sont poursuivies dès mon recrutement en tant que Maître de conférences à Supméca. Des enseignements très divers, dans des domaines de la mécanique et des matériaux, m'ont été confiés. L'essentiel de mes activités d'enseignement est synthétisé dans le Tableau 1.1.

La Figure 1.1 récapitule les heures effectuées selon l'année universitaire, sauf les années de vacation, qui sont regroupées ensembles. Depuis mon recrutement à Supméca, mon service annuel d'enseignement a toujours été supérieur au service statutaire annuel de 192h Eq. TD. Suite à une grossesse et la naissance de ma fille en 2018, j'ai pris un congé de maternité puis un congé parental, ce qui explique mon absence sur l'année 2018 - 2019 sur la Fig. 1.1, cette année ne figure également pas dans le Tab. 1.1. J'ai repris mes fonctions à 80% depuis septembre 2019 pour élever ma fille de moins de 3 ans, avec un service d'enseignement statutaire de 153h Eq. TD.

Statut	Doctorante	Maître de conférences							
		2009 2011	2013 2014	2014 2015	2015 2016	2016 2017	2017 2018	2019 2020	2020 2021
MATIÈRES									
Mécanique du solide déformable	16								
Matériaux non métalliques	12								
Résistance des matériaux	54	64	58	46	60	68	22	30	
Mathématiques pour l'ingénieur	8								
Choix des Matériaux		95	114,75	133	65	116	89	85	
Composites			27	17	12	15	16	12	
Polymères					22	22			
Contrôle non destructif			4						
Mécanique des surfaces		40	24	49	47,5	41,5	6	8	
Encadrement PSYN		14	10	14	13	13	14	17	
Soutenances/stages/projets		19,5	81	118	98	60	21	12	
TOTAL h/an	90	232,5	318,75	377	317,5	335,5	168	164	

TABLE 1.1 – Récapitulatif de mes activités d'enseignement en Heures équivalent TD

Au total, en 9 années d'exercice de mes fonctions, je dois totaliser à peu près 1800 heures d'enseignement équivalent TD, pour la plupart effectuées à Supméca.

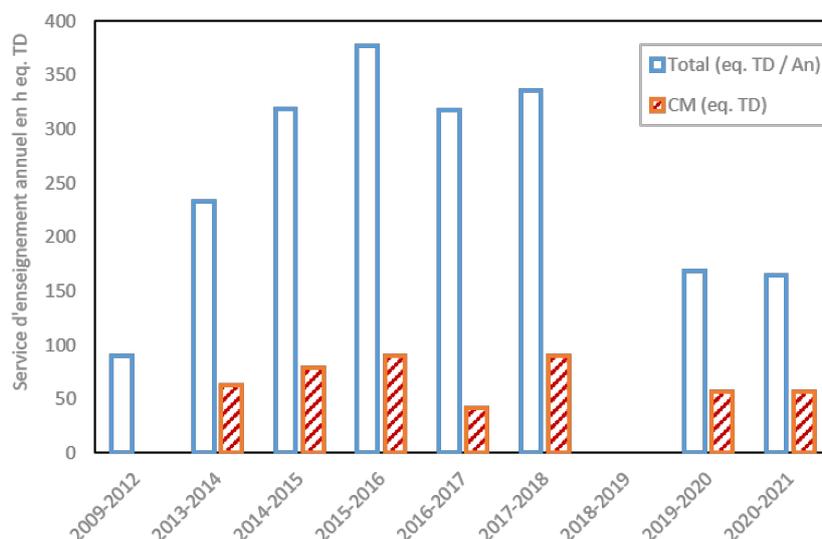


FIGURE 1.1 – Représentation graphique de mon service d’enseignement en distinguant les CM (Cours Magistraux) et les TD/TP en heures éq. TD par année universitaire.

1.1.3 Responsabilités pédagogiques et scientifiques

Responsabilités pédagogiques

Mes enseignements portent principalement sur les modules dont j’ai la responsabilité pédagogique : Matériaux 1 (MATE 1), Matériaux 2 (MATE 2), Choix des Matériaux et des Procédés (SDM3), Composites (COMP) et Traitements de surface et revêtements (TSRE). Le Tab. 1.2 récapitule les cours, le niveau et le statut des apprenants (étudiants, apprentis, formation continue, L1, M1, M2), le nombre approximatif des apprenants, ainsi que le type de module.

Module	Niveau	Nombre d’étudiants	Type de module
MATE 1	L3	150	Tronc commun, élèves sous statut étudiant
MATE 2	L3	150	Tronc commun, élèves sous statut étudiant
SDM3	M1	25	Tronc commun, élèves sous statut apprenti
COMP	M2	30	Obligatoire de parcours et M2 de Paris 13
TSRE	M2	30	Obligatoire de parcours et M2 de Paris 13

TABLE 1.2 – Synthèse des cours dont je suis responsable

Les objectifs de cours sont :

- i) **MATE 1** : savoir déployer une démarche fiable de choix des matériaux en vue de la conception et de l’utilisation de systèmes mécaniques.
- ii) **MATE 2** : acquérir les connaissances de base des matériaux et des procédés de fabrication pour des applications dans les industries mécaniques pour les ingénieurs mécaniciens.

- iii) **SDM3** : déployer une démarche de choix des matériaux avec un éco-audit pour réduire l'impact environnemental d'un produit simple.
- iv) **COMP** : présenter les matériaux composites, leurs natures, leurs conceptions, leurs propriétés et leurs domaines réels d'applications.
- v) **TSRE** : sensibiliser à la nécessité d'apporter des modifications à la surface des pièces pour répondre aux spécificités des surfaces (contraintes d'aspect, résistance à la corrosion, contact avec d'autres pièces,).

En tant qu'enseignant référent du module, j'anime et coordonne les enseignements entre les différents intervenants dans les matières citées. Je réalise les supports de cours, TD et TP, la gestion du site internet du module. Je participe régulièrement aux divers jurys de validation de semestre et jurys de diplômes.

J'assure également le tutorat pédagogique de plusieurs stages de fin d'études (STG3) du parcours MPS (Matériaux, Procédés et Simulation). Je participe aux enseignements et à l'encadrement des projets de synthèse (PSYN) de ce parcours. Je fais le suivi de mémoire d'apprenti, 1 à 2 apprentis par an.

Responsabilités scientifiques

Depuis ma prise de fonction, en 2013, j'ai progressivement été chargée de renouveler et de mettre en place des moyens d'essais orientés vers une recherche innovante sur les matériaux composites en obtenant les budgets nécessaires à ces équipements :

- Porteur du projet SESAME IMCA (Innovations autour des Matériaux Composites Avancés), demande de financement de moyens "semi-lourds" pour la recherche innovante en Ile-de-France, 2014.
- Participation à la rédaction du cahier des charges pour l'acquisition d'un Microscope Électronique à Balayage. Nous avons acquis un MEB JOEL JSM 6010 et son spectromètre dispersif en énergie (SDE) pour 105 k€ HT en Juin 2015.
- Chargée de coordonner l'appel d'offre sur l'acquisition de moyens de fabrication de matériaux composites. Nous avons acquis une presse et une unité d'injection (DK technologies) pour 103 k€ HT en Juin 2015.
- Chargée de coordonner l'appel d'offre sur l'acquisition de moyens d'essai climatique. Nous avons acquis un enceinte climatique EXCAL 1423-HA (Climats) pour 47 k€ HT en Juin 2016.
- Participation à la rédaction du cahier des charges pour l'acquisition d'une machine de traction. Nous avons acquis une machine de traction ProLine Z100 TN (Zwick) pour 43 k€ HT en Juin 2017.
- Participation au montage d'une thèse CIFRE avec Airbus Helicopters sur la tolérance au dommage des assemblages collés composite-métal en 2014. La thèse de G. Zambelis [158] est soutenue en Novembre 2017.
- Participation aux montages de thèses en cotutelles (4 thèse depuis 2015, dont 2 soutenues)

1.1.4 Responsabilités collectives

En 2020, j'ai été nommé **Responsable des séminaires** par la direction du laboratoire Quartz. Cette tâche consiste principalement de deux actions de valorisation scientifique :

- Organisation des **Journées des Doctorants** du laboratoire (2 fois/an). Il s'agit d'organiser un concours "Ma thèse en 180 secondes" ouverts aux doctorants de 2 et 3 années, sellons les sessions. Les doctorants doivent présenter leur sujet de recherche, en termes simples, en trois minutes. L'exposé est ensuite juré par le jury.
- Organisation des **Séminaires hebdomadaires** des membres de Quartz. Chaque thème du laboratoire assure à tour de rôle un séminaire, avec l'objectif de mieux se connaître au sein d'un thème, au sein d'un axe et plus globalement au sein du laboratoire, d'échanger sur nos modèles, nos outils, nos méthodes et pour développer des travaux communs et transversaux. Les présentations sont ouvertes à tous les membres de Quartz ainsi qu'aux élevés ingénieur. Depuis la crise sanitaires, ces séminaires sont organisés en distanciel (sous Teams), donc la gestion informatique est également assurée dans le cadre de cette responsabilité.
- **Membre d'équipe de communication Quartz**. Nous intervenons sur la gestion des valorisations scientifiques, le pilotage du contenu du nouveau site du laboratoire, l'homogénéisation entre les différents thèmes du laboratoire.
- **Membre du comité d'organisation et du comité scientifique** de 4^e Colloque Les Assemblages Mécaniques à Supmeca, Saint-Ouen, 2021
- **Membre du comité d'organisation** de Conférence Internationale aux Arts et Métiers ParisTech, Paris, 2010.

Sociétés savantes - Commissions et jurys

J'ai été sollicitée pour participer aux **comités de sélection** des maîtres de conférences (MCFs) :

- Rapporteur et membre du comité de sélection à Supméca pour le poste de MCF 4078 CNU 60 - (Tribologie : Modélisation des interfaces), en 2020,
- Membre d'un comité de sélection à Supméca pour le poste de MCF 4072 CNU 60 - (Dynamique des structures), en 2018,
- Rapporteur et membre du comité de sélection à Supméca pour le poste MCF 4062 CNU 61 - (Ingénierie système et sûreté de fonctionnement), en 2017,
- Rapporteur et membre du comité de sélection à INSA Centre Val de Loire en partenariat avec INSA Euro-Méditerranée, Laboratoire de Mécanique et Rhéologie pour le poste MCF 0037 CNU 60 et 28 - (Caractérisation et Modélisation des Matériaux), en 2016,
- Rapporteur et membre du comité de sélection à Supméca pour le poste MCF 4044 CNU 60 - (Matériaux composites), en 2015,
- Rapporteur et membre du comité de sélection à Supméca pour le poste MCF 4054 CNU 61 - (Systèmes mécatroniques), en 2015.
- **Membre de l'AFM** (Association Française de Mécanique)

- **Membre de l'AMAC** (Association pour les Matériaux Composites)
- **Examineur** dans 3 jurys de thèse (Quartz) :
 - Amal BECHIKH, 2020
 - Rawdha KESSENTINI, 2018
 - Georges ZAMBELIS, 2017

1.1.5 Mandats

Dans le cadre de mes activités d'enseignement et de recherche, j'ai eu l'occasion de prendre des responsabilités au niveau de l'établissement et du laboratoire :

2020- : Membre élu du Conseil de Laboratoire Quartz (Collège Enseignants, Enseignants-Chercheurs et Chercheurs Docteurs).

2014-2015 : Membre élu du Conseil des Études et de la Vie Universitaire de l'Institut Supérieur de Mécanique de Paris (Collège B), élection partielle.

2009-2010 : Membre élu du Comité Scientifique du Laboratoire Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS).

1.1.6 Distinctions particulières

Nov. 2018 : Titulaire de la PEDR (Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche).

Avril 2011 : Prix du meilleur poster de recherche, Journée des Doctorants à Saint-Etienne.

Avril 2010 : Prix de la meilleure thèse du SAMPE (Society for the Advancement of Material and Process Engineering) Europe, sélectionnée comme représentante de l'Europe au concours mondial aux USA.

Mars 2010 : Prix de la meilleure thèse du SAMPE au niveau Français, sélectionnée comme représentante de la France au concours Européen.

1.2 Publications et production scientifique

La production scientifique appréciée par les publications est classée en quatre catégories :

- Revues internationales à comité de lecture (15)
- Conférences internationales avec actes (14)
- Conférences nationales avec actes (5)
- Conférences sans actes (12)
- Brevet (1)
- Articles soumis (1)

1.2.1 Revues internationales à comité de lecture

- A-15. R. Kessentini, **O. Klinkova**, I. Tawfiq, M. Haddar. Theoretical and experimental investigation of bonded patch repairs of a rubber reinforced composite conveyor belt. *Polymers*, 13 : 1710, may 2021 (**IF 3.426**) [DOI](#)
- A-14. A. Bechikh, **O. Klinkova**, Y. Maalej, I. Tawfiq, R. Nasri. Effect of dry abrasion treatments on composite surface quality and bonded joints shear strength. *Accepted à IJAA*, 2021, (**IF 2.671**) [DOI](#)
- A-13. A. Bechikh, **O. Klinkova**, Y. Maalej, I. Tawfiq, R. Nasri. Sandblasting parameter variation effect on galvanized steel surface chemical composition, roughness and free energy. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2020, (**IF 2.671**) [DOI](#)
- A-12. R. Kessentini, **O. Klinkova**, I. Tawfiq, M. Haddar. Modeling the moisture diffusion and hygroscopic swelling of a textile reinforced conveyor belt. *Polymer Testing*, 75 : 159-166, may 2019 (**IF 3.375**) [DOI](#)
- A-11. G. Zambelis, T. D. S. Botelho, **O. Klinkova**, I. Tawfiq, C. Lanouette. A new approach in testing fatigue fracture mechanics properties in asymmetrical bonded composite/metal assemblies. *Composites Part B : Engineering*, 158 : 390-399, feb 2019 (**IF 7.635**) [DOI](#)
- A-10. R. Kessentini, **O. Klinkova**, I. Tawfiq, M. Haddar. Transient hygrothermo-mechanical stresses analysis in multi-layers bonded structure with coupled bidirectional model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 150 : 188-201, jan 2019 (**IF 4.631**) [DOI](#)
- A-9. R. Kessentini, **O. Klinkova**, H. Jrad, I. Tawfiq, M. Haddar. Analytical and numerical investigation of coupled hygro-thermo-mechanical model of multi-layers bonded structure. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 84 : 108-118, aug 2018 (**IF 2.671**) [DOI](#)
- A-8. G. Zambelis, T. D. S. Botelho, **O. Klinkova**, I. Tawfiq, C. Lanouette. Evaluation of the energy release rate in mode I of asymmetrical bonded composite/metal assembly. *Engineering Fracture Mechanics*, 190 : 175-185, mar 2018 (**IF 3.426**) [DOI](#)
- A-7. N. Selles, P. Cloetens, H. Proudhon, T. F. Morgeneyer, **O. Klinkova**, N. Saintier, L. Laiarinandrasana. Voiding mechanisms in deformed polyamide 6 observed at the nanometric scale. *Macromolecules*, 50(11) : 4372-4383, may 2017 (**IF 5.918**) [DOI](#)
- A-6. Y. Cheng, L. Laiarinandrasana, L. Helfen, H. Proudhon, **O. Klinkova**, T. Baumbach, T. F. Morgeneyer. 3D damage micromechanisms in polyamide 6 ahead of a severe notch studied by in situ synchrotron laminography. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 217(5) : 701-715, jan 2016 (**IF 2.616**) [DOI](#)
- A-5. L. Laiarinandrasana, N. Selles, **O. Klinkova**, T. F. Morgeneyer, H. Proudhon, L. Helfen. Structural versus microstructural evolution of semi-crystalline polymers during necking under tension : Influence of the skin-core effects, the relative humidity and the strain rate. *Polymer Testing*, 55 : 297-309, oct 2016 (**IF 3.375**) [DOI](#)
- A-4. L. Laiarinandrasana, **O. Klinkova**, F. Nguyen, H. Proudhon, T. F. Morgeneyer, W. Ludwig. Three dimensional quantification of anisotropic void evolution in deformed semi-crystalline polyamide 6. *International Journal of Plasticity*, 83 : 19-36, aug 2016 (**IF 6.49**) [DOI](#)
- A-3. G. Chardon, **O. Klinkova**, J. Rech, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Characterization of friction properties at the work material/cutting tool interface during the machining of randomly structured carbon fibers reinforced polymer with poly crystalline diamond tool under dry conditions. *Tribology International*, 81 : 300-308, jan 2015 (**IF 4.271**). [DOI](#)

A-2. **O. Klinkova**, J. Rech, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Characterization of friction properties at the workmaterial/cutting tool interface during the machining of randomly structured carbon fibers reinforced polymer with carbide tools under dry conditions. *Tribology International*, 44(12) : 2050-2058, nov 2011 (**IF 4.271**) [DOI](#)

A-1. **O. Klinkova**, J. Rech, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Characterization of cured-induced residual stresses. *JEC composites*, 67 : 49-52, 2011 (**IF 0.06**)

Le tableau 1.3 récapitule l'impact factor (IF) des journaux dans lesquels j'ai publié, qui sont regroupés sur la Fig. 1.2. Les articles sont classés dans l'ordre du plus récent vers le plus ancien.

N référence	A-13	A-12	A-11	A-10	A-9	A-8	A-7	A-6	A-5	A-4	A-3	A-2
Impact Factor	2.6	3.3	7.6	4.6	2.6	3.4	5.9	2.6	3.3	6.4	4.2	4.2

TABLE 1.3 – "Impact factor", 2019 des journaux dans lesquels j'ai publié.

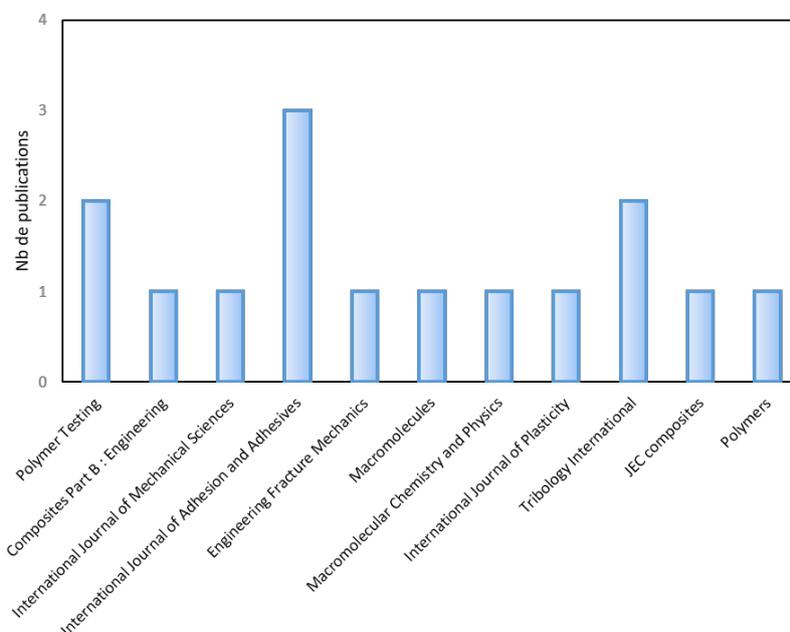


FIGURE 1.2 – Représentation du nombre de publications par journal.

1.2.2 Conférences internationales avec actes

CI-14. O. Hamlaoui, **O. Klinkova**, I. Tawfiq, R. Elleuch. Damage investigation of GFRP under riveting operation. A3M, Sfax, Tunisie, 25-27 mars, 2021.

CI-13. I. Ben Amor, **O. Klinkova**, I. Tawfiq, R. Elleuch. Regeneration process of short glass fibre reinforced polyamide for the production of electrical parts. International Conference on Acoustics and Vibration, ICAV'2020, 16-18 March 2020, Hammamet, Tunisia, 2020.

- CI-12. O. Hamlaoui, **O. Klinkova**, R. Elleuch, I. Tawfiq. Brital fracture of glass fiber reinforced PBT ; Application for a rivting operation. COTUME 2020, Hammamet, Tunisie, 20-22 mars, 2020.
- CI-11. A. Bechikh and O. Klinkova and Y. Maalej and I. Tawfiq and R. Nasri. The effect of different surface pretreatment parameters on galvanized steel to galvanized steel bonded assemblies shear strength and fracture energy. AB2019 Porto, Portugal, 11-12 July 2019.
- CI-10. O. Hamlaoui, **O. Klinkova**, R. Elleuch, I. Tawfiq. Investigation on Crack Damage of fiberglass-reinforced polybutylene terephthalate. CIMA2019, Hammamet, Tunisie (Advanced Materials) October 25-28, 2019.
- CI-9. R. Kessentini, H. Jrad, **O. Klinkova**, I. Tawfiq, M. Haddar. Experimental characterization of the effect of moisture uptake on conveyor textile belt. 7th International Congress Design and Modelling of Mechanical Systems, Hammamet, Tunisie, 27-29 March 2017.
- CI-8. R. Kessentini, H. Jrad, **O. Klinkova**, I. Tawfiq, M. Haddar. Evaluation of water ingression behavior of conveyor belt composite material. In 4th International conference of structural adhesive bonding, Porto, Portugal, 6-7 July 2017.
- CI-7. R. Kessentini, H. Jrad Hanen, **O. Klinkova**, I. Tawfiq, M. Haddar. Effect of thermal expansion coefficient on the strength of bonded joints under temperature load. In International Conference on Advanced Materials, Mechanics and Manufacturing A3M'2016, Hammamet, Tunisia, 19-21 December 2016.
- CI-6. R. Kessentini, H. Jrad, **O. Klinkova**, I. Tawfiq, M. Haddar. Analytical study of moisture stress distribution on sandwich structure. International Conference on Acoustics and Vibration, ICAV'2016, Hammamet, 21-23 March 2016, Tunisia 2016.
- CI-5. G. Zambelis, T. Da Silva Botelho, **O. Klinkova**, I. Tawfiq, C. Lanouette. Evaluation of the energy release rates (Mode I) in composite-metal specimens assembled by bonding. 3rd International Conference on Structural Adhesive Bonding, 2015.
- CI-4. L. Laiarinandrasana, L.Helfen, H. Proudhon, **O. Klinkova**, T. Baumbach, Y. Cheng, T. F. Morgeneyer. In situ crack initiation and propagation in semicrystalline polyamide 6 revealed by 3D synchrotron radiation laminography. PhotoMechanics, Delft Netherlands, 27-29 Mai 2014.
- CI-3. **O. Klinkova**, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Characterization of cured induced residual stresses. 67 : 49-52. JEC, Paris, France, 2011.
- CI-2. **O. Klinkova**. Prediction of composite materials distortion with PAM-DISTORTION. ESI Group Success story, 1-2, 2011.
- CI-1. **O. Klinkova**, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Simulation of residual stresses in T300/914 composite structures. SETEC 10 - SAMPE Europe Brindisi, 16-17 Sept., 1-8, 2010.

1.2.3 Conférences nationales avec actes

- CN-5. R. Kessentini, **O. Klinkova**, H. Jrad, I. Tawfiq, M. Haddar. Méthodologie de caractérisation hydrique d'une bande de convoyeur en matériau composite. JNC20, Champs sur Marne, France, 2017.
- CN-4. G. Zambelis, T. D. S. Botelho, **O. Klinkova**, I. Tawfiq, C. Lanouette. Calcul du taux de restitution d'énergie en mode I et II sur assemblage composite-métal. JNC19, Villeurbanne France, 2015.

- CN-3. **O. Klinkova**, F. Bremond, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Simulation des contraintes résiduelles dans les structures composites : déformation après cuisson. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France, Volume 1, pages 339-344, 2009.
- CN-2. **O. Klinkova**, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Characterisation of cured-induced residual stresses in composite structures : measurements and prediction of angular variations. 16eme Journées Nationales sur les Composite, Toulouse, France, pages 353-354. 2009.
- CN-1. **O. Klinkova**, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Simulation des contraintes résiduelles dans les structures composites : déformée après cuisson et usinage. 19ème Congrès Français de Mécanique, Marseille, France, pages 1-6, 2009.

La Figure 1.3 synthétise graphiquement le nombre de publications en fonction des années. Pour le rappel, l'année 2012 correspond à l'année de la soutenance de ma thèse et l'année 2013 à ma prise de fonction de MCF à ISAE-Supméca.

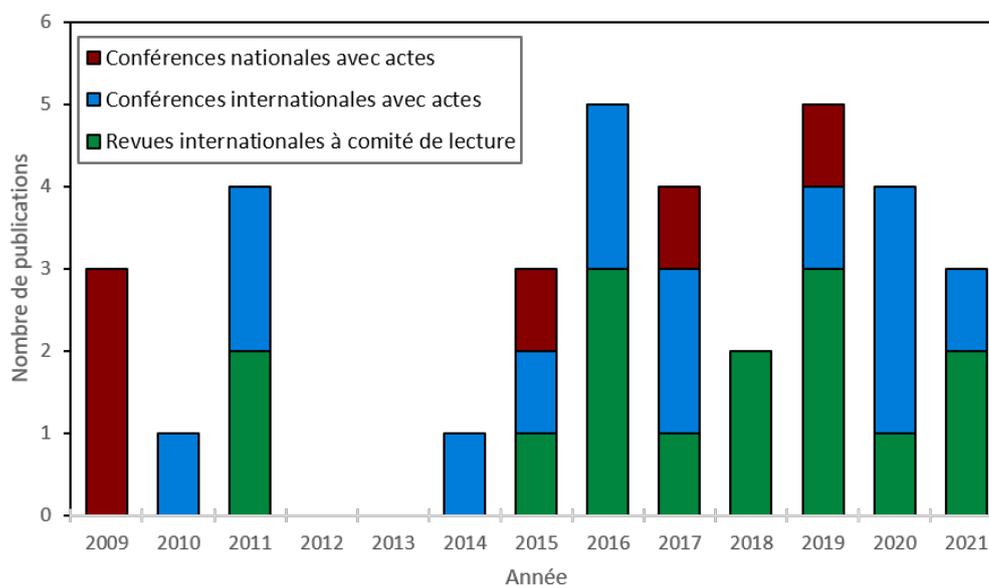


FIGURE 1.3 – Représentation du nombre de publications par catégorie et par année de parution depuis 2009 (les articles soumis ne figurent pas sur ce graphique).

1.2.4 Conférences sans actes

- C-12. J. Fortes Da Cruz, M. Quillien, I. Lemaire Caron, T. Da Silva Botelho, **O. Klinkova**. Caractérisation par micro-scratch de cas atypiques. Anton Paar Workshop Caractérisation Mécanique des Surfaces, Les Ulis, 21 Mai 2019.
- C-11. J-Ph. Crete, **O. Klinkova**, T. Da Silva Botelho. Revue des méthodes de simulation du comportement d'assemblages collés. SF2M, Assemblages mécaniques - évolutions récentes et perspectives, Saint-Ouen, 2019.

- C-10. G. Zambelis, T. Da Silva Botelho, **O. Klinkova**, I. Tawfiq and C. Lanouette. Nouvelle approche expérimentale pour calculer les propriétés en fatigue d'un assemblage composite/métal collé. SF2M, 36èmes Journées de Printemps, Paris, 30-31 Mai 2017.
- C-9. G. Zambelis, T. Da Silva Botelho, **O. Klinkova**, I. Tawfiq, C. Lanouette. Adhesive joints from aerospace perspective : Best practices for adhesive joining techniques. Global Automotive Lightweight Manufacturing Summit, Birmingham, Angleterre, 2017.
- C-8. **O. Klinkova**, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Caractérisation des contraintes résiduelles de cuisson dans les structures composites : mesures et prédiction de variations angulaires. Poster, Journée scientifique d'école doctorale de Saint-Étienne, 2010.
- C-7. **O. Klinkova**, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Modélisation/Simulation des contraintes résiduelles et de la déformée résiduelle et effet de l'usinage sur leur redistribution, 19ème Conférence Technique du Chapitre Français du SAMPE, 18-19 Novembre 2010.
- C-6. **O. Klinkova**, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Modélisation/Simulation des contraintes résiduelles et de la déformée résiduelle et effet de l'usinage sur leur redistribution, SAMPE Europe, Paris, 9-15 Avril 2010.
- C-5. **O. Klinkova**, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Simulation of residual stresses in hextool composite mold : cured-induced distortions and machining. 8th European Conference on Residual Stresses, ECRS8, Riva del Garda, Italy, 2010.
- C-4. **O. Klinkova**, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Simulation of residual stresses in composite structures : cured-induced distortions and machining, AMPT 2010, Poster, Paris, 25-27 October 2010.
- C-3. **O. Klinkova**, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Simulation des contraintes résiduelles dans les structures composites : déformée après cuisson, SAMPE France, Poitiers, 10 Mars 2010.
- C-2. **O. Klinkova**, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Simulation des contraintes résiduelles dans les structures composites : déformée après cuisson, PPF, Saint-Galmier, 5-6 Mars 2010.
- C-1. **O. Klinkova**, S. Drapier, J.-M. Bergheau. Simulation des contraintes résiduelles dans les structures composites : déformée après cuisson, PPF, Saint-Galmier, 5-6 Mars 2009.

1.2.5 Brevet

- B1. R. Kessentini, **O. Klinkova**, I. Tawfiq, M. Haddar. Techniques de préparation structurale des bandes de convoyeurs. Institut national de la normalisation et de la propriété industrielle sous le N°TN2020/0075, 18 mai 2020.

1.2.6 Articles en cours d'évaluation

L'article suivant est soumis et est en cours d'évaluation, c'est la raison pour laquelle ce travail a été séparé des articles précédemment listés.

- 1. Y. Cheng, **O. Klinkova**, L. Corté, L. Laiarinandrasana, L. Helfen, H. Proudhon, T. Baumbach, T. F. Morgeneyer. Transition between polar and equatorial spherulitic damage in polypropylene as a function of stress states : in-situ 3D measurements. Soumis Journal of Polymer Science Part B : Polymer Physics, 2021

1.3 Encadrements scientifiques

1.3.1 Thèses doctorales

J'ai co-encadré 5 thèses dont 3 sont soutenues.

2014-2017 : Georges ZAMBELIS, *Étude de la tolérance au dommage du collage composite-métal pour structures aéronautiques* [158], **soutenu** le 28/11/2017, ED287 (École Centrale Paris), devant le jury composé de : M. Frédéric Jacquemin (Président), M. Jacques Renard (Rapporteur), M. Mohamed Ichchou (Rapporteur), M. Ziad Moumni, M. Philippe Vidal, M. Imad Tawfiq, M. Tony da Silva Botelho et Mme Olga Klinkova. Financement CIFRE Airbus Helicopters, sous la Direction du Pr. Imad TAWFIQ. Mon taux d'encadrement est de 35%. Il a été recruté chez Airbus Helicopters. Travaux décrits dans le paragraphe 2.8 (page 59).

2014-2018 : Rawdha KESSENTINI, *Contribution à l'étude du comportement des bandes de convoyeurs soumises à des sollicitations opérationnelles* [76], **soutenu** le 06/07/2018, ED287 (Ecole Centrale Paris), devant le jury composé de : M. Ziad Moumni (Président), M. Salah Mezlini (Rapporteur), M. Mohamed Ichchou (Rapporteur), M. Riadh Elleuch, Mme Olga Klinkova, M. Anas Bouguecha, M. Imad Tawfiq et M. Mohamed Haddar. C'est une thèse en cotutelle avec l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS), LA2MP, sous la Direction du Pr. Imad TAWFIQ. Mon taux d'encadrement est de 50%. Elle est enseignante technologue chez ISET KASSERIN Gouvernorat de Sfax, Tunisia. Travaux décrits dans le paragraphe 2.6 (page 52).

2016-2020 : Amal BECHIKH, *Traitement de surface et caractérisation de l'adhérence dans les assemblages métal-biocomposite* [19], **soutenu** le 2/07/2020, Université Cergy Pontoise, devant le jury composé de : M. Philippe Vidal (Président), M. Mohamed Haboussi (Rapporteur), M. Bassem Zouari (Rapporteur), M. Georges Zambelis, M. Imad Tawfiq, M. Yamen Maalej, Mme Olga Klinkova et M. Rachid Nasri. C'est une thèse en cotutelle avec École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT), LR-MAI, sous la Direction du Pr. Imad TAWFIQ. Mon taux d'encadrement est de 50%. Elle est enseignante en Physique, au Département Santé Énergie Environnement, ESIEE Paris-Université Gustave Eiffel. Travaux décrits dans le paragraphe 2.5 (page 43).

Deux thèses sont en cours actuellement.

2018-2021 : Oumayma HAMLAOUI, *Étude de l'endommagement d'un composite FV/PBT application à une opération de rivetage par compression*, soutenance prévue en 2021, Université Cergy Pontoise, ED-SI, thèse en cotutelle avec l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS), dans le cadre de MOBIDOC, Projet Européen EMORI, sous la Direction du Pr. Imad TAWFIQ. Mon taux d'encadrement est de 50%.

2019-2022 : Ichrak BEN AMOR, *Régénération des composites d'un polyamide chargé de*

fibres de verre courtes, soutenance prévue en 2022, Université Cergy Pontoise, ED-SI, CIFRE Bulgin, en cotutelle avec l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS), sous la Direction du Pr. Imad TAWFIQ. Mon taux d'encadrement est de 50%.

Le tableau 1.4 résume mes activités d'encadrement doctoral.

Doctorants	Sujet de thèse	Taux	Production
Georges ZAMBELLIS <i>soutenue</i> <i>2017</i>	Étude de la tolérance au dommage du collage composite-métal pour structures aéronautiques	35%	A-11, A-8 CI-15, CN-4 C-10, C-9
Rawdha KESSENTINI <i>soutenue</i> <i>2018</i>	Contribution à l'étude du comportement dynamique des bandes des convoyeurs soumises à des sollicitations opérationnelles	50%	A-15, A-12, A-10, A-9 CI-9, CI-8, CI-7 CI-6, CN-5, B-1
Amal BECHIKH <i>soutenue</i> <i>2020</i>	Traitement de surface et caractérisation de l'adhérence dans les assemblages métal-biocomposite	50%	A14, A13 CI-11
Oumayma HAMLAOUI <i>soutenance prévue</i> <i>en 2021</i>	Étude de l'endommagement d'un composite FV/PBT application à une opération de rivetage par compression	50%	CI-14, CI-12 CI-10
Ichrak BEN AMOR <i>soutenance prévue</i> <i>en 2022</i>	Régénération des composites d'un polyamide chargé de fibres de verre courtes	50%	CI-13

TABLE 1.4 – Activités d'encadrements doctoraux

1.3.2 Masters recherche

De plus, j'ai eu la possibilité d'encadrer des stages de fin d'études, des travaux de Master 2 ou de "Master Thesis" d'étudiants étrangers accueillis au laboratoire Quartz, dans le service Tribologie-Matériaux, ou pendant mes dernières années de thèse au LTDS, chacun pour une durée de 6 mois :

- **Matteo POLUZZI**, étudiant (ERASMUS) d'Université de Ferrara, Italie, *Fretting of Hex-tool : damage and wear study of carbon/BMI composite*, 2021.
- **Andrea BADAMI**, étudiant (ERASMUS) d'Université de Ferrara, Italie, *Modelling of the adhesion of bio sourced composites as a function of surface parameters of the bonded interface*, 2021.
- **Mhad KHICHANE**, étudiant en Master en Physique et Science des Matériaux, Université Paris 13 Institut Galilée, *Etude d'une colle structurale utilisée dans l'aéronautique pour des assemblages collés Métal/composite*, 2016.
- **Hassèn CHAUCHE**, étudiant en Master en Physique et Science des Matériaux, Université Paris 13 Institut Galilée, *Etude du comportement tribologique d'un composite*, 2016.
- **Salvatore DI LAURO**, étudiant en Master à Seconda Università degli Studi di Napoli (Italie), *Conception of a device to combine 4-point dynamic bending tests and fretting wear*, 2014.

- **Romain FAYARD**, étudiant en Master au Centre Science des Matériaux et des Structures (SMS), École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, *Caractérisation des mécanismes d'enlèvement de matière d'un matériau composite (HexTOOL)*, 2009.
- **Florian BREMOND**, étudiant en Master au Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), ENI de Saint-Etienne, *Étude numérique et expérimentale de l'élaboration et de l'usinage de matériaux composites*, 2009.

1.4 Participation à des projets nationaux et internationaux

J'ai participé à plusieurs projets avec des industriels français impliquant la participation des étudiants de Supméca, en assurant le tutorat de stages, ainsi que la conceptions des banc d'essais. A titre d'exemple, je citerai les quatre projets qui se sont déroulés dans le cadre de projet PLACIS (PLAte-forme Collaborative d'Ingénierie Systèmes). Le projet PLACIS porté par Supméca a été sélectionné dans le cadre des IDEFI (Initiatives D'Excellence en Formation Innovante). La dotation attribuée par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche était de 4,3 Millions d'Euros. Les partenaires du projet PLACIS : EISTI, ENSEA, Dassault Systèmes, Politechnico de Turin et Politechnico de Milan. Participer à un projet PLACIS revient à faire un travail collaboratif entre un groupe de trois étudiants de Supméca (100 heures par personnes) avec un groupe d'étudiant étranger et avec une entreprise porteuse "d'un sujet d'étude innovant".

1. Projet avec HUTCHINSON (2013-2017)

L'objectif de ce travail collaboratif entre Hutchinson et Supméca était de simuler le choc d'un oiseau sur une structure sandwich représentative de celle du bouclier anti-oiseaux et des proposer des nouvelles solutions en comparant avec des essais quasi-statiques. Nous avons développé un banc d'essai expérimental permettant de reproduire en quasi-statique le choc d'un oiseau. La modélisation numérique du contact lors de la collision avion/oiseau a été mise en place en prenant en compte le comportement complexe des matériaux collés puis testés, tels que l'aluminium, l'acier, le composite tissé (carbone/époxy, verre/époxy) et la mousse. Le poinçon représentait l'oiseau et la structure collée - le bouclier.

2. Projet avec OSVehicle (2014)

Le projet avec OSV était un projet sur la conception et simulation de châssis - TABBY, pour un véhicule électrique. L'objectif était de mettre en place un modèle numérique en respectant le cahier des charges et en simulation la tenue mécanique suite à un choc brutal de type "crash test". Ce projet a permis de développer une analyse structurelle par la méthode des éléments finis (FEM) du châssis du TABBY, pour identifier les points géométriques les plus fragiles, évaluer l'effet des modifications matérielles et structurelles sur le niveau des contraintes et proposer des améliorations.

3. Projet avec JCDecaux (2015-2017)

JCDecaux a souhaité se doter d'un outil permettant d'évaluer les sollicitations mécaniques mises en oeuvre lors du vandalisme de vélos en libre-service Vélib afin de proposer des solutions plus difficiles à vandaliser. Nous avons identifié le type de sollicitations et les pièces à étudier et le type d'endommagement ciblés. La nature des efforts et leur ordre de grandeur ont été évalués à partir d'essais et de simulations numériques. Nous avons instrumenté des pièces saines pour valider expérimentalement les sollicitations identifiées (direction, intensité, fréquence), amélioré la simulation numérique pour la rendre plus conforme aux essais (travail sur les conditions aux limites en particulier) et conçu et dimensionné une solution répondant au cahier.

4. Projet SAFRAN AIRCRAFT ENGINES (2017)

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire Quartz et SAFRAN AIRCRAFT ENGINES, afin de mieux comprendre la sensibilité aux anomalies dans les structures composites et d'établir des règles de qualification de pièces aéronautiques. Dans les structures composites des anomalies de différentes formes et dimensions peuvent être présentes de par le procédé de fabrication. Pour mieux comprendre leur criticité sur la tenue de structures soumises à des sollicitations telle que la compression, une étude numérique et expérimentale est nécessaire. L'objectif de ce projet était de déterminer les mécanismes de dégradation en compétition, de déterminer le mécanisme prépondérant pour une situation donnée et étudier l'influence de paramètres pour chacun des mécanismes en mettant en place des modèles sous Abaqus.

1.5 Collaboration internationales

Mes collaborations internationales se sont principalement illustrées par des participations à des projets communs et des publications communes.

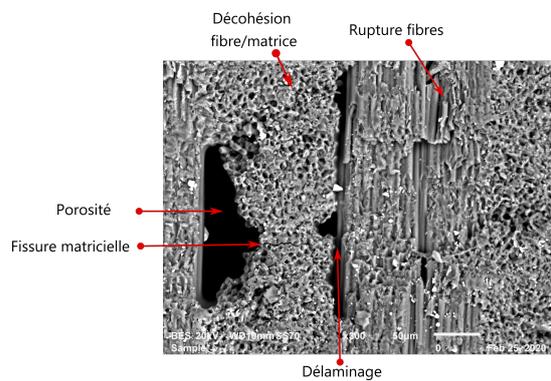
- **ENIS Sfax** (Tunisie) : [77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85]
- **ENIT Tunis** (Tunisie) : [12, 20, 22, 21, 62, 63]
- **UNIFE** (Italie) : Collaboration scientifique avec Dr. Refaella Rizzoni de **l'Università degli Studi di Ferrara, Italie**, nous avons un projet de recherche en commun sur la modélisation des surfaces imparfaites des assemblages collés. Ce projet a débuté en mars 2020. Le projet se déroule en deux étapes. Le premier est le co-encadrement d'un Master dans le cadre d'ERASMUS, dont le projet porte sur "Modelling of the adhesion of bio sourced composites as a function of surface parameters of the bonded interface". Puis, la deuxième étape du projet est une thèse en co-tutelle en 2021.
- **UAM** (Colombie) : Collaboration scientifique avec Dr. Eduardo Trujillo de **Universidad Autónoma de Manizales, Colombia**, nous avons un projet initié en septembre 2020 sur la caractérisation et la modélisation d'endommagement des composites bio-sourcés (fibres de bambou/polymère) et leur tolérance aux dommages.

1.6 Expertises scientifiques

1. "Étude de la propagation de défaut en mode II sur éprouvette composite Carbone/PEEK" pour le compte d'AIRBUS HELICOPTERS, 2018. L'objectif de ce travail était de démontrer la validité du montage expérimental et de la méthodologie d'essais pour l'étude de la propagation de défauts dans des éprouvettes en matériau composite carbone/PEEK. Cette étude a également montré la faisabilité de la construction de la courbe de Paris pour cette application.
2. "Essai de fragilisation d'un acier par l'hydrogène selon les normes ASTM F519 et AMS QQC 320" pour le compte de la société de TRAITEMENTS DE SURFACE ET MÉCANIQUE, 2015. L'objectif de ce travail était de caractériser la tenue de 200h en fluage sous charge $R = 0,75R_m$ (2000Mpa) des éprouvettes en acier avec un traitement spécifique.
3. "Torsion rupture testing mechanical behaviour and rupture torque" pour le compte de THALES, 2015. L'objectif de ce travail était de réaliser les essais de torsion des éprouvettes entaillées, de déterminer le comportement et de caractériser la surfaces de ruptures.
4. "Torsion rupture testing hardness measurement" pour le compte de THALES, 2015. L'objectif de ce travail était de réaliser les essais de dureté des éprouvettes métalliques fournies.
5. Rapporteur d'articles pour *Polymers* (2), *Sustainability* (1)

Chapitre 2

Synthèse des activités de recherche



Résumé

Cette partie de mes travaux de recherche réalisés depuis le début de ma thèse en 2012 et jusqu'à ce jour. Les matériaux auxquels je m'intéresse sont d'origine synthétique (carbone, verre, nylon, polymères) ou naturel (composites à fibre de lin, de bambou). L'essentiel de mon travail s'est concentré sur la compréhension des mécanismes d'endommagement de matériaux et structure sous charge, ainsi que la caractérisation du comportement mécanique macroscopique par le développement de dispositifs expérimentaux spécifiques.

2.1 Identification d'endommagement et vieillissement de matériaux composites

Aujourd'hui, les polymères et les composites à matrices polymériques sont de plus en plus utilisés pour remplacer les structures métalliques, permettant un gain de masse important qui, couplé aux préoccupations actuelles en termes d'économie d'énergie, suggère un intérêt grandissant pour la substitution de structures métalliques industrielles. Toutefois, ces structures en polymères devant répondre aux mêmes contraintes que les structures métalliques, une analyse approfondie de leur comportement s'avère nécessaire, notamment pour s'assurer de leur tenue dans le temps. Les débouchés industriels de tels matériaux sont donc étroitement liés à une meilleure connaissance de leur durabilité, passant par un suivi de mécanismes d'endommagement (représentés par des cavités) préalable à la rupture finale.

Les matériaux composites sont les matériaux multi-échelles (Figure 2.1). La caractérisation et la modélisation du matériau peut donc se faire à ces différentes échelles ou bien en établissant un lien direct par homogénéisation entre celles-ci [18, 108]. En effet, il n'existe pas de mécanisme unique mais plusieurs types d'endommagements différents par leur nature et leur mode de développement. À l'échelle microscopique : des ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice (décohésion fibres/matrice) ou des porosités. À l'échelle mésoscopique, ou échelle du pli, on observe des fissures intra laminaires transverses (perpendiculaires à la direction de sollicitation) ou longitudinales (dans la direction de l'application de l'effort) et des ruptures de fibres au stade extrême de la ruine du matériau, À l'échelle macroscopique, on observe le phénomène de délaminage qui correspond à une séparation locale entre deux couches liée à une concentration importante des contraintes en cisaillement s'amorçant généralement aux bords libres de la structure.

Mots clés : Composite, usinage, EF, cuisson, distorsions, contraintes résiduelles
 Financement et cadre : Thèse de Doctorat (2008-2012 - LCM-SMART)
 Encadrements : Prof J.-M. Bergheau (LTDS/ENISE), Prof S. Drapier (SMS/EMSE)
 Valorisation : [89, 90, 91, 92, 93, 94, 95]

Pendant ma thèse [88], j'ai traité la problématique de mise en forme du matériau composite et sa finition par usinage (à l'échelle macroscopique). Mes travaux de recherche, durant ma thèse, s'inscrivait dans le cadre du projet LCM-smart visant à améliorer la mise en oeuvre des

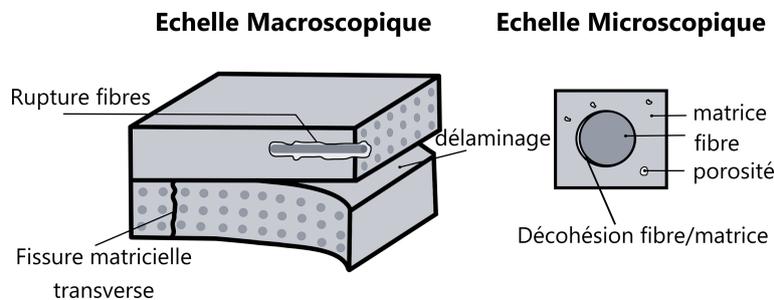


FIGURE 2.1 – Endommagements du composite à matrice polymère à l'échelle macro et (micro)scopique.

procédés de fabrication, notamment de pièces aéronautiques, en matériau composite, à matrice polymère. Ce projet été initié et financé par la société HEXCEL Reinforcements du groupe HEXCEL, leader des matériaux composites avancés pour l'aéronautique. Le projet comprenait 13 partenaires comprenant : 5 sociétés industrielles : HEXCEL Reinforcements, HEXCEL Composites, SKF Aerospace France, Isoire Aviation, ESI Group ; 2 PME de moins de 15 personnes : ISOJET Equipement et VISUOL Technologies ; 6 équipes de recherche publique rassemblées en 4 unités CNRS : LaMI (FR TIMS/CNRS 2856), LTDS (UMR CNRS 5513, regroupant 3 équipes : LTDS/ECL, LTDS/ENISE et LTDS/SMS), Laboratoire H. Curien (UMR CNRS 5516) et GeM (UMR CNRS 6183). La modélisation et la simulation numérique des phases de réalisation des moules à base de matériaux composites fait appel à la résolution de problèmes thermo-mécaniques, et également à une représentation thermo-physico-chimique de la réaction de réticulation de la résine. Je me suis intéressée dans un premier temps à la modélisation des contraintes résiduelles et des distorsions thermo-mécaniques dans les moules composites [89, 90, 91, 92, 93, 94]. Ces distorsions sont induites par le cycle thermique prescrit pour la cuisson de la résine, couplé au phénomène physico-chimique exothermique de réticulation de la résine, qui se traduit par des changements de volume, elles sont illustrées sur la Fig. 2.2. J'ai utilisé les outils numériques existants, implémentés dans le logiciel Sysply du groupe ESI, basés sur les formulations par éléments finis des modèles thermochimiques et mécaniques faiblement couplés [87]. La prédiction numérique des contraintes internes m'a permis d'améliorer la connaissance du procédé de fabrication et d'évaluer les effets des paramètres opératoires comme la distorsion résiduelle par exemple. La Fig. 2.3 représente le contour de la pièce déformée à l'instant final, après le démoulage, l'angle de distorsion est de l'ordre de $1,2^\circ$ en moyenne pour le matériau composite carbone/époxy. Je me suis donc engagée dans des activités dans les domaines scientifiques suivants : composites, procédés, modélisation de phénomènes couplés, simulation numérique par les éléments finis. J'ai rassemblé l'ensemble des compétences nécessaires aux développements de simulations numériques et d'approches expérimentales pertinentes et à la capitalisation des connaissances. Pour mettre en place la simulation de la cuisson j'ai réalisé une caractérisation du matériau composite mis en forme de L en autoclave par différentes méthodes comme l'observation par Microscope Électronique à Balayage (MEB), microscope optique, les mesures dimensionnelles (Machine à mesure 3D et Scanner Laser), de masse volumique, la diffraction des rayons X et les mesures de calorimétrie différentielle à balayage (DSC) afin de calibrer le comportement physico-chimique de la résine.

Puis, je me suis intéressée à la modélisation de l'usinage des matériaux composites. En fait, l'hétérogénéité et l'anisotropie des matériaux composites rendent leur usinage complexe et fondamentalement différent de l'usinage des métaux. Pendant la coupe de ces matériaux, de nombreux problèmes comme le délaminage, l'endommagement mécanique ou thermique peuvent survenir. De plus, du fait de la présence de contraintes résiduelles créées lors du cycle de cuisson, la tâche préalable consiste à prédire la redistribution de ces contraintes et des distorsions après un enlèvement de matière. J'ai mis en place un modèle numérique de l'usinage, sur l'exemple du fraisage, du matériau composite à base de Hextool (paquets de fibres courtes de carbone pré-imprégnées dans la résine BMI M61 de dimensions $8 \times 50mm^2$ orientées de façon quasi isotrope dans le plan), illustré sur la Fig. 2.4. L'usinage est modélisé comme un problème thermo-mécanique. L'originalité de ce modèle numérique provient du fait que la séparation de la matière autour du rayon d'arête n'est pas simulée. Les mécanismes associés à l'usinage sont convertis en chargements thermo-mécaniques équivalents qui sont ensuite appliqués à la surface de la pièce usinée. Ces derniers se déplacent par rapport à la matière de la pièce avec une vitesse égale à la vitesse de coupe. Les difficultés se recentrent donc sur le choix et la

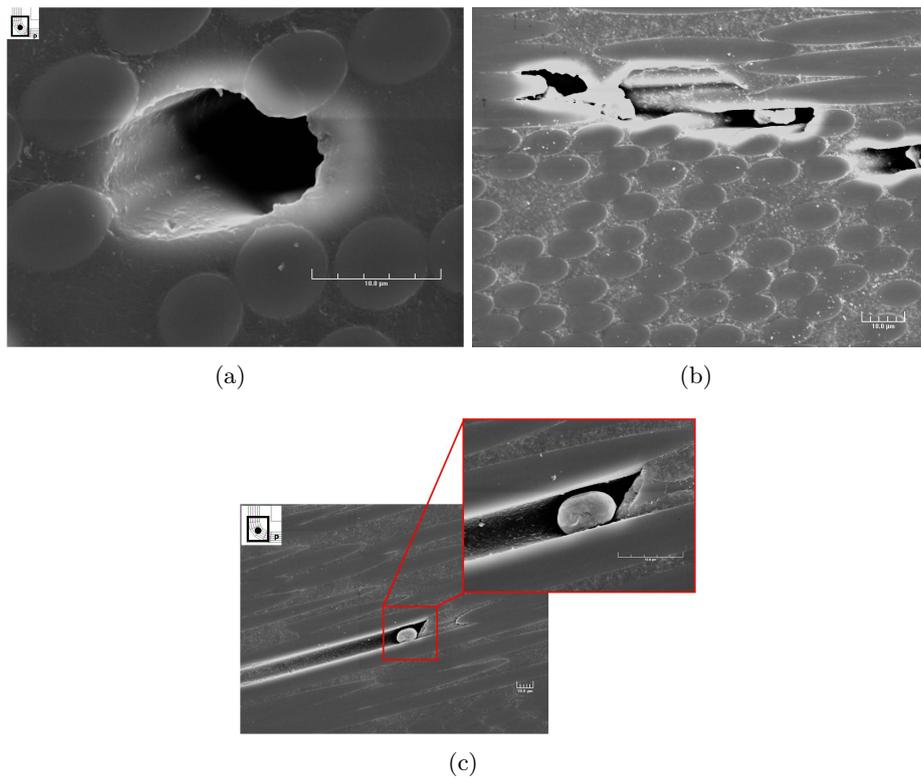


FIGURE 2.2 – Endommagements dans le carbone/époxy, observés par Microscope Électronique à Balayage Jeol JSM 6400, associé au logiciel Spirit.

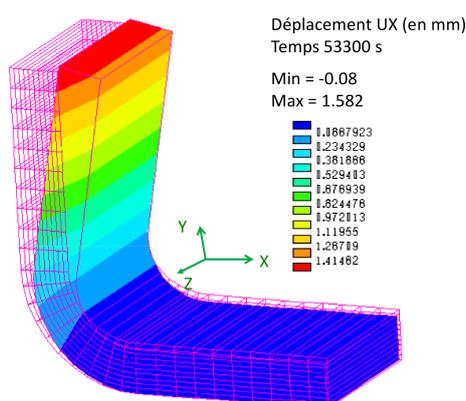


FIGURE 2.3 – Amplitude de la déformée de la pièce après le démoulage, superposée au maillage initial [88].

quantification des sollicitations à appliquer sur la surface usinée de la pièce. J'ai utilisé une approche expérimentale ainsi qu'analytique afin de déterminer les paramètres qui interviennent dans le modèle numérique. J'ai mis en place un dispositif expérimental capable de reproduire les conditions tribologiques survenant lors de l'usinage de ce type de matériau (Fig. 2.5), cette étude a été l'occasion de développer un modèle de frottement dédié à l'usinage à sec [95], du matériau composite, par un outil en carbure revêtu de nitrure de titane. J'ai réalisé également une analyse thermographique du procédé d'usinage par caméra infrarouge. Elle m'a permis de vérifier la température surfacique prédite lors de la simulation du fraisage avec le modèle numérique hybride de l'usinage. Je me suis intéressée aussi aux grandeurs thermiques mises en jeu pendant une opération d'usinage [35, 95], afin d'estimer si ce procédé peut endommager le matériau composite ou au contraire si les effets thermiques engendrés sont négligeables.

En service, les composites sont souvent soumis à plusieurs contraintes opérationnelles qui sont en générale d'origine mécanique et environnementale. L'endommagement d'un matériau est un processus irréversible qui se traduit par l'apparition de défauts locaux. Sous chargement mécanique, l'apparition de l'endommagement se traduit par une perte de la rigidité initiale du matériau. La mécanique continue de l'endommagement considère les effets de ces dégradations au niveau macroscopique. Cette théorie repose sur une vision diffuse de l'endommagement au sein du matériau, contrairement à la mécanique de la rupture qui s'intéresse à un défaut discret défini par une géométrie bien déterminée. Elle s'inscrit dans le cadre de la Mécanique des Milieux Continus. Les fondements de cette théorie ont été introduits par Kachanov [74] et Rabotnov [121] pour les matériaux métalliques. Depuis, de nombreux travaux ont été menés sur une variété de matériaux métalliques ou composites [96, 99].

La thématique de ma recherche actuelle s'articule donc autour de la **durabilité** et de l'endommagement des composites [61], qui sont liés aux **endommagements** initiaux présents déjà dans le matériau, dus à leur nature hétérogène et/ou leur mise en oeuvre, et aux **propagations de ces endommagements** en service [19, 76, 158].

Mes activités de recherche, se situent entre la mécanique de la rupture et de l'endommagement des matériaux organiques, tels que, les polymères seuls (section 2.2, l'échelle nano et microscopique), les composites à matrice organique et les assemblages collés (l'échelle meso et

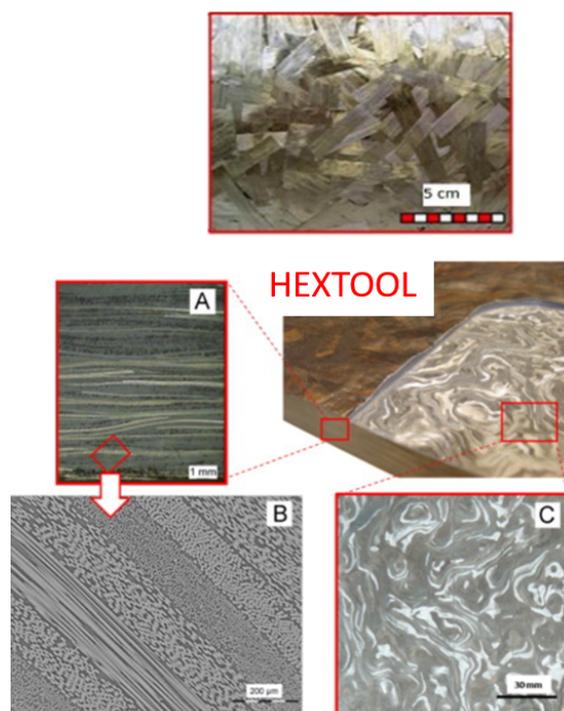


FIGURE 2.4 – HexTOOL partiellement usinée (A) vue de sa structure à une échelle mésoscopique ; (B) à une échelle microscopique ; (C) vue extérieure d’une surface usinée à une échelle macroscopique [95].

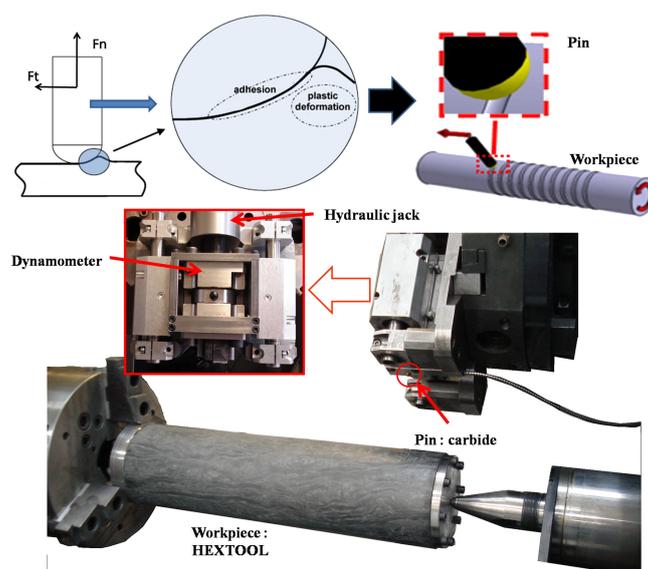


FIGURE 2.5 – Description du tribomètre [95].

macroscopique).

Dans la suite de ce manuscrit, je présente d'abord mes activités de recherche commencées lors de mon post-doc à l'école des Mines de Paris dans la section 2.2. Il s'agit de l'étude de l'endommagement des polymères à l'aide des observations tomographiques, laminographique et holotomographique à l'échelle micro et nanométrique. Les travaux de recherche ont été valorisés par les articles [40, 101, 102, 130].

Dès ton arrivée à Supmeca en 2013, j'ai co-encadré 5 thèses dont 3 sont soutenues. Je présente ma recherche au laboratoire Quartz, à travers des ces thèses. Elle s'articule autour de l'endommagement à l'échelle meso et macroscopique. Je fais un bref rappel sur les endommagements des structures composites dans la section 2.3. Les travaux de thèse d'Oumeyma Halaoui [61] s'inscrivent dans cette thématique.

Puis, j'introduis ma recherche liée aux assemblages collés. Il s'agit de la caractérisation de la durabilité et de la tenue des structures assemblées par le collage couplées aux modèles analytiques et numériques. Je présenterai ces travaux à travers des trois thèses soutenues, celles de Georges Zambelis [158], Rawdha Kessenini [76] et Amal Bechikh [19], qui sont valorisées par des articles [21, 22, 82, 83, 84, 161, 162]. Tout d'abord je présente le contexte de ces travaux dans la section 2.4, puis un rappel succinct, des phénomènes physiques au niveau des interfaces et les modes de rupture, nécessaires à la compréhension des travaux décrits dans la suite du manuscrit. Pour chaque partie développée, je dresse un rapide état de l'art pour mieux comprendre le contexte et la méthodologie déployée. Dans la section 2.5, je présente la méthodologie de la caractérisation de la surface de l'adhérence et de la mouillabilité. Puis, je dresse une synthèse des modèles couplés issus de la bibliographie, en présentant notre contribution à la modélisation à l'échelle mesoscopique dans la section 2.6. Une section 2.7 liée au vieillissement montre la méthodologie d'identification des paramètres de diffusion d'eau impliqués dans les modèles. La tolérance aux dommages est abordée dans la section 2.8. Je fais un bilan des essais de caractérisation, je décris les différentes éprouvettes représentatives utilisées pour les assemblages collés en fonction du type de la sollicitation.

Le dernier axe de la recherche s'articule autour des recyclage et re-valorisation de composites, décrits dans la section 2.9. Les travaux de thèse d'Ichhak Ben Amor [23] débutés en 2019 portent sur le recyclage des composites à base d'un polyamide chargé avec des fibres de verre.

2.2 Endommagement à l'échelle microscopique

Mots clés : Polymères semi-cristallins, tomographie X, endommagement, durabilité
Financement et cadre : Post doc (2012-2013 - ARMINE)
Encadrements : Prof L. Laiarinandrasana (CdM/ParisTech)
Valorisation : [38, 39, 40, 101, 102, 130]

Pendant mon post doc, dans l'équipe Mécanique et Matériaux du Centre des Matériaux (CdM) de l'Ecole des Mines (ParisTech), j'ai travaillé dans l'équipe de Pr Lucien Laiarinandrasana sur les problématiques de la durabilité des matériaux polymères semi-cristallins et les mécanismes d'endommagement (représentés par des cavités) préalables à la rupture finale. J'ai investigué la cinétique de cet endommagement depuis la germination des cavités jusqu'à

la formation de craquelures si particulières aux polymères [101, 102]. La compréhension des mécanismes physiques d'endommagement des polymères était ensuite utilisée dans le but de les modéliser. Il s'agit de caractériser l'endommagement micro(nano) scopique observé à partir d'observations 3D en tomographie X à haute résolution obtenues sur des essais aussi bien ex-situ qu'in-situ [39, 40, 101, 130]. J'ai analysé les données sur les cavités en terme d'histogramme, de fraction volumique et de dispersion spatiale, tandis que pour chaque cavité, j'ai mesuré le diamètre et la hauteur moyenne, le facteur de forme et l'orientation.

Différentes techniques ont été déployées pour ces travaux de recherche : la tomographie, la holotomographie et la laminographie. L'acquisition des données implique l'enregistrement d'un grand nombre de vues de l'échantillon, sous des angles différents. La reconstruction tomographique est ensuite appliquée afin d'obtenir les images 3D. La tomographie est une technique bien établie, essentiellement dans sa forme macroscopique (le scanner médical) et, dans une moindre mesure, à l'échelle microscopique (microtomographie). Les radiographies de phase sont obtenues pour les distances échantillon-détecteur D relativement petites. Quant à l'holotomographie, l'enregistrement de plusieurs images se fait à des distances D différentes. L'objet peut être décomposé en intégrale de Fourier en fonction des fréquences spatiales. Une fois la reconstruction holographique effectuée, on est ramené à une situation similaire à celle de tomographie d'absorption. On peut alors procéder à la reconstruction tomographique de la phase, pour obtenir la répartition spatiale (tridimensionnelle), dans l'échantillon, de l'indice de réfraction, donc de la densité électronique à partir de reconstructions holographiques correspondant à des angles de vue différents [41]. Enfin, la laminographie, est une technique qui permet d'observer les échantillons de type lamina, de plaques peu épaisses de l'ordre de quelques mm d'épaisseur. Pour la laminographie, l'axe de rotation de l'échantillon est incliné à un angle de $\theta \leq 90^\circ$ par rapport à la direction du faisceau. Les éprouvettes sont généralement inclinées autour du plan normal de plaque [110].

Dans l'article Laiarinandrasana *et al.* [101], le PolyAmide 6 (PA6) a fait objet de l'investigation. C'est un polymère semi-cristallin largement utilisé dans de très nombreuses applications en raison de ses très bonnes performances/coût. De nombreuses pièces sont faites avec ces polyamides dans le transport, l'électronique et l'électrique, les biens de consommation, du bâtiment, de la construction et de l'emballage. J'ai d'abord réalisé les essais de traction arrêtés pour les échantillons cylindriques de diamètre 10 mm avec un rayon de l'entaille de 4 mm, illustrés sur la Fig. 2.6, puis ces éprouvettes ont été utilisées pour les observations tomographiques. Les essais ont été arrêtés en trois points caractéristiques afin d'observer l'évolution de la micro-structure. L'échantillon A est arrêté juste avant la striction, dès qu'on attend la $\frac{F}{S_0}_{max}$, l'aspect physique n'est pas encore changé, la déformation résiduelle est de l'ordre de 0,6 mm. Pour les échantillons B et C, nous avons arrêtés les essais après la striction à 1,2 mm et 2,4 mm de déformations résiduelles respectivement.

L'observation tomographique à ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) nous a permis d'obtenir les images illustrées sur la Fig. 2.7. Le volume scanné est de 1 mm³ environ avec la taille de voxel de 0,7 μ m. Nous avons obtenu ainsi les images en niveaux de gris. L'endommagement (cavité ou vide) se présente alors comme des zones noires (minima locaux). L'initiation du dommage a été identifiée dans le centre polaire des sphérolites. Nous avons analysé ensuite les sphérolites se trouvant au centre de l'entaille en terme de hauteur (Fig. 2.8). Le mécanisme d'endommagement est ensuite décrit en se basant sur ces observations.

Le volume observé a permis de mettre en évidence le gradient de déformation à l'échelle

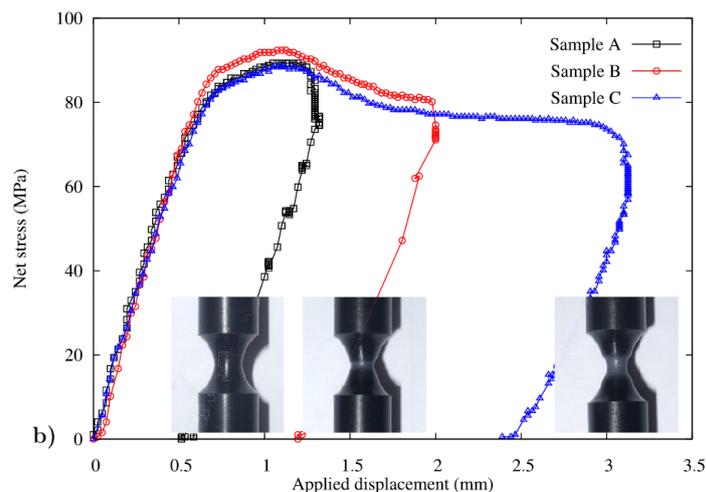


FIGURE 2.6 – Courbes de traction arrêtée pour échantillons en PA6 [101].

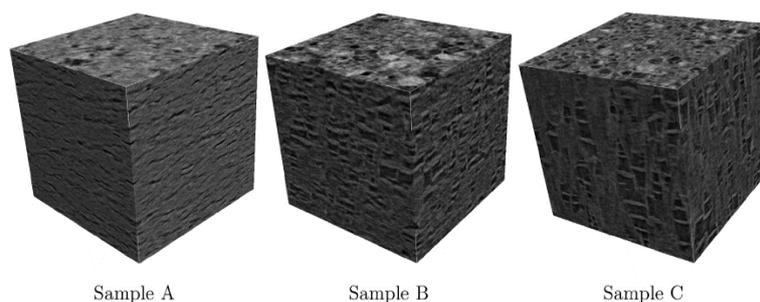


FIGURE 2.7 – Morphologies d'endommagements en fonction des différentes déformations. Taille de carré : $140 \mu m^3$ [101].

microscopique. Il a été évalué à environ 100 de sphérolites. Les données statistiques fournies ont été utilisées pour tracer la distribution spatiale du taux d'endommagement et hauteur/diamètre du vide à chaque étape de déformation. Ces travaux ont confirmé l'évolution de l'indice d'anisotropie survenant lors de la déformation. Le facteur de forme du vide a été introduit comme étant une mesure locale d'anisotropie. Pour chaque étape de déformation, l'évolution spatiale de ce facteur de forme a été tracé avec le maximum au centre de la section.

Dans l'article Selle *et al.* [130], nous avons fait un travail similaire. En revanche les essais de traction de PA6 ont été interrompus avant que la contrainte maximale soit atteinte (cf. Fig. 2.9). Les échantillons chargés à 50%, 75% et 100% de la charge maximale, pendant l'essai de traction interrompu, ont été analysés. La caractérisation volumique quantitative de l'endommagement tridimensionnel a été effectuée par holotomographie X in-situ (50 nm), technique disponible à l'ESRF de Grenoble. Cette résolution a permis d'observer et décrire l'initiation d'endommagement et le mécanisme d'endommagement présents même avant la striction.

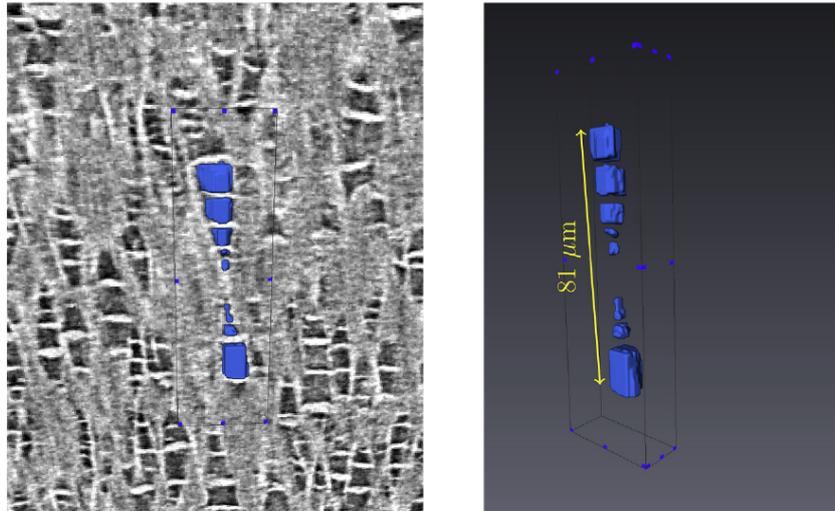


FIGURE 2.8 – Image d’endommagements de la zone centrale entaillée de l’échantillon C [101].

Les trois populations particulières du vide, caractéristiques du mécanisme de la croissance des vides, ont été observées dans le scan A et sont représentées sur une vue tomographique longitudinale (plan rz) présentées dans la Fig. 2.10. Les vides nanométriques organisés en cluster ont été identifiés et ont des formes sphériques avec des diamètres compris entre $0,1$ et $0,5\mu m$. Ils pourraient être liés à la population de vides préexistants. La détection de ces vides a été uniquement possible grâce à la technique d’holotomographie à très haute résolution. Ces vides nanométriques se regroupent ensuite en coalescence (en bleu), conduisant à un groupe de vides avec une forme similaire à celle d’un cylindre plat. Ce cylindre peut être vu comme un volume de matière moins dense que la matrice, considéré comme une cavité individuelle dans les observations avec une résolution de $0,7\mu m$. Enfin, ce phénomène de coalescence se traduit par la création de vides micrométriques par rupture de fibrilles inter cavité, assimilés à des rayures en vue longitudinale (en violet) et à des cercles perpendiculaires à la direction de chargement dans le plan $r\theta$ (Fig. 2.10, scan A). Une fois le phénomène de coalescence terminé, les vides ne sont plus que des volumes cylindriques plats de matière moins dense et peuvent être clairement caractérisés comme des cavités en forme de "Penny" et identifiés individuellement.

Deux types d’agencements du vide ont également été identifiés et étudiés quantitativement, et attribués à des régions spécifiques des sphérolites déformées, illustrés sur la Fig. 2.11. Dans la vue longitudinale (Fig. 2.11 a), la sphérolite déformée a une forme elliptique, étirée longitudinalement le long de la direction de chargement. Les pôles sont représentés en bleu par des cavités à base cylindriques aplaties perpendiculaires à la direction de chargement. Ce sont des cavités individuelles organisées en deux colonnes coniques appelées les pôles nord et sud qui convergent vers le centre de la sphérolite. Les plus grandes cavités sont situées aux pôles de la sphérolite. De plus, l’organisation et l’orientation des lamelles cristallines au sein des sphérolites jouent un rôle majeur dans les micromécanismes de déformation et cavitation dans des polymères semi-cristallins. Au nord et au sud polaires des domaines, les lamelles sont parallèles au chargement. Des cavités en forme de "Penny" apparaissent alors entre les cristaux fragmentés. Elles se forment dans la phase amorphe qui a rempli l’espace vide laissé entre les fragments de lamelles.

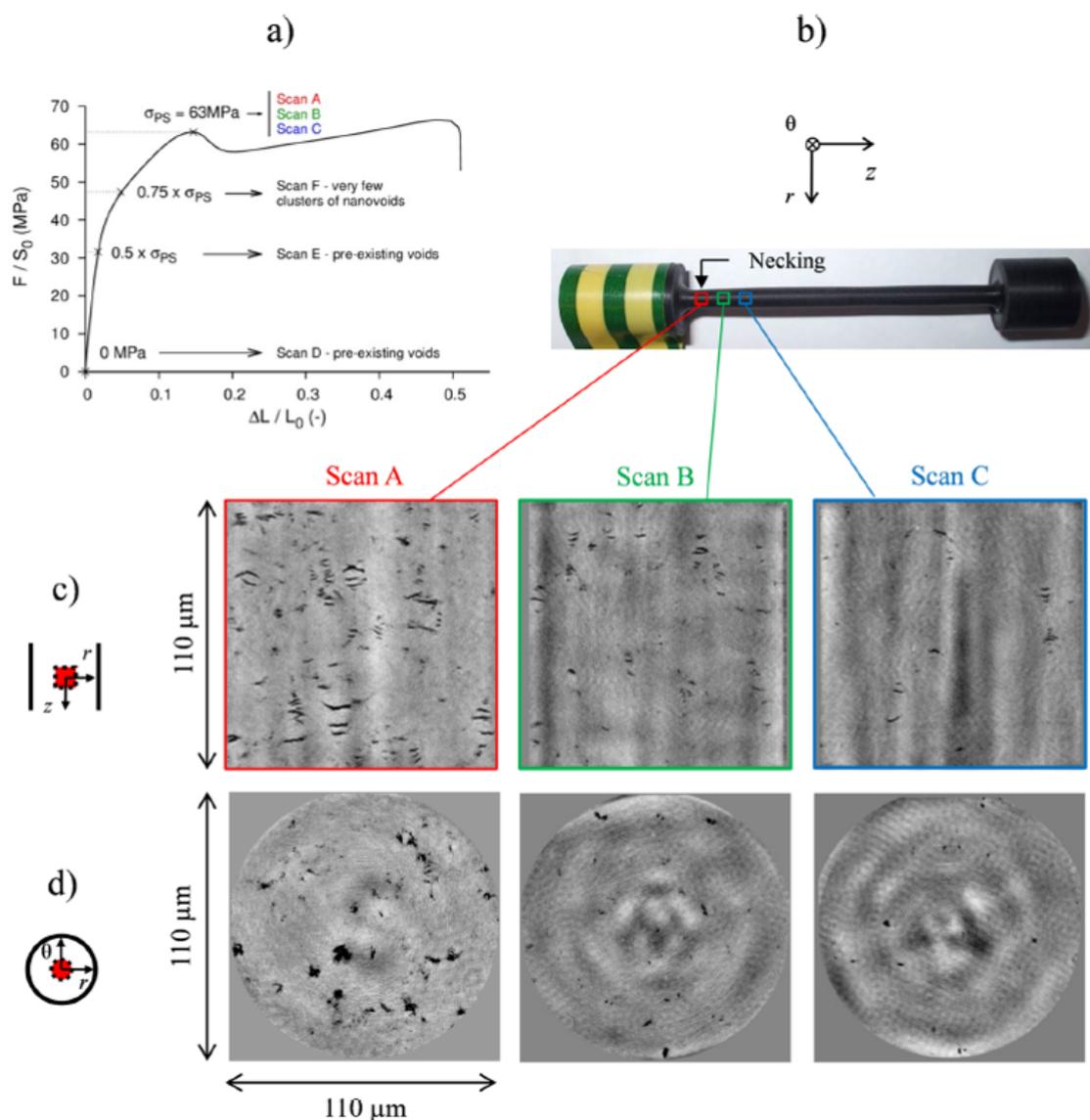


FIGURE 2.9 – (a) Courbe de traction contrainte-déformation de PA6. (b) Localisation des zones d'intérêt (scans A - C) dans la barre cylindrique déformée jusqu'à contrainte maximale. (c) Vues tomographiques longitudinales (plan rz). (d) Vues tomographiques circonférentielles (plan $r\theta$) [130].

Le volume intact au centre de la sphérolite a une forme rectangulaire dans la vue longitudinale, et sur ses deux côtés (dans la partie équatoriale de la sphérolite), les anneaux équatoriaux ont été représentés par des bandes rouges qui convergent vers le centre de la sphérolite. Dans les disques équatoriaux des sphérolites, les lamelles cristallines sont orientées perpendiculairement au chargement. La cavitation a lieu, dans la phase interlamellaire amorphe soumise à cette charge de traction. Dans la vue circonférentielle (Fig. 2.11 b), la sphérolite et son centre ont des formes circulaires. En 3D, la sphérolite a une forme sphéroïdale allongée le long de l'axe de chargement, et le centre peut être considéré comme un cylindre avec une base circulaire

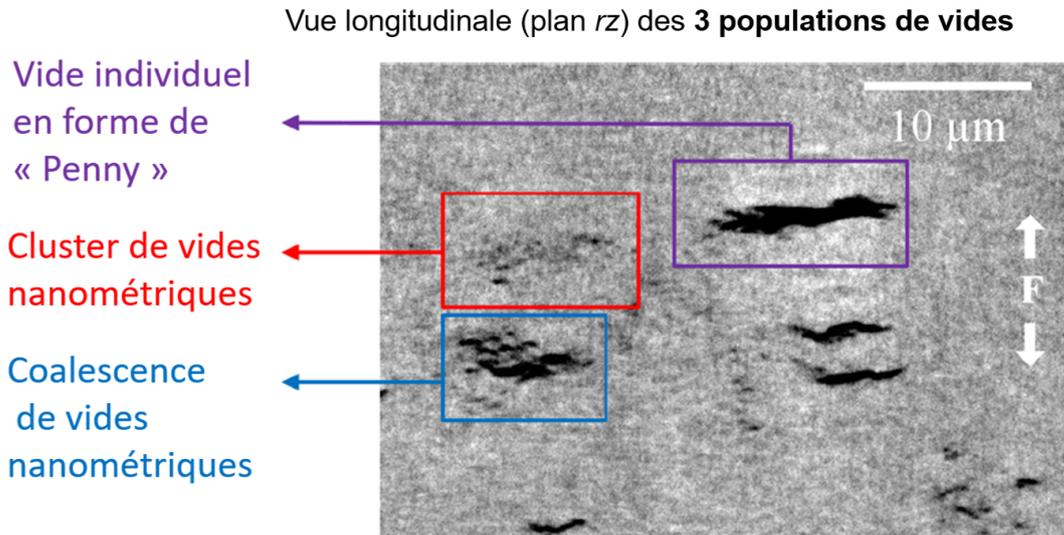


FIGURE 2.10 – Vue longitudinale (plan rz) des trois populations de vides dans le scan A [130].

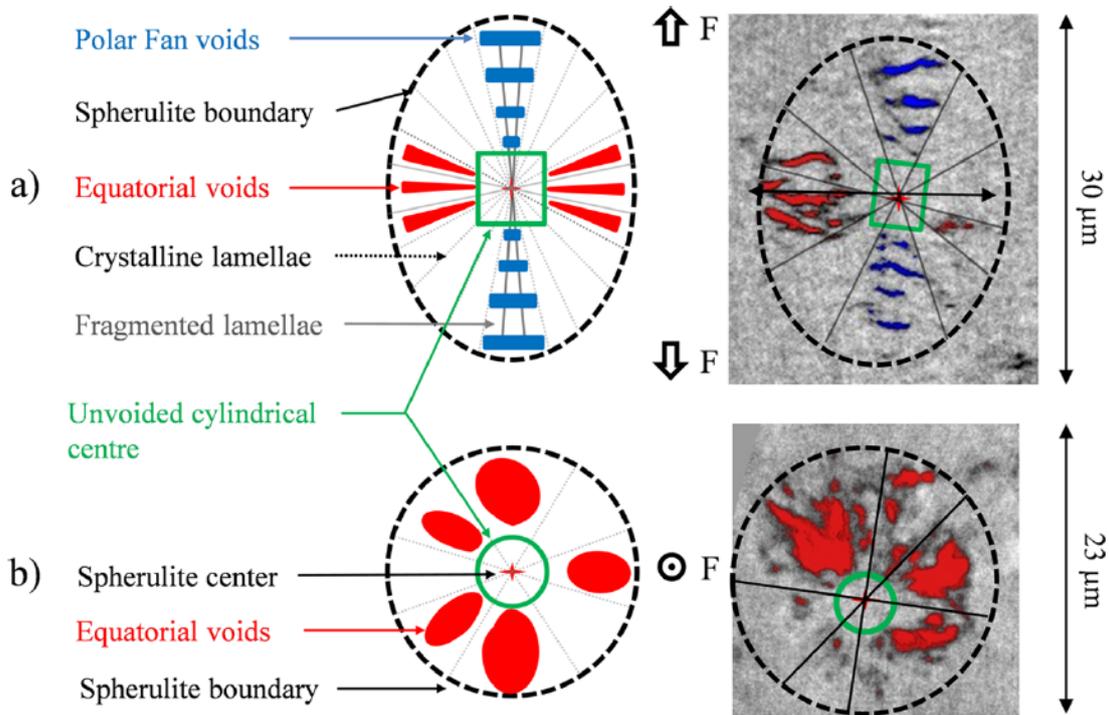


FIGURE 2.11 – Diagrammes d’agencement du vide à l’intérieur d’une sphérolite déformée : a) vue longitudinale (plan rz) ; (b) vue circonférentielle (plan $r\theta$) [130].

perpendiculaire à la direction de chargement.

Dans l’article de Cheng *et al.* [38], nous avons instigué le micromécanisme de déformation du

Polypropylène (iPP), un thermoplastique utilisé dans une grande variété d'applications (emballage, étiquetage, textiles, équipements de laboratoire, haut-parleurs et composants automobiles). Nous avons étudié le rôle de triaxialité des contraintes sur l'initiation des cavités et leurs mécanismes d'évolution au cours de la déformation. Pour ce faire, nous avons comparé deux types d'éprouvettes, l'une est une éprouvette de traction et l'autre est une éprouvette entaillée de type tension compacte (CT) (Fig. 2.12) soumises à une traction uni axiale et une tension compacte déformée sous une triaxialité. Les échantillons ont été observés à l'aide de la tomographie et la laminographie à l'ANKA de l'Institut de technologie de Karlsruhe en Allemagne.

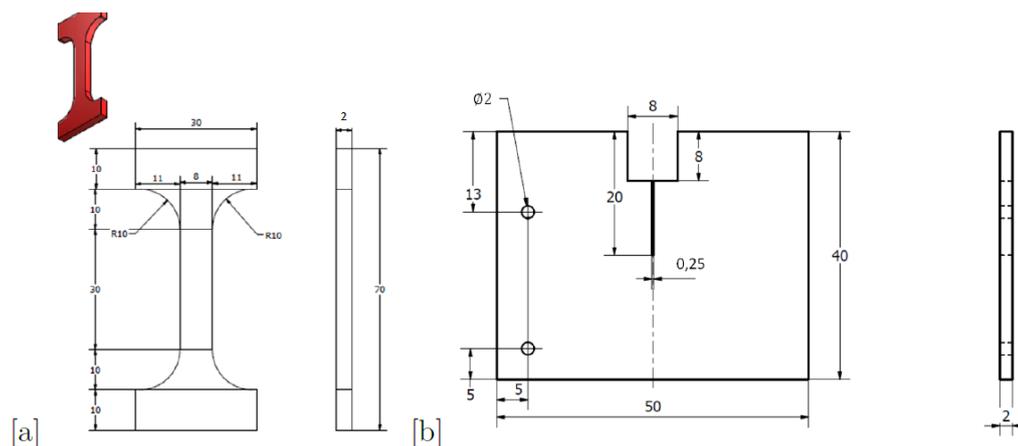


FIGURE 2.12 – Géométries des échantillons (a) éprouvette de traction (b) éprouvette de type tension compacte.

La microstructure de ce polymère est analysée au microscope optique (Fig. 2.13). La taille moyenne des sphérolites est d'environ $70 \mu\text{m}$ et peut atteindre $130 \mu\text{m}$ dans sa plus grande dimension.

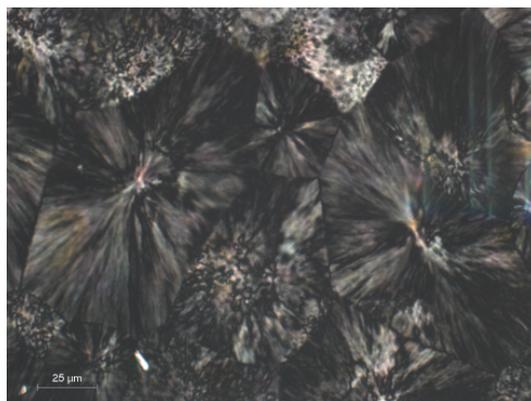


FIGURE 2.13 – Microstructure sphérolitique au coeur du PP étudié, microscopie optique en lumière polarisée

Les principales observations démontrent la transition des dommages polaires aux dommages équatoriaux en fonction de la triaxialité des contraintes.

La distribution spatio-temporelle de ces données constitue une base originale et extrêmement valorisante pour alimenter une modélisation numérique physiquement motivée. Cette dernière s'appuie sur un code de calcul par éléments finis dans lequel on implémentait, d'une part, un modèle de comportement développé au Centre de mise en forme des matériaux (CEMEF) qui intègre des notions physiques propres aux polymères et d'autre part, un modèle d'endommagement mis en oeuvre au Centre des Matériaux (CdM) pour ce qui concerne l'approche locale.

2.3 Endommagement à l'échelle meso/macrosopique

J'exerce mes activités de recherche au sein de l'équipe Tribologie et Matériaux, au Laboratoire Quartz, EA7393. Les objectifs de nos recherches concernent l'analyse des endommagements des matériaux sous l'action de sollicitations à l'échelle de la structure. Les endommagements peuvent se situer au coeur des pièces ou à leurs surfaces. Les sollicitations étudiées peuvent être sévères, telles que la pression, la vitesse, la température et l'hygrométrie, aussi bien en chargement dynamique que statique. La sollicitation telle que la fatigue constitue un élément récurrent des recherches du thème Tribologie et Matériaux. Ce principe d'accumulation du dommage sous l'action de sollicitations dynamiques peut se traduire par une destruction du matériau en volumique aussi qu'en surface. L'étude de ces phénomènes se fait par des travaux expérimentaux réalisés sur des dispositifs originaux développés au sein du Laboratoire accompagnés de modélisation.

L'origine d'apparition de l'endommagement est très discutée. Le délaminage peut apparaître pendant les phases d'usinage ou lors de chocs avec des outils ou d'autres pièces des assemblages. Si l'on s'intéresse plus largement aux endommagements que l'on retrouve sur pièces composites, on retrouve plusieurs types de dommages liés à l'hétérogénéité du matériau (Fig. 2.14).

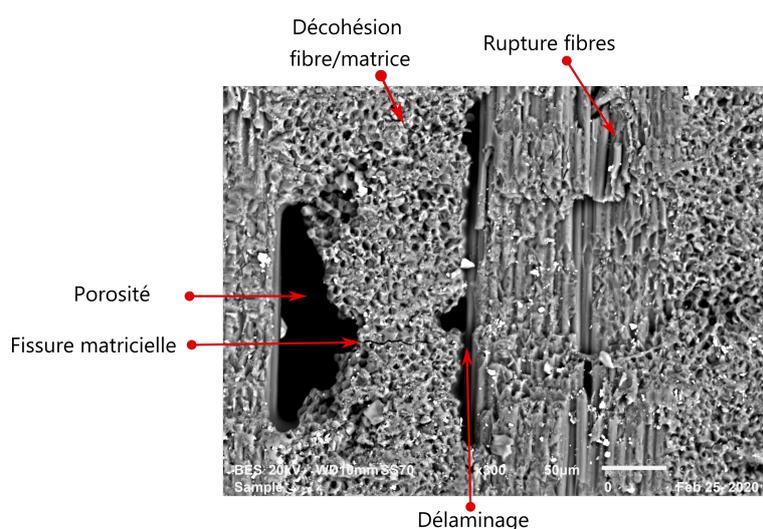


FIGURE 2.14 – Cliché MEB du T300/914 après l'usinage avec les endommagements enduits.



FIGURE 2.15 – Composite verres/PBT riveté endommagé, pièce d'étude de la thèse d'Oumeyma Hamlaoui [61].

Mots clés : Composite, verre/PBT, Endommagement, rivetage Financement et cadre : MOBIDOC, Projet Européen EMORI (2018-2021, Cotutelle) Collaborations : ELEKTRON Tunisie et LASEM/ENIS Sfax (R. Elleuch) Encadrements : Thèse O. Hamlaoui Valorisation : [62, 63]

Dans ce contexte le projet de recherche entre la société ELEKTRON Tunisie et les deux laboratoires LASEM de l'ENIS et QUARTZ de Supméca, dans le cadre du dispositif MOBIDOC, financé par le programme d'appui à l'Education, la MObilité, la Recherche et l'Innovation (EMORI) a démarré en 2018, via la thèse d'Oumayma Hamlaoui [61]. Les travaux portent sur l'étude de l'endommagement du corps du composant électrique en composite de polybutylène téréphtalate chargé de fibres de verres courts. La problématique se situe dans la présence des micro-fissures sur les composantes électroniques et du craquage de la pièce lors du rivetage (Fig. 2.15). Ce qui engendre la perte du maintien du contact des pins avec le corps, la mauvaise circulation du courant électrique, la perte de conductivité du courant électrique.

Dans le travaux de thèse d'Oumayma Hamlaoui [61, 62, 63] on a mis en place une identification de la loi de comportement et de la loi d'endommagement de structures composites à fibre courtes / matrice PBT à taux de fibres différentes. Une modélisation de tenue mécanique de composites en introduisant le modèle d'endommagement (Johnson Cook [72] compatible avec des matériaux ductiles), avec des paramètres de lois d'endommagement appropriés, identifiés expérimentalement, par des méthodes semi-analytiques à l'aide de Matlab et les calculs inverses sous Abaqus. Pour identifier les paramètres du modèle d'endommagement de Johnson Cook, nous avons fabriqué et caractérisé en traction les éprouvettes au taux de la triaxialité des contraintes (les éprouvettes entaillées aux trois rayons s'entaille).

2.4 Assemblages collés

A travers trois thèses encadrées [19, 76, 158], je me suis intéressée à l'étude de durabilité et à l'endommagement des assemblages collés. Je vais m'appuyer dans cette partie principalement sur ces travaux. Le collage structural est une technique d'assemblage de matériaux, qui peuvent être de natures différentes, à l'aide d'un adhésif polymérique (colle). Cette technique d'assemblage présente l'avantage d'obtenir une répartition plus régulière des contraintes ainsi qu'un allègement de la structure assemblée.

2.4.1 Contexte

Le monde industriel présente encore des réticences à utiliser cette technique dans le cas de pièces structurelles critiques. La compréhension du comportement d'un assemblage collé est difficile. En fait, le processus du collage dépend de beaucoup de paramètres, comme la nature des adhérents et de la colle [17, 54, 133], la qualité du traitement de surfaces [17, 70, 86, 103, 126], la rugosité, l'épaisseur de la colle [9, 25, 26, 97, 132, 135], la longueur de recouvrement [32, 133], la pression de collage, la température et l'hygrométrie. Afin de s'assurer de la fiabilité et de la performance du collage, on évalue les deux propriétés, la cohésion et l'adhésion de la colle. La cohésion représente la capacité du matériau à résister aux sollicitations mécaniques, alors que l'adhésion désigne la capacité de maintenir une liaison entre le substrat et l'adhésif. La cohésion des colles est analysée à travers le comportement mécanique qui varie selon la nature de la colle. De plus, les colles sont très sensibles au vieillissement et aux conditions environnementales telles que la température et l'humidité. Le vieillissement provoque une dégradation chimique. La température peut changer le comportement de façon drastique. De plus la température de transition vitreuse est un paramètre crucial à considérer lors du choix du polymère. L'humidité provoque une migration d'eau entre les chaînes et affaiblit les liaisons moléculaires. Un joint collé perd 90% de sa capacité à résister à la rupture lorsqu'il est saturé d'eau [42]. De ce fait, il est nécessaire d'avoir un ensemble de connaissances disciplinaires dans des domaines variés, tels que les traitements des surfaces, la physicochimie des polymères, la mécanique des matériaux et l'ingénierie mécanique. De plus, tous les produits aéronautiques doivent répondre aux exigences réglementaires imposées par l'Agence Européenne de Sécurité Aérienne (EASA). Ces exigences, appelées "Certification Specification", sont destinées à assurer la sécurité des passagers et populations survolés, et évoluent au fil des années (évolution des connaissances, développement de nouveaux concepts technologiques, retour d'expérience en service de produits certifiés suivant des exigences antérieures, etc.). Ces évolutions imposent au constructeur d'adapter sa technologie ou sa méthodologie de justification en prévision de nouvelles réglementations. La prise en compte de la tolérance aux dommages pour la justification des structures en fait partie. Le principe de tolérance aux dommages consiste à dimensionner une structure pour lui permettre de tolérer la présence de différents types de dommages, soit par des éléments de redondance mécanique, soit par des marges de sécurité supplémentaires, soit par l'utilisation de matériaux aux caractéristiques intrinsèques plus performantes. Les dommages susceptibles d'apparaître au cours de la vie d'un produit doivent être pris en compte dans la démarche intellectuelle de dimensionnement qui aboutit à la certification. Il est nécessaire de pouvoir caractériser ces dommages mais tout aussi important de pouvoir justifier de la fiabilité de ces résultats, en créant des lois probabilistes adéquates pour chaque type d'endommagement.

2.5 Traitement de surface et caractérisation de l'adhérence dans les assemblages

Mots clés : Composite naturel, traitement de surface, mouillabilité, adhésion
Financement et cadre : Bourse Tunisienne (2016-2020, Cotutelle)
Collaborations : LR-MAI/ENIT (Y.Maalej et R. Nasri)
Encadrements : Thèse A. Bechikh
Valorisation : [20, 21, 22]

Dans ce contexte nous nous sommes intéressés aux interfaces du collage, où les phénomènes physiques d'interactions, que l'on appelle l'adhésion, ont lieu. Il existe différentes théories qui essayent de décrire les phénomènes d'adhésion (ancrage mécanique, absorption et de la diffusion, liaison chimique...).

La mouillabilité est employée pour évaluer l'adhésion [86, 103, 112, 126]. Elle consiste à étudier l'aptitude d'un liquide à s'étaler sur une surface du solide. Les trois situations sont possibles, dépendant de l'angle de contact. On dit que le mouillage est parfait lorsque le liquide s'étale parfaitement en formant un film, l'angle de contact, $\theta = 0^\circ$. Le matériau est mouillable lorsque $\theta \in [0^\circ; 90^\circ]$. Enfin, le matériau est dit non mouillable au-delà de 90° . La bonne maîtrise de la mouillabilité de surface permet d'assurer un bon ancrage mécanique.

L'objectif du travail de thèse d'Amal Bechikh [19] était d'identifier les caractéristiques surfaciques conférant à un métal et à un bio-composite (fibres de lin/époxy) des bonnes propriétés d'adhésion. L'état de surface maîtrisé étant la clé de l'adhérence, nous avons orienté les travaux vers les facteurs qui augmentent la surface réelle de contact, comme la rugosité, favorisant l'adhésion par un processus d'ancrage mécanique. De même, la présence de groupes chimiques réactionnels en surface peut permettre la création de liaisons chimiques fortes entre le substrat et l'adhésif.

Les méthodes de traitement de surface sont nombreuses, les plus courantes sont les procédés mécaniques, chimiques et électrochimiques [3]. Afin d'améliorer les propriétés physiques et chimiques de la surface, la combinaison des différents procédés est possible [3, 17, 73, 113, 122, 147, 157]. L'effet des traitements de surface dépend de la nature du matériau [60, 112, 152] et des paramètres de traitement choisis (pression, distance, angle, primaires, énergie, etc...) [54, 64, 70, 86, 103, 112, 116, 126, 148].

L'impact de sablage et les paramètres de sablage, l'utilisation d'un tissu d'arrachement, le polissage, l'utilisation de primer de surface, la combinaison de ces traitements appliqués au substrats à été mise en évidence dans les travaux d'Amal Bechikh [19] en comparant la résistance des collages des matériaux, dont les surfaces étaient modifiées, lors des essais en mode II. L'aptitude d'adhésion de ces surfaces modifiées est réalisée pour les substrats métallique et composite. La méthodologie de caractérisation expérimentale de surface était proposée. Ainsi la rugosité, l'aptitude d'adhésion, l'énergie libre et la mouillabilité sont évalués avant et après le traitement. Cette méthodologie a permis d'identifier le traitement de surface adéquat pour chaque matériau.

Dans l'article Bechikh *et al.* [21] on s'intéresse au traitement de la surface tel que le sablage de l'acier galvanisé. L'influence des paramètres de sablage sur la composition chimique, la rugosité

de surface et l'énergie libre de l'acier est mise en évidence.

Un modèle d'Owens-Wendt [5, 117] est utilisé pour estimer l'énergie libre de surface. Dans ce modèle, les énergies de surfaces des liquides et du solide ont été séparées en deux composantes, l'une dite dispersive γ_d et l'autre polaire γ_p , avec respectivement pour la phase liquide et solide une énergie de surface totale (Eq. 2.1). L'énergie polaire est générée par les liaisons chimiques (van der Waals ou hydrogène). Quant à l'énergie dispersive, elle est formée par les liaisons chimiques telles que la force de London. L'Owens-Wendt se fait par moyenne géométrique (Eq. 2.2).

$$\begin{cases} \gamma_L = \gamma_L^p + \gamma_L^d \\ \gamma_S = \gamma_S^p + \gamma_S^d \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\gamma_L(1 + \cos \Theta) = 2\sqrt{\gamma_L^d \gamma_S^d} + 2\sqrt{\gamma_L^p \gamma_S^p} \quad (2.2)$$

On cherche donc à identifier les composantes polaire et dispersive de la phase solide. Elles sont calculées à partir de mesures d'angle de contact réalisées à l'aide d'au moins deux liquides dont les composantes polaires et dispersives sont connues (typiquement comme l'eau, l'iode de méthylène l'éthylène-glycol ou la glycérine). On procède par régression linéaire $y = ax + b$.

Par transformation de l'Eq. 2.2, les points en abscisse et en ordonnée se calculent, pour chaque liquide, comme Eqs. 2.3 et 2.4.

$$x = \sqrt{\frac{\gamma_L^p}{\gamma_L^d}} \quad (2.3)$$

$$y = \frac{\gamma_L(1 + \cos \Theta)}{2\sqrt{\gamma_L^d}} \quad (2.4)$$

La régression conduit directement aux composantes du solide, $\gamma_S^p = a^2$ $\gamma_S^d = b^2$.

La rugosité de surface mesurée (Fig. 2.18) en complément de l'estimation d'énergie de surface (ici pour G90/150 Fig. 2.17) nous ont permis de favoriser un traitement.

En fonction des paramètres de sablage choisis, on a constaté que l'épaisseur de substrat varie. La granulométrie du sable de verre la plus faible génère des surfaces moins rugueuses, mais avec une énergie libre de surface élevée. La pression de sablage, quant à elle, plus elle est importante plus la surface est rugueuse, avec la plus grande énergie libre de surface. La variation de l'angle de sablage affecte plutôt la composition chimique et la mouillabilité, que la rugosité. La granulométrie est un paramètre plus significatif que l'angle et la pression de sablage.

Les textures différentes obtenues en fonction du choix de paramètres de sablage sont visibles sur la Figure 2.19.

Dans l'article Bechikh *et al.* [22] nous avons fait ressortir l'influence du traitement de surface du composite lin/époxy, tels que le sablage, le polissage et l'utilisation d'une couche d'arrangement (pelage) sur la qualité de l'adhésion composite/composite. La topologie de surface, l'état de surface, l'énergie libre et la résistance au cisaillement des assemblages ont été analysés. La topographie de la surface a été évaluée à l'aide d'un microscope optique. La hauteur moyenne arithmétique a été estimée par un surfacescan mécanique. L'énergie libre de surface a été déterminée en utilisant la méthode de l'angle de contact (modèle Owens-Wendt). La résistance au cisaillement des assemblages composites à composites collés a été évaluée à l'aide de l'essai de cisaillement sur une éprouvette à simple recouvrement (SLJ).

Traitement de surface	$Sa(\mu m)$
Sablage 200/300	$40,36 \pm 1,5$
Sablage 90/150	$33,99 \pm 0,86$
Sablage 70/110	$31,42 \pm 1,37$
Polissage	$8,91 \pm 0,06$
Pelage	$27,24 \pm 0,33$
Aucun traitement	$24,53 \pm 0,72$

TABLE 2.1 – Hauteur moyenne arithmétique du composite (Sa) avant et après traitement de la surface.

Traitement de surface	$\gamma_s^p(mN/m)$	$\gamma_s^d(mN/m)$	$\gamma_s^t(mN/m)$
Sablage 200/300	$27,22 \pm 0,15$	50,8	$78,02 \pm 0,15$
Sablage 90/150	$7,55 \pm 0,24$	50,8	$58,35 \pm 0,24$
Sablage 70/110	$23,88 \pm 0,59$	50,8	$74,69 \pm 0,6$
Polissage	$9,30 \pm 0,43$	$45,86 \pm 0,14$	$55,15 \pm 0,56$
Pelage	$17,05 \pm 0,4$	$44,37 \pm 0,4$	$61,41 \pm 0,79$
Aucun traitement	$3,38 \pm 0,35$	$34,35 \pm 0,72$	$37,73 \pm 0,71$

TABLE 2.2 – Composantes polaires et dispersives et énergie libre de la surface du composite avant et après le traitement de la surface.

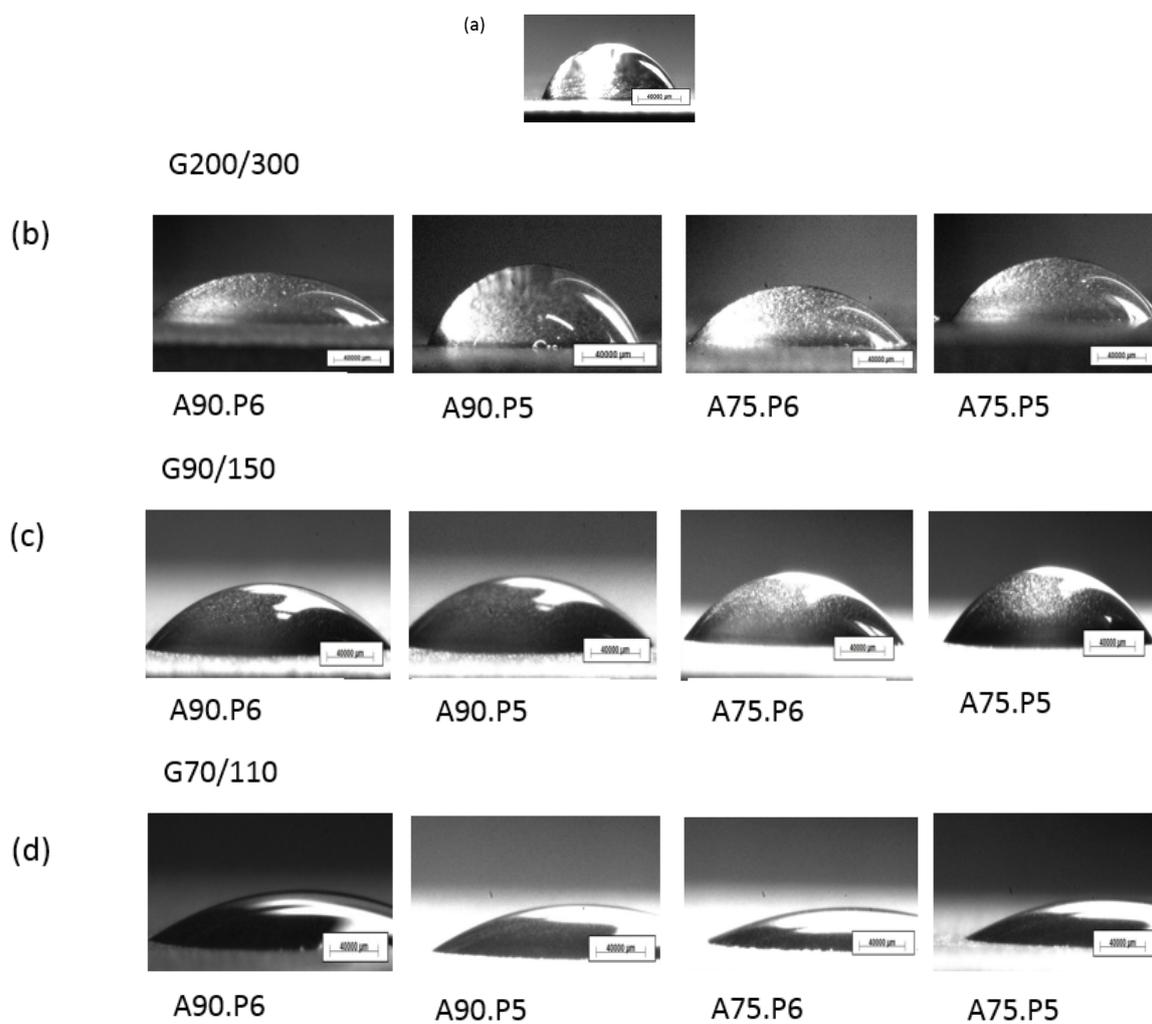


FIGURE 2.16 – Gouttes d'eau distillée déposées sur la surface de l'acier en fonction de traitement de sablage avec du sable de verre de Granulométrie, Angle et Pression différents (a) brut, (b) sablage avec granulométrie G200/300, (c) avec granulométrie G90/150, (d) avec granulométrie G70/110 [21].

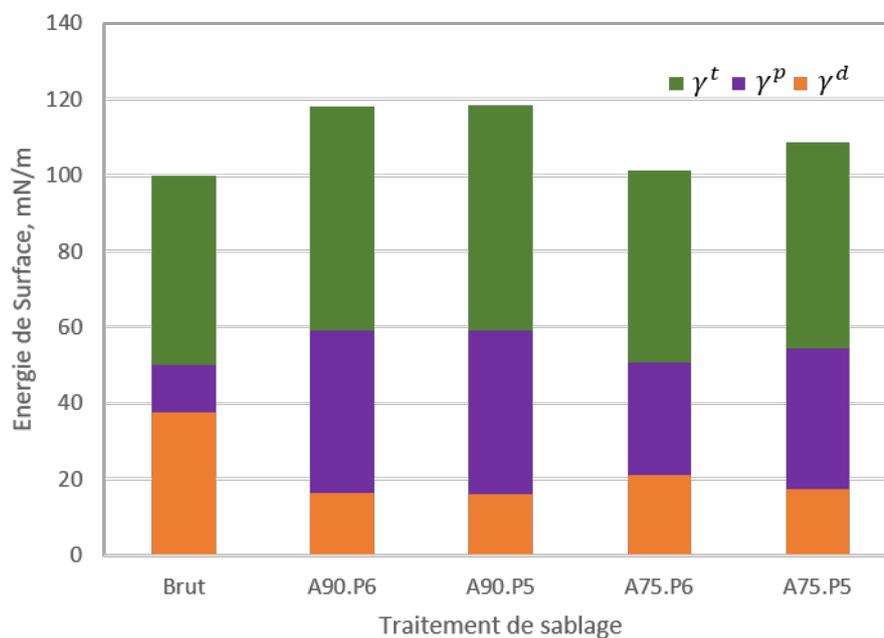


FIGURE 2.17 – Énergie libre de surface avec les composantes polaire et dispersive de l'acier en fonction de paramètres de sablage pour la granulométrie G90/150.

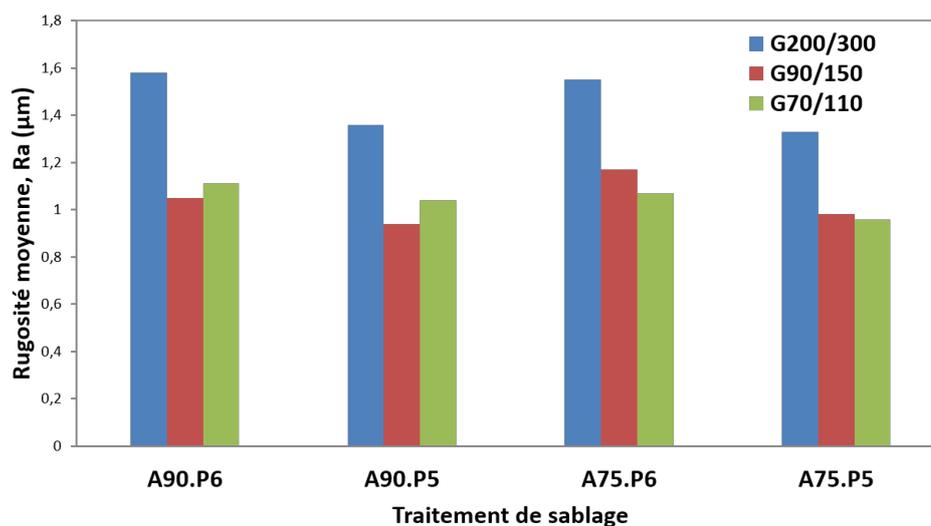


FIGURE 2.18 – Rugosité moyenne en fonction des paramètres du sablage choisis.

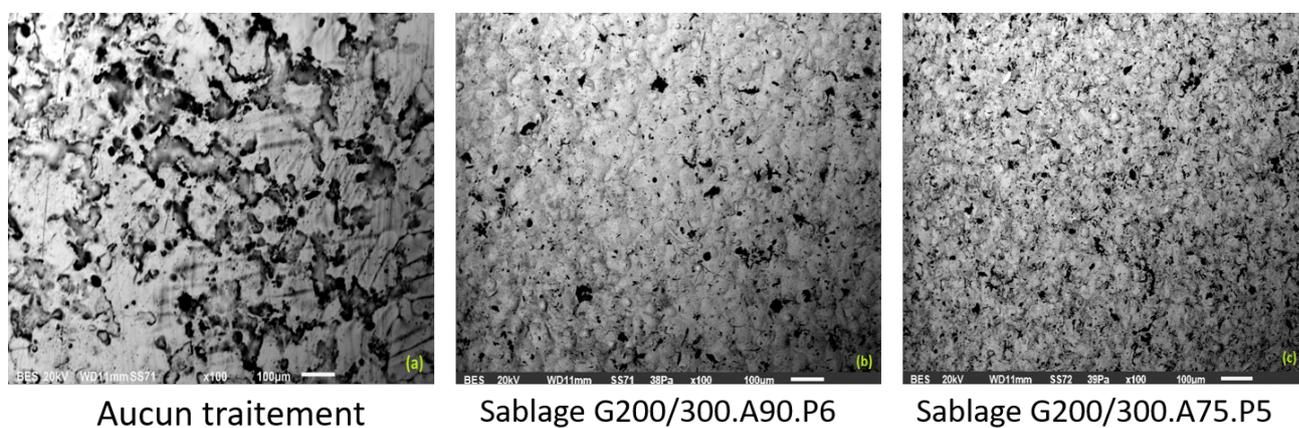


FIGURE 2.19 – Images MEB de la texture d’acier : (a) non-traité, (b) traité avec un traitement de sablage G200/300.A90.P6 avec un Angle de 90° et la Pression de 6 bars, (c) traité avec un traitement de sablage G200/300.A75.P5. avec un Angle de 75° et la Pression de 0,5 MPa.

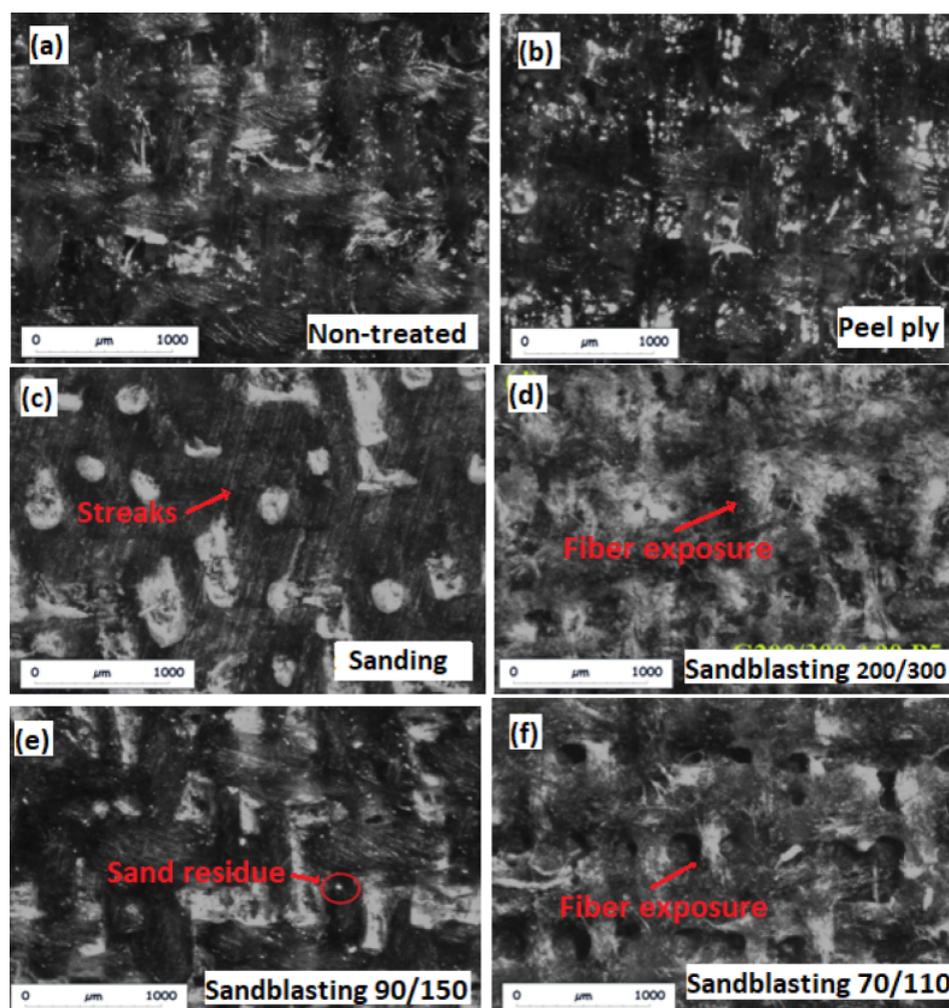


FIGURE 2.20 – Images optiques de la surface du composite après (a) aucun traitement, (b) pelage, (c) polissage et sablage en utilisant (d) une granulométrie de 200/300, (e) une granulométrie de 90/150 et (f) une granulométrie de 70/110 [22].

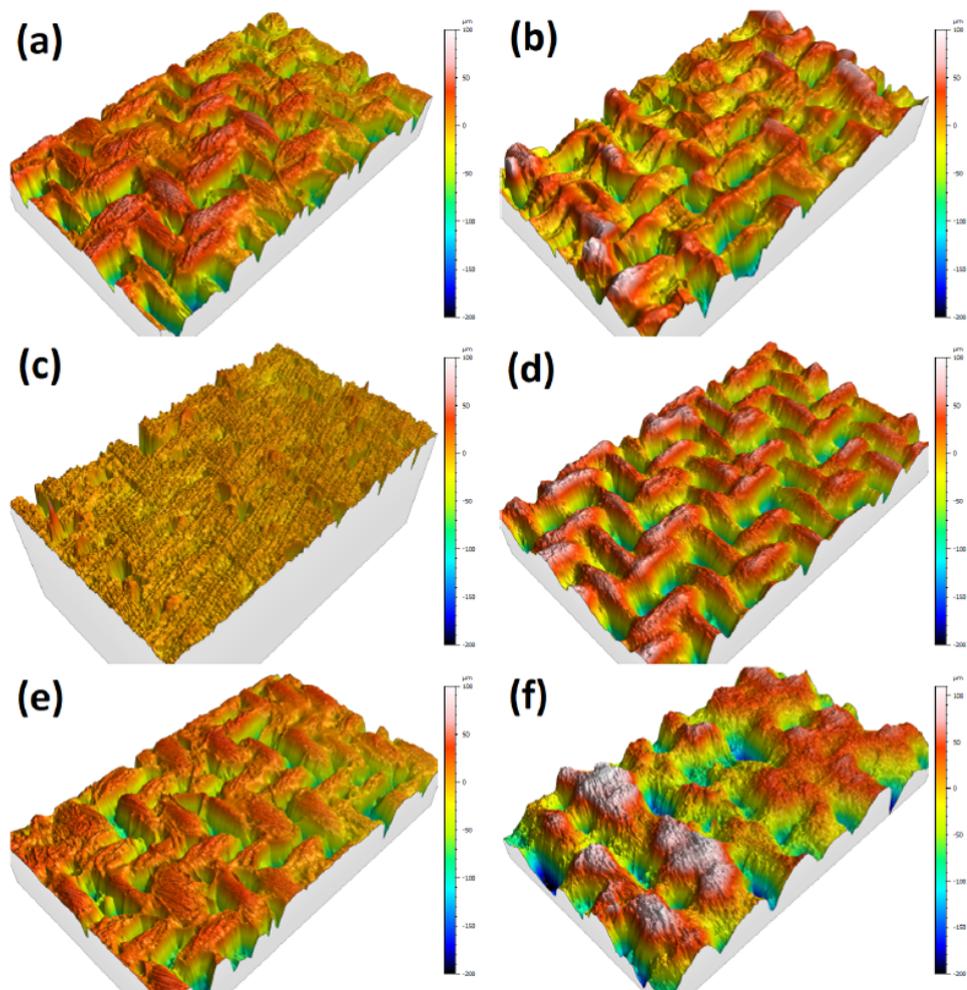


FIGURE 2.21 – Profil 3D de surface du composite (a) avant traitement et après (b) pelage, (c) polissage, (d) sablage - 70/110, (e) sablage - 90/150 et (f) sablage 200/300 [22].

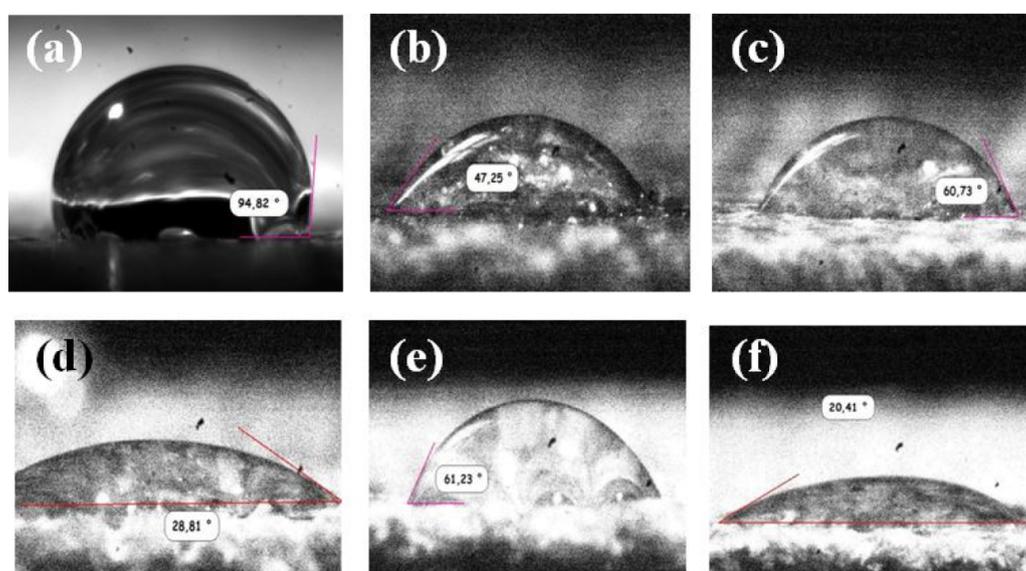


FIGURE 2.22 – Gouttelettes d'eau distillée déposées sur la surface du composite lin/époxy (a) avant traitement et après (b) pelage, (c) polissage, (d) sablage - 70/110, (e) sablage - 90/150 et (f) sablage 200/300 [22].

2.6 Modélisation thermo-hygro-mécanique couplée

Mots clés : Bande de convoyeur, réparation, modélisation couplée, durabilité, vieillissement
 Financement et cadre : Bourse, Enseignante ISET (2014-2018 - Cotutelle)
 Collaborations : LA2MP/ENIS Sfax (M. Haddar)
 Encadrements : Thèse R. Kessentini
 Valorisation : [77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85]

L'analyse des assemblés collés se fait généralement expérimentalement (essais, fractographie, analyses chimiques...), numériquement (FEM) et avec une approche analytique. L'objectif du travail de thèse de Rawdha Kessentini [76] était de proposer des outils de modélisation et de caractérisation de bande transporteuse en composites à matrice élastomère réparées par collage, permettant de tenir compte, dans une démarche globale de conception et dimensionnement, des déformations et des contraintes internes, à l'échelle des plis.

La bande transporteuse est un composite structural hétérogène constitué de deux composantes. Le renfort, qui transmet l'effort d'entraînement pour le déplacement de la bande et le revêtement, qui protège le renfort contre les chocs et les expositions du milieu extérieur. En service, la bande est soumise à plusieurs contraintes opérationnelles, en général d'origine mécanique et environnementale. Dans les périodes de surcharge, ces contraintes peuvent dépasser la tension maximale de la bande, des mécanismes d'endommagement peuvent se présenter et la criticité des défauts engendre des pertes de résistance plus au moins significatives, des contraintes liées aux pertes de rigidité s'ajoutent. Les techniques de réparation de la bande en fonction de la criticité des défauts offrent des solutions à court et à long terme pour la prise de décision du service maintenance. L'une des principales techniques de réparation des bandes de convoyeur sont les joints adhésifs [76].

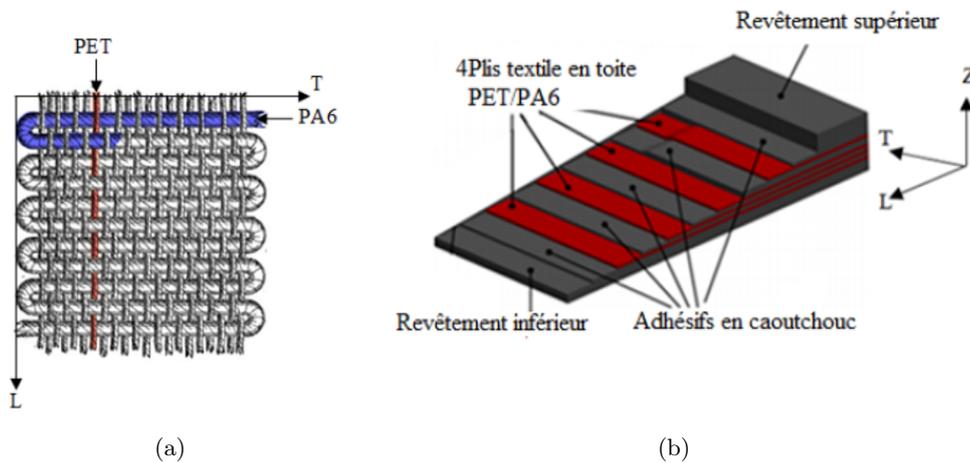


FIGURE 2.23 – (a) Tissu de PET/PA6; (b) Bande transporteuse caoutchouc renforcé par PET/PA6 [76].

Un effort à la fois expérimental et numérique est mené pour caractériser et calculer les déformations et les contraintes de service générées par des sollicitations de nature mécanique,

thermique et hydrique. Selon un état de l'art dressé durant la thèse, nous avons constaté que le couplage partiel a été fait dans la littérature. Notamment le couplage thermo-mécanique (T+M) [65, 66, 131, 44, 155, 144], ou alors les travaux de prédiction du comportement en présence d'humidité uniquement [31, 154]. Dans cette thèse on s'intéresse particulièrement au cas de sollicitations hygro-thermo-mécaniques combinées conduisant à des phénomènes de couplages : interactions entre l'état mécanique local et le comportement diffusif effectif des matériaux composites.

Dans l'article Kessentini *et al.* [82], un modèle analytique avec un couplage hygro thermo mécanique est développé pour prédire le comportement des assemblages multi matériaux collés. Un équilibre mécanique est d'abord décrit par les Eqs 2.5 pour chaque couche. Des hypothèses simplificatrices classiques consistaient à supposer que le comportement de chacune des couches est linéaire élastique.

$$\begin{cases} \frac{dN_{1x}}{dx} + \tau_{1xz}^a = 0 \\ \frac{dN_{2x}}{dx} + \tau_{2xz}^a - \tau_{1xz}^a = 0 \\ \frac{dN_{3x}}{dx} - \tau_{2xz}^a = 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

La déformation résultante des différents types de chargement est décrite par le principe de superposition. Le premier terme de l'Eq. 2.6 est basé sur la théorie du comportement élastique des adhérents et décrits la déformation mécanique dans chaque adhérent, le second terme est basé sur la loi linéaire de Fourier ajoutant ainsi l'effet de la déformation thermique apporté par un gradient de température ΔT , et le dernier terme est basé sur la loi linéaire de Fick présentant l'expansion des trois adhérents, suite à une exposition à un milieu humide.

$$\varepsilon_{i,x} = \frac{N_{i,x}}{h_i \cdot E_{ix}} + \alpha_{ix} \Delta T + \beta_{ix} \Delta C_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.6)$$

$$\Delta C_i = 1 - \frac{4}{\pi} \left(C_0 + \sum_{N=1}^{\infty} \frac{1}{2N+1} \sin \frac{(2N+1)\pi Z}{h_i} \exp \left[-\frac{(2N+1)^2 \pi^2 D_i t}{h_i^2} \right] \right) \quad (2.7)$$

L'Eq. 2.7 permet de calculer la concentration normalisée déduite de la loi de Fick. C_0 est la concentration à la saturation en humidité relative, N est le nombre des termes de sommation jusqu'à la saturation, Z est la direction de diffusion selon l'axe Z , D_i est la diffusibilité de chaque adhérent et t l'incrément de temps. La résolution de ces équations différentielles permet d'obtenir les contraintes normale et de cisaillement dans les couches constituant l'assemblage.

Ce modèle analytique couplé [82, 84] est mis à l'épreuve avec des structures composites très diverses issues de la bibliographie. A titre d'exemple, dans l'article [82], un assemblage Al/Composite/Al collé par un adhésif base époxy FM73 de Liljedahl *et al.* [105] est utilisé avec les propriétés des matériaux et les paramètres géométriques regroupés dans les Tableaux 2.3 et 2.4.

Une simulation numérique sous Abaqus a été mise en place en utilisant les sous-routines d'Abaqus [143], afin de comparer les résultats analytiques.

Matériaux	E_{ix} MPa	D_i mm^2/s	α_{ix} C^{-1}	β_{ix} $\%^{-1}$	ν_{xy} -
Composite IM7/8552	168000	$70 \cdot 10^{-8}$	$2,86 \cdot 10^{-8}$	0.0046	0,31
Aluminium	68400	0	$2,36 \cdot 10^{-5}$	0	0,33
Adhésif FM73	2000	$52,2 \cdot 10^{-10}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	0,0021	0.4

TABLE 2.3 – Propriétés des matériaux de l’assemblage Al/Composite/Al de [105].

Paramètre	Définition	Valeur en mm
L_x	Longueur de recouvrement	40
b	Largeur de la structure	40
$h_1 = h_3$	Épaisseur de l’aluminium	2.01
h_2	Épaisseur de CFRP	3.97
$h_{a1} = h_{a2}$	Épaisseur de l’adhésive	0.13

TABLE 2.4 – Propriétés géométriques de l’assemblage Al/Composite/Al [105]

Nous pouvons constater sur la Fig. 2.25 l’intérêt du couplage hygro-thermo-mécanique (H+T+M). La courbe montre la distribution de la contrainte normale dans le composite. Si un état mécanique (M) est uniquement pris en compte, comme les modèles analytiques de Volkerson, Goland et Reissner, Ojalvo et Eidinoff [115], Delale et al. [47], Bigwood et Crocombe [25], on constate un état de contrainte largement sur-estimé (ligne noire). Un gradient thermique couplé avec la sollicitation mécanique (ligne bleue), représentant les modèles de Hart-Smith [65, 66], Da Silva et Adams [131], Coudor [44], Wang et Zheng [155] et Tahani et Yousfani [144], n’est pas suffisant pour représenter correctement le niveau de contraintes. Lorsque seul l’effet hygro-thermique est considéré (ligne verte), la contrainte devient négative et deux fois plus élevée que celle obtenue pour le modèle hygro-thermo-mécanique couplé (ligne rouge). La prise en compte de l’humidité est cruciale, mais doit être couplée avec les sollicitations thermo-mécaniques. Le gonflement du composite provoqué par l’humidité absorbée sur les bords de recouvrement représente la physique des matériaux organiques, et modifie notablement le comportement des assemblages collés. La présence simultanée des effets hygroscopique, thermique et mécanique, réduit les contraintes de tension avec la contribution de l’effet résiduel.

La réponse d’une structure multi-couche collée peut être très différente en fonction du type de chargement, du choix du matériau et du temps d’exposition en milieu humide. La modélisation et la caractérisation de la diffusion d’humidité et du gonflement hygroscopique du matériau doit impérativement faire partie de la méthodologie de mise en donnée (travail décrit dans la section 2.7).

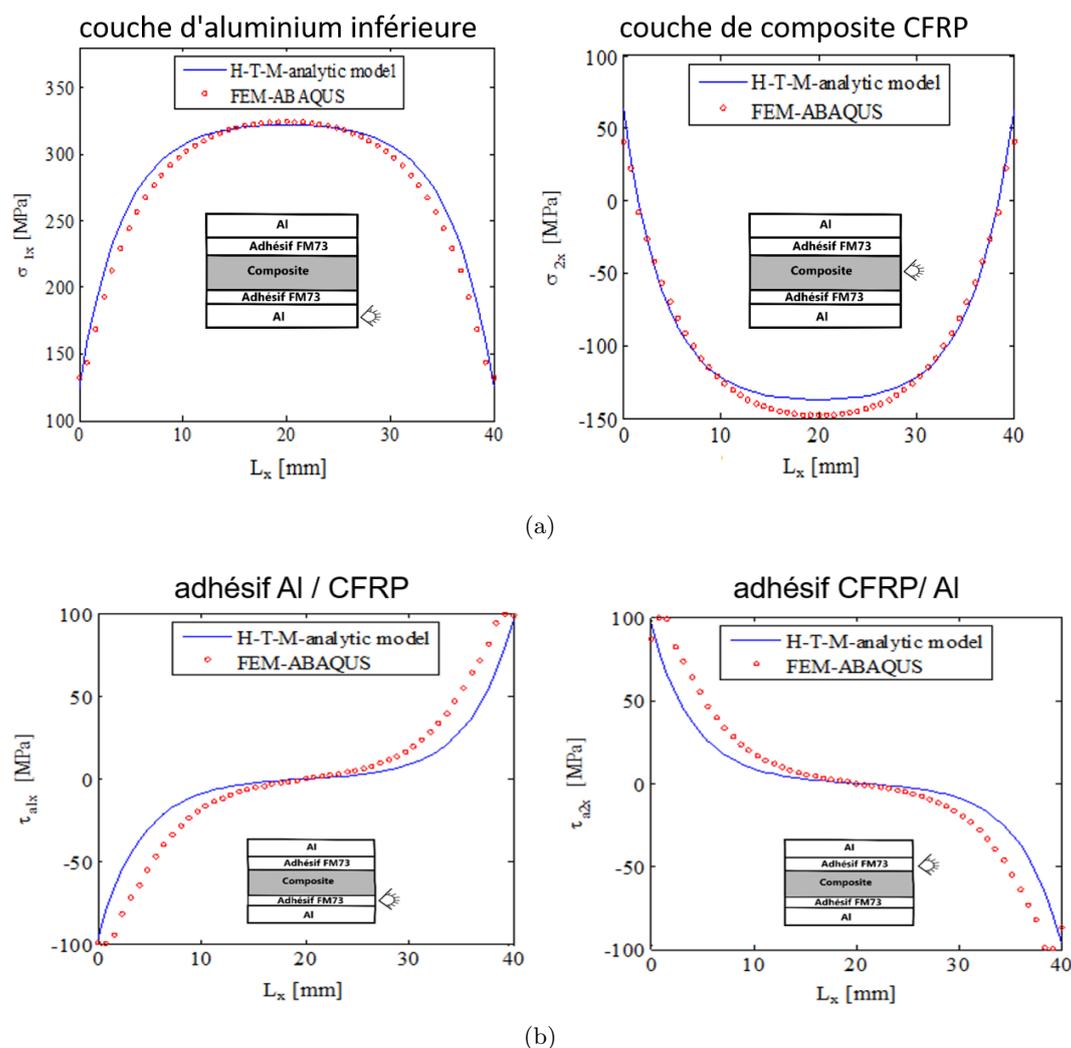


FIGURE 2.24 – Distribution des contraintes normale et de cisaillement d’assemblage Al/Composite/Al pour le cas d’un chargement hygro-thermo-mécanique (H+T+M), après 20 semaines d’exposition à 95,6% HR sous gradient thermique de $\Delta T = 200^\circ\text{C}$ sollicité en traction de 10 kN/mm : (a) dans les couches de substrats (b) dans les couches adhésives [76].

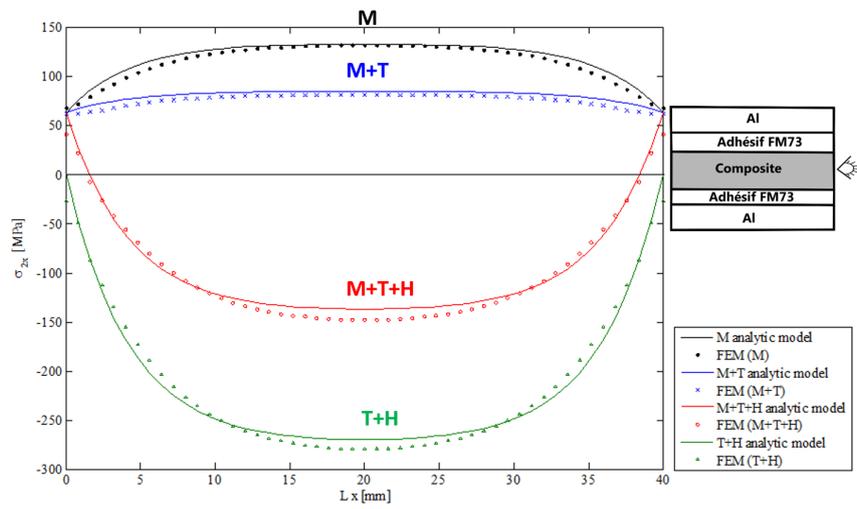


FIGURE 2.25 – Distribution des contraintes normales dans la couche composite pour différents cas de chargement, $\Delta T = 200^{\circ}C$, pour 20 semaines d'exposition à 95,6% *HR* et une charge de traction de 10 kN/mm [76].

2.7 Vieillessement

Nous avons mis en place une caractérisation hygrométrique en complément avec les méthodes analytiques (section 2.6). Généralement, afin de décrire la diffusion de l'eau, la loi de Fick est utilisée grâce à sa simplicité. Elle stipule que le flux d'humidité est directement proportionnel au gradient de concentration d'humidité $C(z, t)$ en % du matériau.

Dans l'article Kessentini *et al.* [83], nous avons étudié le comportement de la bande en présence de l'eau. Le caoutchouc étant moins sensible à l'eau, est utilisé afin de protéger le renfort et minimiser la pénétration de l'humidité dans les couches textiles. Mais la contribution du gonflement hygroscopique induit le délaminage mésoscopique (entre caoutchouc et fibre textile). Le modèle Fickian, le modèle séquentiel double Fickian (SDF) [11] et le modèle de diffusion avec la relaxation [71] sont comparés afin d'évaluer les paramètres de diffusions d'humidité de revêtement supérieur en caoutchouc, du renfort dans le plan (l, t) et de la bande composite, en utilisant une approche d'optimisation des moindres carrés sous Matlab.

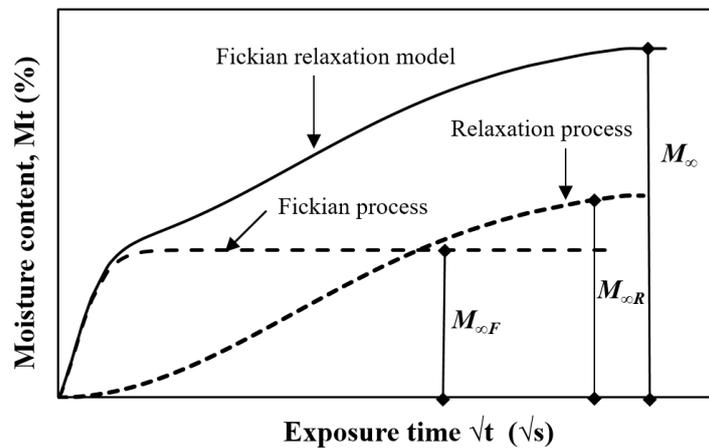


FIGURE 2.26 – Représentation analytique des modèles de diffusions de Fick et avec la relaxation [83].

Cinq variables indépendantes ($D1, M1_\infty, D2, td$ et M_∞) peuvent être identifiées en utilisant l'approche des moindres carrés pour produire le meilleur ajustement à la courbe expérimentale. Une première diffusion Fickian avec le coefficient de diffusion $D1$ et le niveau de saturation de $M1_\infty$ est suivie d'une deuxième séquence Fickian ($D2$ et $M2_\infty = M_\infty - M1_\infty$) après un temps de retard ($td = 168h$). Sur la Figure 2.27 a, nous pouvons constater que le modèle SDF représente mieux les résultats expérimentaux mais après 115 jours de vieillissement, la contribution du processus de relaxation devient significative. Le processus de diffusion Fickian contrôle l'absorption linéaire initiale et peut ne pas être suffisant pour décrire l'absorption d'humidité. Le modèle SDF décrit correctement le début (comme Fickian simple) et le second mécanisme de diffusion, mais ne correspond toujours pas à toutes les données expérimentales. En revanche, le modèle de diffusion avec de la relaxation permet d'ajuster parfaitement les données expérimentales du renfort (Figure 2.27 b).

Une fois que les modèles sont choisis pour chacun des matériaux, la cinétique de diffusion est étudiée à 50°C pour les trois environnements humides : 68% RH, 80% RH et l'immersion

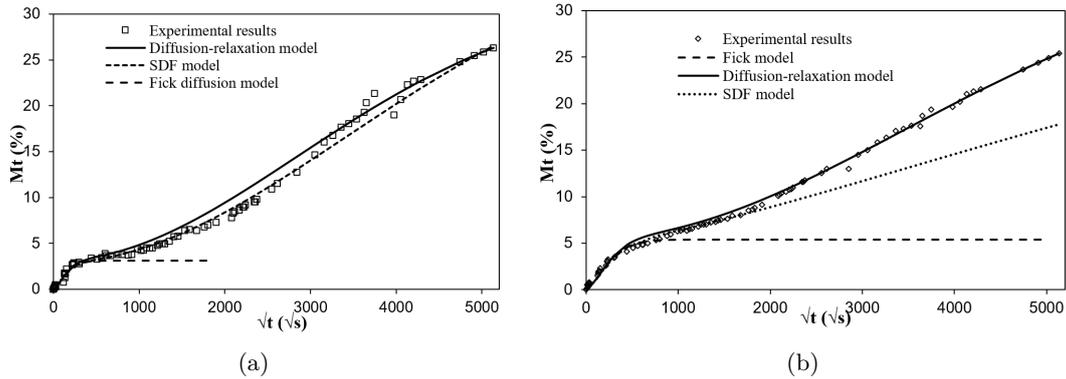


FIGURE 2.27 – Diffusion d’humidité (a) de revêtement supérieur en caoutchouc (b) de PET, immergé dans l’eau à $50^{\circ}C$ [83].

Conditions de vieillissement	D_{1x} $10^{-11}m^2/s$	D_{1y} $10^{-8}m^2/s$	$M_{\infty Fx}$ %	$M_{\infty Fy}$ %	$M_{\infty Rx}$ %	$M_{\infty Ry}$ %	k_x $10^{-6}s^{-1}$	k_y $10^{-6}s^{-1}$
Eau	8,11	-	5,41	-	29,51	-	$4,2 \cdot 10^{-2}$	-
80% RH	5,45	10,3	0,15	1,01	0,069	0,217	1,1	2,7
68% RH	2,75	1,21	0,093	0,33	0	0	0	0

TABLE 2.5 – Coefficients de diffusion de l’humidité de la bande composite à matrice élastomère dans le plan xy [83]

dans l’eau distillée. Ce qui permet d’obtenir les paramètres nécessaires aux modèles numériques de prédiction de la durée de vie.

Sur la Figure 2.28 (a) la bande du composite de la thèse de R. Kessentini [76] non vieillie a été caractérisée, pour avoir les références dimensionnelles. La taille moyenne des fibres PET et PA6 était de $25\mu m$. Puis, la bande était immergée dans l’eau à $50^{\circ}C$ pendant 6 mois. Nous avons pu constater le gonflement des couches, les endommagements tels que le délaminage, les fissures, l’apparition des vides visibles sur la Figure 2.28 (b).

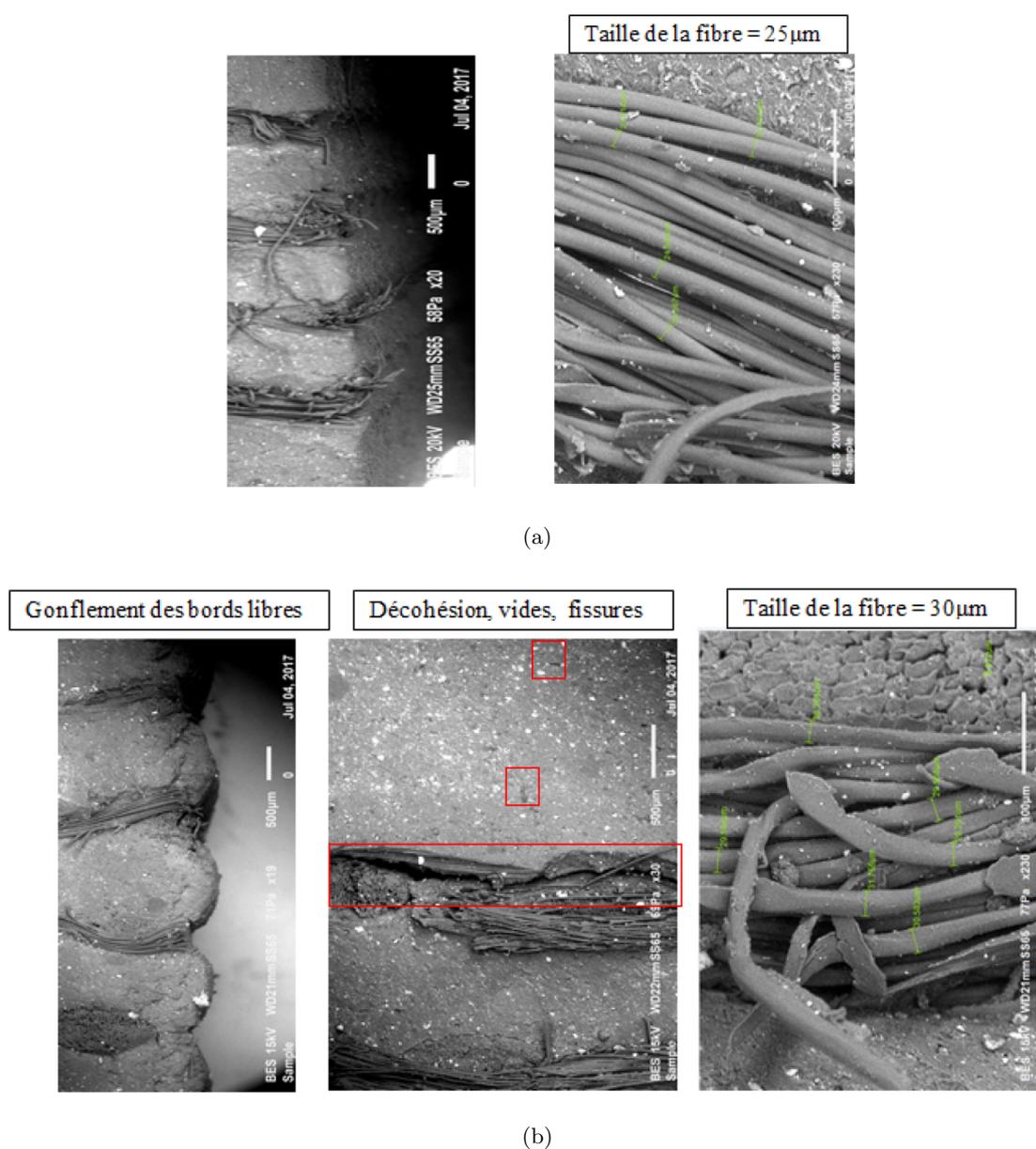


FIGURE 2.28 – (a) Bande de convoyeur en PA6-PET/caoutchouc non vieillie (b) Bande vieillie après 6 mois d’immersion dans l’eau à 50°C [76].

2.8 Tolérance aux dommages

Mots clés : Composite, tenue en fatigue, collage, tolérance aux dommages, durabilité
Financement et cadre : CIFRE AH (2014-2017)
Collaborations : Airbus Helicopters (C. Lanouette), Airbus (Ch. Paris)
Encadrements : Thèse G. Zambelis
Valorisation : [159, 160, 161, 162]

La thèse de Georges Zambelis [158] financée par Airbus, s'est concentrée sur l'étude de la fiabilité mécanique caractérisant la tenue en fatigue de matériaux composites sur pale d'hélicoptère. Cette thèse est confidentielle, par conséquent, je ne m'appuie que sur les résultats des travaux publiés. Les dernières générations de pales d'hélicoptère de la gamme Airbus sont constituées d'une structure faite de plusieurs matériaux (composites, métaux, mousses, nids d'abeilles..), qui assemblés entre eux, forment un produit aéronautique à hautes performances. Les pales travaillent principalement en fatigue, ce qui nécessite de connaître leur tenue mécanique en sollicitations dynamiques. Les structures travaillant ainsi ont une certaine dispersion en mécanique de la rupture, qui peut être due à leur mise en oeuvre et à la nature dispersive des propriétés des matériaux utilisés. Il était donc nécessaire de pouvoir quantifier cette dispersion en passant par des essais et en étudiant leur fiabilité mécanique. Ce travail de thèse a permis d'identifier les mécanismes d'endommagement en statique et en fatigue des assemblages métal/composites therm durcissables renforcés par des fibres de verre collés. Les différents substrats métalliques (inox, titane et nickel-cobalt) collés avec du MB 1113 (base époxy) et du composite (fibres de verre/époxy) ont été étudiés. Les métaux ont eu un traitement surfacique spécifique. La surface du composite n'est pas traitée.

2.8.1 Caractérisation expérimentale des assemblages collés

À l'aide de la mécanique de la rupture on peut étudier le comportement d'une structure avec des défauts (Figure 2.1). Ces défauts peuvent être visibles (fissures débouchantes) ou invisibles (fissures internes). L'analyse en mécanique de la rupture corrèle des paramètres provenant du chargement, de la géométrie, et du matériau [29, 52]. Les modes élémentaires de rupture sont caractérisés selon le déplacement relatif des lèvres de la fissure. Il en existe trois modes de fissuration. Le premier mode est le mode d'ouverture ou clivage (mode I), c'est un mode de traction normal au plan de la fissure. Le second mode est le mode de glissement droit (mode II) qui correspond à un mode de cisaillement parallèle au plan de fissure et perpendiculaire au front de fissure. Le dernier mode est le mode de glissement qui correspond à un mode de cisaillement parallèle au plan de fissure et parallèle au front de fissure (mode III).

Les essais expérimentaux relatifs à la propagation ont pour objectif d'identifier le taux de restitution d'énergie [57]. Dans le domaine du collage et des composites les critères énergétiques sont très utilisés [1, 2, 4, 10, 46, 51, 59, 100, 114, 120, 141]. Ces critères énergétiques différents peuvent être couplés avec une approche en contrainte. Dans ce cas, le critère en contrainte représente l'initiation d'une microfissure et le critère énergétique la création d'une macrofissure (propagation) [33, 67, 109]. L'identification de la valeur du taux de restitution peut se faire en fonction du mode de fissuration par différents types d'essais. Pour étudier la rupture en Mode I, on utilise largement l'essai de type DCB (Double Cantilever Beam) et TDCB (Tapered Double Cantilever Beam) [15, 10, 48, 120, 161, 141, 159]. Pour le Mode II, l'essai de type ENF (End Notched Flexure) ou TENF (Tapered End Notched Flexure) est mise en place [10, 15, 162]. L'évaluation des paramètres de mixité entre le mode I et le mode II est principalement effectuée sur dispositif MMB (Mixed Mode Bending). Cet essai est une combinaison d'un essai DCB et d'un essai ENF [50, 140].

Dans les travaux de thèse de Georges Zambelis, les assemblages collés sont testés à l'aide du banc d'essai conçu et réalisé au Laboratoire présenté sur la Figure 2.29. Il nous permet de

réaliser les essais en statique et en fatigue pour différentes configurations d'éprouvette (mode I, sur éprouvette DCB (ou équivalente), mode II, sur éprouvette ENF (ou équivalente)).

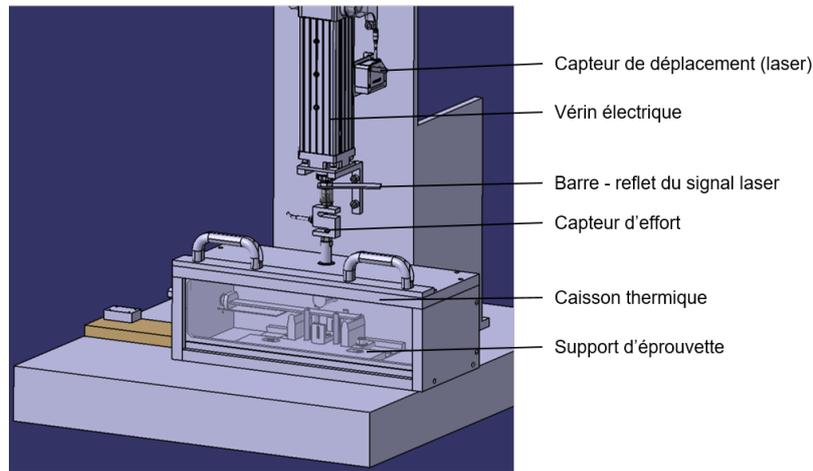


FIGURE 2.29 – Machine d'essai de caractérisation des assemblages collés, conçue et réalisée au laboratoire Quartz de Supméca, dans le cadre de thèse de G. Zambelis [158].

Le banc présenté sur la Fig. 2.29 contient le vérin électrique fixé au bâti par des supports et le maintenant en position verticale. L'effort transmis à l'éprouvette est mesuré par un capteur d'effort placé dans la ligne d'action du vérin grâce à une pièce d'adaptation. Le déplacement de la tige du vérin est mesuré par un capteur laser, qui vise une cible fixée sur la tige du vérin. L'éprouvette est maintenue en position grâce à une base montée sur le marbre.

Lors des essais dynamiques, il est possible de piloter en effort imposé ou en taux de restitution de l'énergie imposée. Le pilotage en effort ou déplacement imposé est le mode de l'essai le plus répandu [10, 15, 48, 120, 141]. Ces pilotages ont des avantages : le pilotage en effort permet de mieux caractériser la courbe de Paris pour des ΔG importants et le pilotage en déplacement, caractérise mieux les ΔG faibles. En revanche, ce type de pilotage ne permet pas de pallier le problème de dépendance éventuelle entre la vitesse de propagation $\frac{da}{dN}$ et sa longueur de fissure (a).

Le caisson combiné avec le générateur de chaleur et d'humidité permet d'assurer l'environnement d'essai particulier (cf. Fig. 2.30).

Dans l'article Zambelis *et al.* [161], nous avons présenté une nouvelle approche de pilotage d'un essai de caractérisation des assemblages collés appliquée à l'éprouvette asymétrique sollicitée en mode I. L'éprouvette de type DCB est testée à l'aide de banc illustré sur la Fig. 2.29. L'essai statique nous permet de caractériser la compliance (décrit dans la section 2.8.2) d'assemblage. Puis des essais en fatigue sont réalisés avec un pilotage en énergie (décrit dans la section 2.8.3).

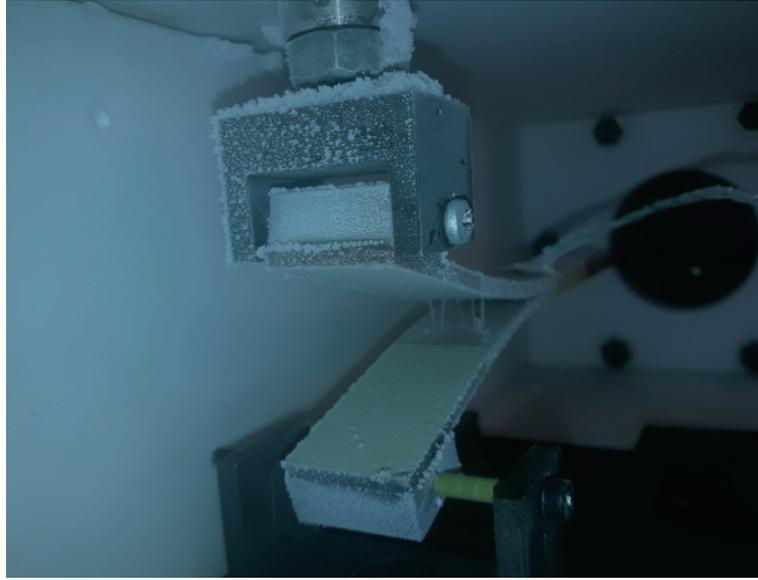


FIGURE 2.30 – Essais DCB à -40°C [158].

2.8.2 Calcul du taux de restitution d'énergie

Il existe plusieurs méthodes pour calculer le taux de restitution d'énergie G au niveau du front de fissure. La Simple Beam Theory (SBT) consiste à calculer G en utilisant la théorie des poutres de Timoshenko, elle suppose que le front de fissure est encastré. La Corrected Beam Theory (CBT) [146] est une méthode semi-empirique car elle prend en compte la souplesse (compliance) de l'éprouvette testée, qui vaut δ/F (déplacement sur l'effort). La compliance Calibration Method (CCM) avec l'équation d'Irwin-Kies (Eq. 2.8 [75]), est une méthode dite énergétique.

$$G_c = \frac{P_c^2}{2b} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (2.8)$$

Avec P_c l'effort à la rupture, C la compliance de l'éprouvette (sa forme est cubique) et b sa largeur. Il est donc nécessaire de connaître la compliance du matériau. Pour le mono-matériau, l'Eq. 2.9 permet de calculer sa compliance (C_I en mode I), qui dépend de a longueur de fissure, h l'épaisseur de substrat, b sa largeur et E son module de Young. L'Eq. 2.9 restera valide jusqu'à ce que la longueur de la fissure résiduelle soit moins importante que l'épaisseur du substrat [75].

$$C_I = \frac{4a^3}{Ebh^3} \left[1 + 1.92 \frac{h}{a} + 1.22 \frac{h^2}{a^2} + 0.39 \frac{h^3}{a^3} \right] \quad (2.9)$$

Dans le cas d'un assemblage collé, la compliance totale, C_T (Eq. 2.10) résulte de la sommation des compliances de deux substrats ($C_{I\text{-m\u00e9tal}}$ et $C_{I\text{-composite}}$).

$$C_T = C_{I\text{-m\u00e9tal}}(E_1, h_1) + C_{I\text{-composite}}(E_2, h_2) \quad (2.10)$$

Le taux de restitution d'énergie peut être calculé par l'Eq. 2.11 pour l'assemblage bi-matériaux.

$$G_I = \frac{3\delta^2 E_1 E_2 h_1^3 h_2^3}{8a^4} \left[\frac{E_1 h_1^3 \Gamma_2^2 + E_2 h_2^3 \Gamma_1^2}{(E_1 h_1^3 \Gamma_2^3 + E_2 h_2^3 \Gamma_1^3)^2} \right] \quad (2.11)$$

avec δ déplacement et $\Gamma_1 = 1 + 0.64 \left(\frac{h_1}{a} \right)$, $\Gamma_2 = 1 + 0.64 \left(\frac{h_2}{a} \right)$ sont des constantes [75, 36].

Cette équation a été vérifiée expérimentalement lors d'un essai statique (Figure 2.31).

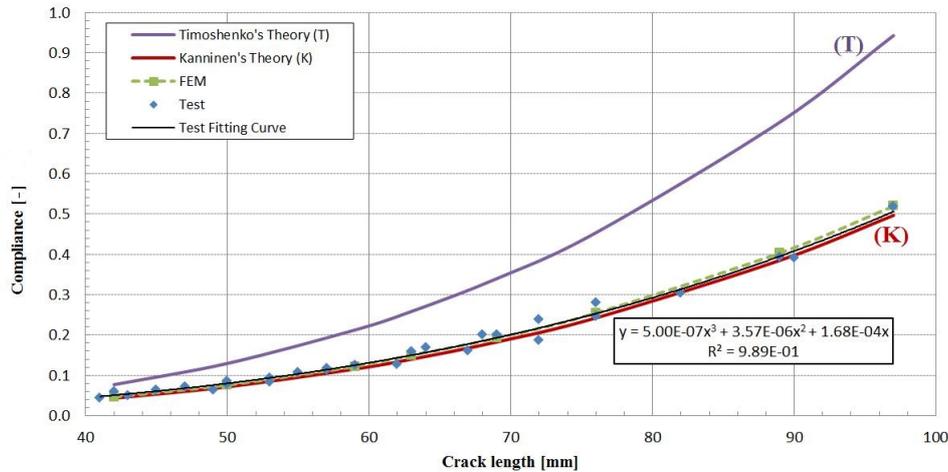


FIGURE 2.31 – Évolution de la compliance normalisée en fonction de la longueur de fissure [161].

La figure 2.31 illustre que le modèle éléments finis [159], le modèle théorique modifié de Kanninen [120] (pour une éprouvette de type DCB en bi-matériaux) et les essais expérimentaux sont en très bonne correspondance, en revanche la théorie de Timoshenko ne convient pas pour ce type d'assemblage. Ainsi l'équation de la compliance, en fonction de la longueur de fissure a est obtenue expérimentalement, elle a une forme polynomiale de l'ordre 3. En résolvant l'équation $C = f(a)$, avec comme inconnue la longueur de fissure a , nous obtenons en temps réel la longueur de fissure. En combinant cette équation avec l'équation 2.8, nous obtenons, pour un effort critique d'amorçage de la fissure donné P_c , le taux de restitution d'énergie critique G_{Ic} .

2.8.3 Nouvelle méthode d'essai en fatigue

Lors de l'essai de fatigue classique (piloté en effort ou en déplacement), le taux de restitution d'énergie G ainsi que la vitesse de propagation $\frac{\partial a}{\partial N}$ dépendent de la longueur de fissure a [159].

Pour réaliser l'approche d'essai en pilotage en G constante, l'équation de la compliance de l'éprouvette DCB testée doit être intégrée dans le programme d'asservissement. Pour ce faire, nous réalisons au préalable les essais de calibration, qui donnent lieu à une réponse linéaire déplacement-effort dont la proportionnalité est la compliance, constante pour une longueur de fissure donnée. Ce sont des essais non destructifs, et arrêtés à un effort donné. En décalant

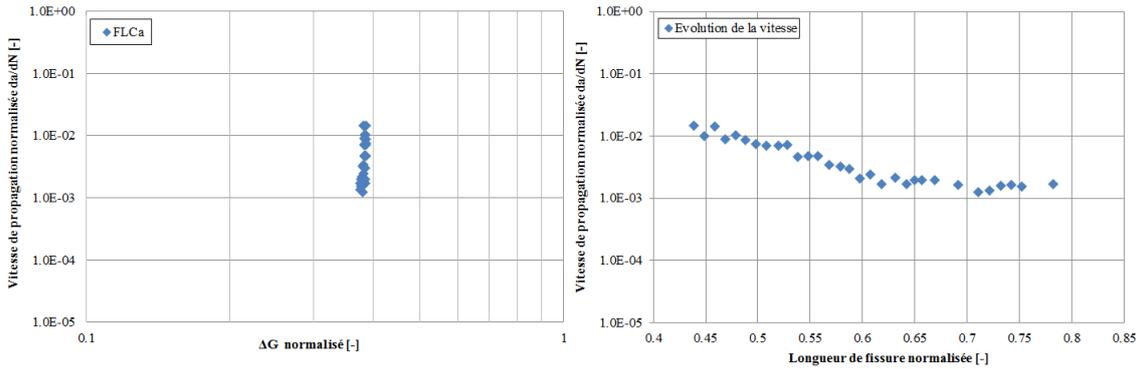


FIGURE 2.32 – Évolution de la vitesse de propagation en fonction de la longueur de fissure [163].

l'éprouvette sur ses supports, on peut tester différentes longueurs de fissure. A partir de ces compliances (C), on effectue une régression pour obtenir la fonction polynômiale d'ordre 3. Avec cette fonction, il sera possible, à tout instant d'un test dynamique, d'évaluer la longueur de fissure en temps réel.

Quel que soit le mode de pilotage, les données acquises au cours de l'essai (effort et déplacement) permettent d'évaluer à tout moment la longueur de défaut et le taux de restitution de l'énergie (Eq. 2.8). Par conséquent, il est possible de construire une loi de Paris (Eq. 2.12).

$$\frac{da}{dN} = K \Delta G^n \quad (2.12)$$

La Fig. 2.32 montre l'évolution de la longueur de fissure en fonction du nombre de cycles, pour un ΔG imposé et constant durant l'essai de fatigue. La conséquence de ce pilotage est la diminution de l'effort maximal au cours de la propagation de la fissure. La vitesse de propagation $\frac{da}{dN}$ est dépendante de la longueur de la fissure jusqu'à un certain seuil, à partir duquel la vitesse devient indépendante de la longueur de fissure. Nous avons ensuite construit des courbes d'une loi de fatigue dépendant de a (longueur de fissure) - FLCa (Fatigue Law Curve depending on a), pour différentes énergies afin d'obtenir un domaine de fatigue (Fig. 2.33).

Sur la Fig. 2.33, il existe des bornes qu'on peut représenter par des droites supérieure (1) et inférieure (2) du domaine. La droite inférieure est unique car les valeurs des vitesses de propagation tendent vers une vitesse constante (voir Fig.2.33 à droite) indépendante de la longueur de fissure. Pour passer de la courbe (1) vers la courbe (2) (voir Fig. 5 à gauche), la longueur du défaut doit augmenter. En utilisant au minimum trois éprouvettes, avec l'essai piloté en ΔG constant, nous avons une bonne estimation du domaine complet de fatigue. En faisant un pilotage en effort ou en déplacement constant, il aurait fallu faire des essais arrêtés puis repris en changeant les charges pour les longueurs de défauts propagés afin d'avoir un ΔG constant. Enfin, nous pouvons construire des abaques qui donnent pour une énergie donnée et une longueur de fissure, la vitesse associée. Pour toutes les longueurs atteignables sur l'éprouvette, et 3 énergies données nous aurons besoin de 3 éprouvettes pour construire cette abaque en pilotage ΔG constant. Par contre, si l'essai est fait en effort ou en déplacement constant, nous ne pourrions construire cette abaque que pour 3 longueurs de fissures (et non toutes) et 3 énergies données, en utilisant 9 éprouvettes (3x3), en optimisant 7 éprouvettes (3x2+1). Il est donc intéressant

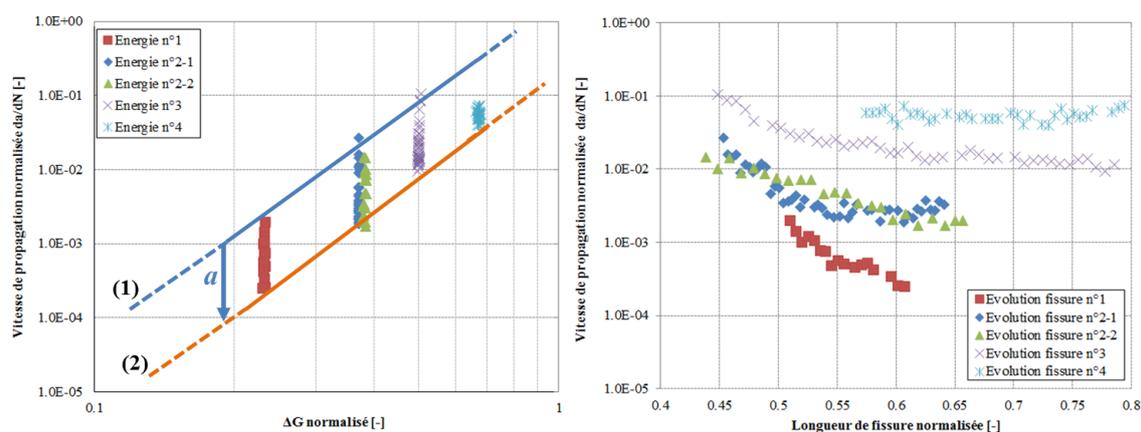


FIGURE 2.33 – Domaines de propagation des FLCa et évolution des vitesses de fissures [163].

même au niveau du nombre d'éprouvettes testées (et fabriquées) d'utiliser un pilotage en énergie constant.

2.9 Régénération des composites

Mots clés : composite, PA6, Pa66, recyclage, injection, procédé, caractérisation
 Financement et cadre : CIFRE (Tunisien) Bulgin (2019-2022, Cotutelle)
 Collaborations : LASEM/ENIS Sfax (R. Elleuch), LASEM/Université de Gafsa (M. Baklouti)
 Encadrements : Thèse I. Ben Amor
 Valorisation : [12]

Le principal objectif de thèse d'Ichrak Ben Amor [23] est le développement d'une stratégie fiable pour la régénération des composites d'un polyamide chargé de fibres de verres courtes pour la fabrication des produits électriques. A chaque moulée du produit industriel, la matière refroidie dans le canal devient un déchet (Fig. 2.34). La récupération du matériau du déchet puis la régénération de composite avec des mélange matière primaire et secondaire (trier, broyer, tamiser et étuver) donne vie aux produits électroniques. De plus, comme le recyclage entraîne des modifications des propriétés de la matière, surtout les propriétés mécaniques, des matériaux recyclés sont étudiés en fonction du taux de la matière (secondaire) recyclée dans le mélange. Les fractographies de faciès de rupture après un essai de traction monotone sont illustrées à titre d'exemple sur la Fig. 2.35 (a-b) pour le PA66 et (c-d) pour le PA6. Nous nous intéressons à l'étude des propriétés mécaniques en statique et fatigue, de la vitesse de cristallisation, de la capacité de l'isolation électrique du produit recyclé et à l'influence du taux de la matière recyclée dans le mélange sur le procédé de l'injection du composite.



FIGURE 2.34 – Matière refroidie dans le canal d'injection, appelée carotte.

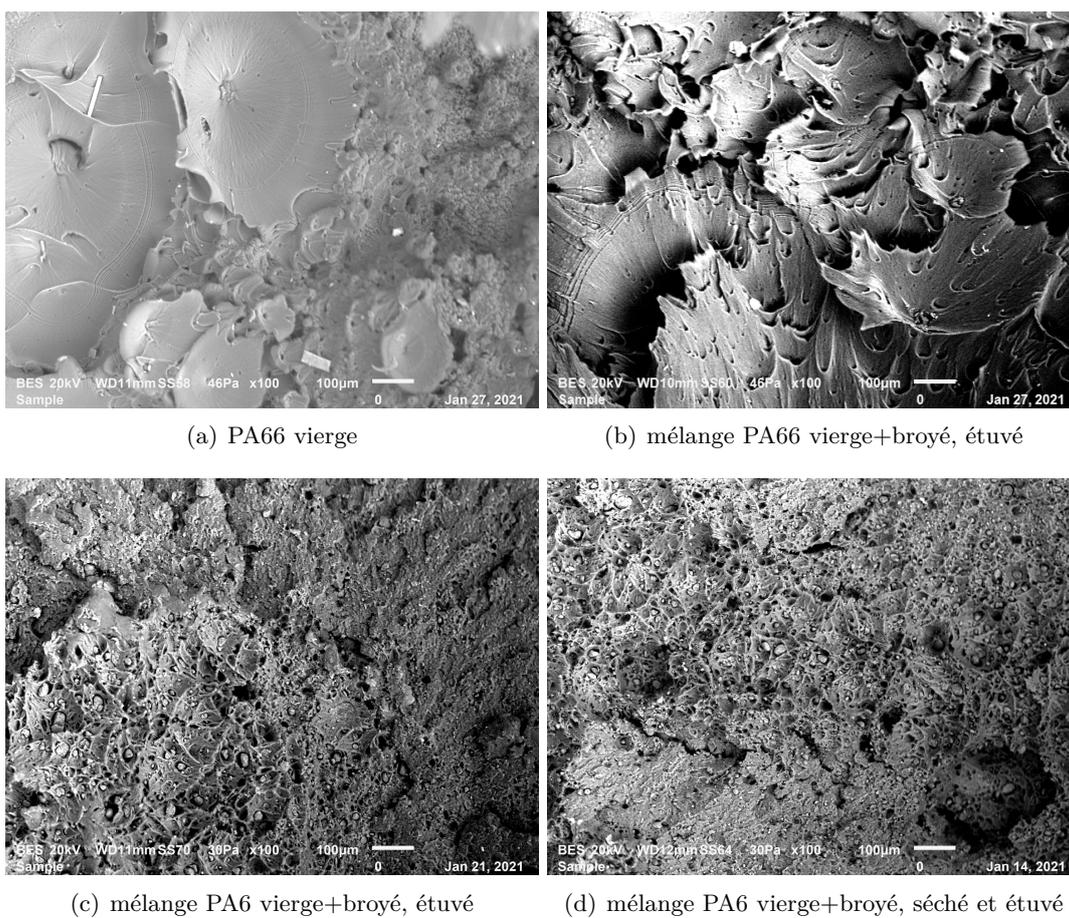


FIGURE 2.35 – Faciès de rupture observées par MEB de PA66 (a-b) et de PA6 (c-d).

Chapitre 3

Projet scientifique

Pour mon projet de recherche je conserverais la triangulation de mes recherches, c'est à dire la modélisation numérique, le calcul analytique et l'expérimentation. Il s'articule autour de trois parties. Une partie concerne la modélisation des assemblages composites et composites biosourcés à matrice organique à différentes échelles et la détection de fissures exigée par les normes de sécurité pour les structures industrielles. Cela est la suite naturelle des projets décrits dans ce manuscrit. La modélisation sera faite en utilisant les modèles volumiques FEM classiques couplés avec du XFEM et des lois des interfaces en prenant en compte la rugosité des surfaces modifiée par les traitements de surface. Ces modèles peuvent être déployés dans des nombreux domaines tels que l'aéronautique, le bâtiment et la construction bioclimatique, les transports et l'énergie renouvelable. Les matériaux sont des composites synthétiques ou naturels sous l'effet des actions mécaniques, thermiques, du rayonnement et de l'humidité. Il s'agit notamment du projet Fatcom et Multibiocomp (sections 3.1.1, 3.1.2).

La deuxième partie est liée à l'instrumentation pour la caractérisation avancée de la durabilité de matériaux composites structuraux et intelligents sous sollicitation environnementale sévère. Ce projet vise à optimiser la fabrication des matériaux composites "intelligents", à matrice organique. Ces matériaux composites structuraux sont des matériaux avec des éléments actifs, permettant de modifier les propriétés et/ou la forme de la structure de façons significative par les moyens de stimulation externe, telle qu'une contrainte, une température, un rayonnement UV, un PH, une humidité, un champ électrique ou magnétique. L'utilisation des matériaux composites fiables constitue un des verrous majeurs pour de nombreux secteurs industriels, en particulier ceux à haute valeur ajoutée. Les solutions que nous envisageons concerne notamment le secteur de l'aéronautique, du maritime, du ferroviaire, de l'automobile, de l'éolien, et plus généralement le secteur de la mécanique, où les besoins industriels sont nombreux et à fort potentiel de développement sur le long terme. Il s'agit du projet SHMonit (section 3.2) et SMARTComp (section 3.2.2).

La dernière partie concerne les compétences de l'équipe de TriboMat, en particulière en terme de frottement et usure. Le projet vise à prendre en compte le taux de texturation de surface des composites sur l'usure et le comportement tribologique. La répartition spatiale de fibres dans la surface de contact sera évaluée pour des conditions de fretting particulières. La méthodologie d'analyse prend en compte le traitement d'image sous Matlab obtenu par des

méthodes microscopiques avant et après les essais de fretting. Il s'agit de projet FrottCompUs (section 3.3).

3.1 Axe modélisation multi-échelles de l'assemblage multi-matériaux

3.1.1 FATCOM : Modélisation du comportement en fatigue d'assemblages collés multi-matériaux

Il existe très peu d'études, sur les assemblages asymétriques multi-matériaux (en particulier métal-composite) soumis à des chargements en mode mixte (I+II) à des températures différentes de la température ambiante. Chaque aspect est souvent traité séparément (chargements en fatigue [1-2], assemblages asymétriques [3-4], assemblages multi-matériaux [5]), afin de réduire les difficultés d'analyses. Or ceux-ci sont extrêmement liés et interagissent entre eux : l'asymétrie de l'assemblage modifie la répartition des contraintes au sein de la structure et donc les efforts/moments subis par le joint de colle, le comportement de ce dernier à températures différentes. Dans le cas de sollicitations en mode mixte, les modèles proposés dans la littérature ont certaines difficultés pour suivre l'évolution du taux de restitution d'énergie critique en fonction du ratio mode II/(mode I + mode II) [6]. Dans le cas où ils arrivent à suivre cette évolution, la loi devient complexe avec des nombreux paramètres. Ceci s'explique par le fait que ces modèles sont avant tout empiriques/phénoménologiques et ne cherchent pas à retranscrire la physique de ce qui se passe dans l'assemblage. Ainsi, il a pu être mis en évidence dans la littérature qu'un comportement de l'assemblage peut être très hétérogène et non linéaire. Il existe un gradient de propriétés élastiques dans l'épaisseur du joint [7] et des micro-vides dans le joint de colle [8]. D'un point de vue numérique, les modèles sont essentiellement empiriques et basés sur les observations macroscopiques. De plus, ils servent très souvent de complément aux études expérimentales et n'ont pas pour vocation à être un outil prédictif de la tenue des assemblages. Dans ce contexte, les modèles de zone cohésive sont très utilisés et le film de colle est assimilé à une interface sans épaisseur explicitement définie (par une partition géométrique) dont le comportement se limite à une loi de type traction-séparation. Avec ce type de modélisation, le maillage doit être conforme au plan de joint et le modèle est sensible à la discrétisation au voisinage de ce plan. Dans le cas des frontières courbes, la modélisation devient très délicate à mettre en oeuvre. Pour décrire les mécanismes d'endommagement du joint de colle, les méthodes se basent soit sur l'état de contraintes et de déformations [9], soit sur la mécanique linéaire de la rupture [10] via des concepts comme le facteur d'intensité de contraintes et le taux de restitution de l'énergie. Les méthodes basées sur l'état de contraintes et de déformations sont plutôt adaptées aux problèmes quasi-statiques et sont plutôt dédiées à l'étude de l'amorçage (ou début de la propagation) et non pas à l'étude de la vitesse de propagation d'un défaut. Elles reposent sur le facteur d'intensité des contraintes et ne permettent pas de rendre compte du mécanisme à l'origine de la délamination. On trouve seulement deux modèles de propagation basés sur ce type d'approche [11-12]. Les méthodes basées sur la mécanique de la rupture relient la vitesse de propagation d'une fissure directement au taux de restitution de l'énergie et au facteur d'intensité de contraintes (les 2 paramètres sont équivalents). Les problèmes principaux de ce type d'approches sont d'une part la difficulté de calculer ces grandeurs pour des matériaux non homogènes (comme les stratifiés) et d'autre part qu'ils supposent comme nous l'avons dit plus haut un comportement élastique linéaire de l'assemblage. Pascoe et *al.* [13] proposent une revue de 40

ans de bibliographie sur les méthodes de prédiction du comportement en fatigue des composites et joints collés. Les auteurs mettent en évidence le besoin d'une modélisation plus centrée sur la physique du problème et en particulier basée sur les mécanismes d'endommagement concernant le délaminage. Pour atteindre nos objectifs, nous souhaitons mettre en place un modèle basé sur les lois cohésives dans le cadre de la méthode des éléments finis étendus [14]. La loi cohésive plus physique sera mise en place permettant de rendre compte des mécanismes d'endommagement et de rupture du joint de colle dans le cas de chargements cycliques complexes (couplage Mode I et Mode II) avec prise en compte de la dépendance vis-à-vis de la température et de l'hygrométrie. L'idée est notamment de réaliser un couplage thermo-mécanique fort en s'inspirant des modèles que l'on retrouve habituellement pour les matériaux et en les transposant aux cas des modèles cohésifs. Ainsi, les variables d'états liées à la température ou à l'endommagement apparaîtront explicitement dans la loi cohésive.

CRETE Jean-Philippe	MCF	jean-philippe.crete@isae-supmeca.fr
DA SILVA Tony	Pr	tony.dasilva@isae-supmeca.fr
KLINKOVA Olga	MCF	olga.klinkova@isae-supmeca.fr

TABLE 3.1 – Partenaires du projet FATCOM, tous membres du Laboratoire QUARTZ EA7393

Une demande d'ANR est faite pour une durée de 42 mois et un budget de 170k€.

Bibliographie non exhaustive

1. Fernandez et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.08.009>)
2. Datla et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.11.007>)
3. Alvarez et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.04.032>)
4. Choupani (<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2007.08.002>)
5. Arouche (<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113109>)
6. Floros et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.04.006>)
7. Geiss et Presser (<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.458>)
8. Pirondi et Nicoletto ([https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(01\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(01)00042-2))
9. Gleich D. Stress analysis of structural bonded joints. Phd thesis, TU Delft ; 2002
10. Fernandez et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.10.003>)
11. Ratwani et Kan (<https://doi.org/10.2514/3.57512>)
12. Poursartip et Chinatambi (<https://doi.org/10.1520/STP10408S>)
13. Pascoe et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.10.003>)
14. Wolf et *al.* (<https://doi.org/10.1007/s10999-017-9370-9>)

3.1.2 MultiBIOCOMP : Modélisation multi-échelle des assemblages collés intégrant des bio-composites.

Ce projet intègre les enjeux sociétaux contemporains de durabilité, recyclabilité et éco-conception à travers le thème "bio-composites". Depuis quelques années plusieurs projets sur

les matériaux bio-composites ont été financés par l'Europe, par exemple : SSUCHY visant le développement des composites multifonctionnels (absorption vibro/acoustique, tenue mécanique) ; FLOWER développant des renforts en fibre de lin produits localement pour l'industrie des composites ; BTONLIN qui a développé des éléments préfabriqués à base de béton structurant biosourcé. L'intérêt de ces matériaux biosourcés est valorisé par les enjeux climatiques visant la décarbonation, soutenus par l'Accord de Paris et le Pacte vert européen afin d'atteindre la neutralité climatique d'ici à 2050. Dans ce contexte, les assemblages collés de composites biosourcés deviendront incontournables grâce à leurs propriétés de recyclabilité, durabilité et légèreté pour les secteurs des transports (aviations plus propres, transport routier sans émission) et de l'environnement bâti et construction (optimisation de la performance énergétique des bâtiments). L'idée de ce projet est de comprendre le comportement mécanique des assemblages bio-composites/métal collés sous différents types de chargements. La tenue mécanique des assemblages collés dépend des phénomènes d'endommagement dont l'étude est complexifiée par l'hétérogénéité du matériau naturel par rapport aux fibres synthétiques qui sont plus régulières et calibrées. Ces verrous scientifiques sont actuellement à lever. L'état de l'art présente un certain nombre d'études expérimentales qui se focalisent sur le comportement mécanique de fibres naturelles et du matériau bio-composite et quelques études qui s'intéressent aux interfaces micro et méso-échelle. Les inconvénients d'une approche purement expérimentale sont principalement le coût et l'investigation d'un phénomène. Les phénomènes liés à la tenue mécanique de ces assemblages collés sont multi-échelles et couplés, une approche de modélisation est donc primordiale. L'objectif principal est de proposer un nouvel outil de modélisation capable de décrire et de prédire l'initiation et l'évolution de l'endommagement dans un assemblage structurel collé intégrant des matériaux bio-composites. De nombreux effets micromécaniques différents sont connus pour influencer le comportement des assemblages collés, notamment la qualité des surfaces adhésives et la présence de défauts, tels que les pores et les microfissures, qui affectent de façon cruciale la résistance d'adhésion de l'assemblage. Du point de vue expérimental, grâce à des traitements de surface, la rugosité des adhérents peut être ajustée pour améliorer la performance du collage. Sur le plan théorique, des modèles de loi d'interface imparfaite ont été proposés pour prendre en compte la présence de microfissures, la rugosité de surface et la non-linéarité géométrique [1]. Ils décrivent le comportement mécanique de deux surfaces rugueuses en contact sans glissement sous une pression de fermeture [2]. Le développement d'une approche de modélisation multi-échelle (de la micro à la macro échelle) intégrera deux niveaux d'endommagement : un endommagement cohésif [3] - endommagement volumique classique qui peut apparaître à la fois au niveau des adhérents et de l'adhésif et un endommagement adhésif - localisé aux interfaces du contact. Les deux approches sont aptes à décrire l'endommagement adhésifs entre la surface rugueuse des adhérents et l'adhésif dans deux situations distinctes : (i) une configuration idéale dans laquelle les surfaces rugueuses en contact sont parfaitement collées [1] et (ii) une configuration réaliste dans laquelle la zone de contact est non homogène et contient des vides qui évoluent en fonction de la pression de contact [2].

L'approche proposée combinera la modélisation analytique et numérique : les phénomènes d'endommagement microscopiques sont décrits par des modèles analytiques incluant l'homogénéisation micromécanique et asymptotique, la mécanique de contact (endommagement adhésif) et la mécanique de l'endommagement (endommagement cohésif). Ces modèles analytiques seront inclus dans un contexte d'homogénéisation numérique basé sur la méthode des éléments finis (EF) [4-6]. L'objectif final est d'obtenir une loi de type traction-séparation (TS) équivalente pour une interface macroscopique qui tiendra compte des effets microscopiques de la rugosité et de l'interaction entre la rupture adhésive et la rupture cohésive des matériaux au voisinage

de l'interface. Cette loi TS a vocation à pouvoir être facilement mise en oeuvre dans tous les logiciels commerciaux de calcul par EF. Cette loi macroscopique de collage sera ensuite intégrée dans des simulations par EF des assemblages en Mode I, II, ou mixte (au sens de la mécanique de la rupture). Les résultats de telles simulations seront directement comparés aux résultats expérimentaux obtenus afin d'opérer la validation de la méthode proposée. Le modèle sera validé sur un cas test d'un assemblage de lin/epoxy en mode I et II [7-DOI AJJA2021]. Les résultats expérimentaux seront utilisés à la fois pour l'identification des paramètres des modèles et pour leur validation.

Le projet sera réalisé en collaboration avec UNIFE (Università degli Studi di Ferrara), Italie.

RIZZONI Raffaella	MCF, UNIFE	raffaella.rizzoni@unife.it
TAWFIQ Imad	Pr, QUARTZ	imad.tawfiq@isae-supmeca.fr
RAFFA Maria-Letizia	MCF, QUARTZ	maria-letizia.raffa@isae-supmeca.fr
KLINKOVA Olga	MCF, QUARTZ	olga.klinkova@isae-supmeca.fr

TABLE 3.2 – Partenaires du projet MultiBIOCOMP, UNIFE/QUARTZ

Une demande de financement pour le projet est faite via le programme Vinci (chapitre III) de l'Université Franco-Italienne pour le budget de 76k€.

Bibliographie non exhaustive

1. Dumont et *al.* (<https://doi.org/10.1007/s12356-017-0047-8>)
2. Raffa et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.01.025>)
3. J. Lemaitre et J.-L. Chaboche, ISBN 210051623X, 1994
4. Hirsch et *al.* (<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.02.026>)
5. Rizzoni et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2020.104108>)
6. Dumont et *al.* (https://doi.org/10.1007/978-3-030-50464-9_18)
7. Bechikh et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102653>)

3.2 Axe d'instrumentation et caractérisations avancées

3.2.1 SHMonit : Monitorat des procédés et de durée de vie et de l'intégrité

Le processus de la surveillance de la santé structurelle (Structural Health Monitoring (SHM)), adopté au suivi des procédés de mise en oeuvre et de surveillance des pièces composites, sera proposé avec des modèles permettant la mise à jour périodique des informations concernant la capacité de la structure à remplir ses fonctionnalités initiales malgré le vieillissement et la dégradation qui sont causés par des conditions d'environnement ou des sollicitations sévères de services. Par conséquent, le SHM peut être utilisé dans le cas proposé pour le dépistage rapide des informations fiables sur le procédé de fabrication et l'état d'intégrité de la structure composite quasiment en temps réel. La caractérisation et le suivi de l'endommagement des structures

à base de matériaux composites peuvent encore se faire par des capteurs ou des réseaux de capteurs/actionneurs (système mécatronique). Un produit de mesure/contrôle basé sur un couplage de différentes technologies permettrait des mesures multi-échelles (macro : forme, micro : défauts de forme, rugosité) avec une plate-forme de mesure unique [12]. La maîtrise et le suivi des paramètres de procédé peuvent conduire à fabriquer des pièces composites de qualité, avec un taux de dommages initiaux maîtrisés. L'endommagement est défini comme un changement des propriétés du matériau et de la géométrie de la structure composite, qui nuisent à la performance de la structure composite. Le processus de SHM consiste en l'observation du système au fil du temps en utilisant les mesures dynamiques d'un réseau de capteurs, l'extraction des ces mesures des caractéristiques d'endommagement et l'analyse statistique de ces caractéristiques sont utilisées pour déterminer l'état de la santé de la structure. En fonction de procédé choisi, la surveillance particulière doit être mise en place. Dans le cas du moulage des préimprégnés on ne s'intéresse pas dans la même mesure aux défauts liés à l'imprégnation que dans le cas de l'infusion. Les **défauts** les plus fréquents de l'étape d'imprégnation sont les **porosités**. La porosité peut se retrouver à l'échelle microscopique sous la forme de zones d'air microscopiques (microporosité) et à l'échelle macroscopique sous la forme de poches d'air (macroporosité). Les mécanismes qui dirigent l'apparition de ces défauts sont divers : l'avancement du front de résine à l'intérieur de la préforme ; une mauvaise conception du système d'injection ; le dégazage de la résine ; un mauvais niveau de vide à l'intérieur du moule (fuites ou mauvais réglage des pompes à vide).

L'objectif est de développer trois grands axes de recherche pour la mise en oeuvre des composites bio-sourcés. Le premier et le deuxième thème sont partiellement liés : il s'agit respectivement d'étudier la durabilité et la stabilité dimensionnelle des pièces composites bio-sourcés ainsi qu'établir le lien propriétés/procédé [1-2]. Le troisième volet de ce programme de recherche est indépendant des autres. Il porte sur le monitorat en temps réel des procédés et des comportements de la structure composite par des capteurs innovants, autrement dit, l'utilisation des systèmes mécatroniques pour les structures composites et pour le suivi des procédés. L'idée est d'optimiser l'injection ou l'infusion de la résine liquide (Liquide Resine Infusion (LRI)) à travers des préformes fibreuses naturelles (lin, bambou, chanvre...) pour la production des pièces composites multifonctionnelles dont la géométrie ou la constitution sont défavorables à l'écoulement : pièces présentant des épaisseurs variables ou encore pièces incorporant des préformes de propriétés physiques différentes. Les solutions proposées pourront être adaptées à l'éolien, au ferroviaire, à l'automobile et au génie civil. Ce projet prend appui sur trois éléments essentiels conduisant globalement à un saut technologique dans le domaine des techniques de mise en oeuvre. Dans le cas de LRI, le suivi commence même avant le procédé d'injection. La **déformabilité** d'un renfort doit être surveillée afin d'assurer la capacité des préformes d'épouser une géométrie donnée du moule. Elle est influencée par le type de préforme choisi et son orientation. La **drapabilité** d'un tissu doit être quantifiée afin de caractériser le moulage de la préforme et l'angle de blocage, faisant apparaître des plissements. On fait appel à des essais de cisaillement pour déterminer la valeur de l'angle de blocage d'un tissu à caractériser, ce qui permet également d'identifier les zones critiques au niveau de l'outillage (re-conception du moule). Une autre propriété à surveiller est la **perméabilité** de la préforme [3-4]. La perméabilité est définie comme l'aisance avec laquelle la résine peut mouiller les fibres et avancer dans la préforme. Le principe de mesure de la perméabilité consiste à imposer un gradient de pression constant et à mesurer le débit de fluide ou bien à imposer un débit du fluide test et à mesurer la variation de la pression dans le dispositif d'essai. La résine injectée (à débit constant) avance et rencontre des capteurs de pression disposés le long de la direction d'avance du front.

Le gradient de pression diminue avec l'avancement du front ainsi que la vitesse d'avancement du front. Cela nous permet de déterminer la différence de pression entre 2 capteurs de pression successifs. Une interaction écoulement/déformabilité peut se déterminer et peut être utilisée comme indicateur pour le procédé LRI. Le contrôle du **remplissage** du moule est nécessaire et basé sur la mesure de température ou de pression [5-7, 9]. Ces techniques nécessitent habituellement le positionnement des capteurs à l'intérieur de la pièce. Des capteurs à fibre optique ou le réseaux de Bragg basés sur l'effet de Fresnel peuvent être utilisés afin de détecter le front de résine, la température et les déformations résiduelles [8-9]. Le suivi de la **polymérisation** de la pièce est une étape essentielle, les principaux défauts liés à la polymérisation sont ceux déterminés par le retrait de la résine (manque de cohésion entre les couches, micro ou macro fissures). Le cycle de polymérisation peut être optimisé. On emploie habituellement des mesures de l'impédance diélectrique de la résine relevée pendant le cycle de cuisson par l'intermédiaire de la Calorimétrie Différentielle à Balayage. Pour résumer, je propose d'utiliser de nombreuses techniques destructives, semi destructives ou non destructives permettant la détection de l'état de la structure et sa caractérisation. Enfin, pour mieux maîtriser et suivre le procédé de fabrication, nous pouvons nous inspirer de l'approche générative de processus de fabrication avec des concepts relatifs aux systèmes issus de l'Intelligence Artificielle [10] en couplant avec des modèles ontologiques dédiés à ce domaine, permettant de voir l'ensemble des liens potentiels des causes à effets (moyens de fabrication, paramètres des procédés, natures des composants, choix d'instrumentations, suivi et contrôle, ...). Un des moyens possibles sera d'utiliser les modèles MBSE, le réseau Bayésien [11], la méthode de causalité de probabilité, les arbres probabilistes. Où on peut combiner à la fois les données historiques et les connaissances expertes en créant le lien entre différents paramètres, avec les liens caractérisés plus ou moins importants selon la probabilité qui les relie.

PLATEAUX Régis	MCF	regis.plateaux@isae-supmeca.fr
PENAS Olivia	IR HDR	olivia.penas@isae-supmeca.fr
DIALLO Thierno	MCF	thierno.diallo@isae-supmeca.fr
KLINKOVA Olga	MCF	olga.klinkova@isae-supmeca.fr

TABLE 3.3 – Partenaires du projet SHMonit, Laboratoire QUARTZ EA7393

Le montage du projet est en cours et différents schémas de financement sont en construction.

Bibliographie non exhaustive

1. Baley et *al.* 2018 (<https://doi.org/10.1007/s12289-018-1455-y>)
2. Liotier et *al.* 2019 (<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.103>)
3. Geoffre et *al.* 2020 (<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103349>)
4. Liu et *al.* 2016 (<https://doi.org/10.1016/j.crme.2016.02.004>)
5. Bouquerel et *al.* 2017 (<https://doi.org/10.1063/1.5007995>)
6. Andriamananjara et *al.* 2017 (<https://doi.org/10.1063/1.5007998>)
7. Bouquerel et *al.* 2021 (<https://doi.org/10.3389/fmats.2020.571779>)
8. Wang 2009 (<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.09.007>)

9. Waris et *al.* (<https://doi.org/10.1177/0021998313501532>)
10. Mihaluta 2011 (<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00635873>)
11. Diallo et *al.* 2018 (<https://doi.org/10.1142/S0219622018500025>)
12. Collombet et *al.* 2020 (<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107635>)

3.2.2 SMARTComp : Durabilité des composites intelligents

Un des défis majeurs est de maîtriser la fabrication et la fiabilité de matériaux intelligents qui embarquent par exemple des capteurs et des actionneurs. L'utilisation de ces composites représente une avancée majeure pour la plupart des secteurs industriels. Les matériaux composites que nous envisageons sont des structures complexes composées de pièces multifonctionnelles dont la géométrie ou la constitution sont connues pour être difficiles à réaliser en une seule étape : elles peuvent être localement massives et à fort rayon de courbure, ou encore présenter des épaisseurs rapidement variables, ou enfin incorporer des préformes de propriétés physiques différentes. Un important challenge de fabrication de ces matériaux réside dans la faisabilité d'incorporation des capteurs sans les endommager et sans introduire d'endommagement dans le matériau hôte. Par exemple, les matériaux piézoélectriques sont souvent placés sur la peau de la structure [1-3], en non pas au coeur du matériau. Un autre challenge réside dans la modélisation des propriétés structurelles des composites, notamment du point de vue des facteurs environnementaux. La température est le facteur environnemental le plus important qui affecte le comportement des composites. D'abord parce que le composite à matrice organique est très sensible à la variation de température et il a un coefficient de dilatation thermique faible. Cette combinaison de deux propriétés nous impose une surveillance particulière des structures composites envers la variation thermique, en sachant que la fabrication des composites impose un cycle de cuisson incontournable plus ou moins élevé selon la nature du liant. Puis, si on intègre des plis de différentes natures (pli métallique pour la conductivité électrique, matériau piézoélectrique, circuit électronique déposé...) dans la structure composite cela engendre la concentration des contraintes résiduelles lors de la fabrication, qui sont dues à la différence des propriétés thermiques et chimiques des constituants [4-6]. Ce projet a pour objectif de mettre en place une stratégie fiable du choix d'instrumentation, de son positionnement en fonction du procédé de mise en oeuvre, de la nature du composite, de la géométrie, et la réponse du composite actif en observant le système au fil du temps utilisant les mesures dynamiques d'un réseau de capteurs, l'extraction des caractéristiques d'endommagement à partir de ces mesures pour déterminer l'état de santé actuel de la structure [7-8]. Cet outil devra notamment aider à l'identification de l'impact des singularités sur la tenue du matériau en service afin d'allonger sa durée de vie.

Les différents schémas de financement sont en cours de construction.

Bibliographie non exhaustive

1. Gohari et *al.* 2016 (<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.047>)
2. Suresh Kumar and M. C. Ray 2013 (<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.03.010>)
3. Tang and Felicelli 2015 (<https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2015.05.010>)
4. Payandeh et *al.* 2009 (<https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.04.019>)

5. Payandeh et al. 2010 (<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.048>)
6. Collombet et al. 2020 (<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107635>)
7. Sahadevan PhD thesis, Supmeca, Lismma, 2006

3.3 Axe transversal : FrottCompUs : Étude du comportement tribologique et de l'usure de composites.

La caractérisation du comportement tribologique des matériaux composites à renfort fibreux nous permet de prédire leurs performances en termes d'usure et de caractéristiques de la surface frottante. L'usure dépend de l'anisotropie du matériau et elle est influencée par le type et la nature des fibres [1-5], la nature de la matrice, de l'interface fibre-matrice et de l'orientation des fibres [6-8] par rapport au sens de sollicitation. Le mode d'endommagement quant à lui, est influencé par la structure microscopique du matériau et donc encore une fois, il est fortement lié à l'orientation des fibres. Des recherches ont été déjà menées dans ce sens pour établir la relation entre l'orientation des fibres, leurs propriétés mécaniques (modules, dureté) et la résistance à l'usure par rapport au plan du contact et la direction de frottement (orientation parallèle P, antiparallèle AP et normale N) [3, 5, 9-11]. Toutes ces études ont été menées sur les fibres orientées UD, des tissus ou des polymères chargés des particules de différentes natures. Certains auteurs ont établis la relation entre les mécanismes d'endommagement et de l'usure de composite, la morphologie de la surface et la sollicitation. Par exemple l'usure est faible si les fibres ont une orientation normale par rapport au chargement. Car la décohésion est amorcée à la surface du contact, cela est dû à l'atténuation de la composante de la contrainte de tension. La déformation des fibres orientées perpendiculairement est gênée par la présence des fibres voisines. Quant aux orientations P et AP, l'amorçage de fissures peut se produire à la surface comme à l'interface fibre-matrice à une courte distance de la surface où la composante de contrainte de tension est maximale. Une fois amorcées, les fissures se propagent sous l'action d'un chargement cyclique qui provoque une croissance de décohésion et séparation des fibres [12]. L'orientation AP des fibres peut être favorable à la diminution du taux d'usure, grâce notamment au rôle qu'elle peut jouer pour la création du troisième corps composé de débris de fibres et de matrice à l'interface des deux antagonistes [13]. Les débris peuvent être piégés dans les zones entre deux fibres adjacentes en formant ainsi un lit de débris qui protège les surfaces contre l'usure. Ce qui est fortement influencé par la morphologie de la surface et la nature des composites encore une fois. La présence de l'humidité [8, 14] ou d'autres composants environnementaux comme les UV ou l'irradiation [4] peuvent modifier le comportement tribologique dans les deux sens. Soit en diminuant le taux d'usure et le COF, ou en contribuant au dommage dû aux sollicitations mécaniques. Mais ces observations dépendent fortement des matériaux frottants et des conditions environnementales associées. Très peu d'études ont été menées sur les composites texturés comme Hextool [15-17]. Ce matériau à fibres de carbone courtes combiné à une matrice BMI a une capacité d'usinage remarquable, de par sa morphologie, avec la rugosité de surface dans les meilleurs des cas de l'ordre de $0,7\mu m$. Sa matrice polymérique est améliorée chimiquement pour la tenue en température plus élevée que la base époxy. Cela fait un matériau idéal pour les moules composites en remplacement des moules métalliques. L'idée de ce projet est de contribuer à la compréhension des mécanismes d'endommagement des composites texturés en prenant en compte la présence d'humidité, les conditions tribologiques (température, chargements, déplacements) sur l'usure. Une méthodologie de suivi de cet endommagement sera

développée en se basant sur le protocole d'essais particulier, qui combinera les différents moyens du laboratoire Quartz. Tels que la surfométrie (Surfoscan), l'analyse microscopique (MEB et MO) et les essais de fretting en corrélant par le traitement d'image ces différents paramètres tribologiques (surface usée, COF, taux d'usure et etc.) à la morphologie du matériau. Cette approche multi-échelles nous permettra de mieux comprendre la dépendance de l'orientation très locale de fibres sur le comportement tribologique macroscopique.

DA SILVA BOTELHO Tony	Pr, QUARTZ	tony.dasilva@isae-supmeca.fr
FORTES DA CRUZ Julien	MCF, QUARTZ	julien.fortesdacruz@isae-supmeca.fr
KLINKOVA Olga	MCF, QUARTZ	olga.klinkova@isae-supmeca.fr

TABLE 3.4 – Partenaires du projet FrottCompUs, Laboratoire QUARTZ EA7393

Le montage du projet est en cours et les différents schémas de financement sont envisagés.

Bibliographie non exhaustive

1. Zhao et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.019>)
2. Bijwe et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2006.08.005>)
3. Natrayan and Merneedi (<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.108>)
4. Lv et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.06.004>)
5. Patil et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.054>)
6. He et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106935>)
7. Bijwe et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2006.08.005>)
8. Shim et *al.* *Wear*, 157 : 141-149, 1992
9. Venkategowda et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.401>)
10. Tellez-Villasenor et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203667>)
11. Zhang et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114057>)
12. Turki, Méthodologie d'analyse du comportement sous faibles débattements de contacts composite-métal : application au cas d'unidirectionnels verre-epoxy. PhD thesis, 1996
13. Chang et *al.* *Wear*, 85(1) : 8191, 1983.
14. Chegiani et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203858>)
15. Terekhina et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.11.014>)
16. Klinkova et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.09.006>)
17. Chardon et *al.* (<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.09.002>)

Conclusions et perspectives

Au travers des travaux présentés dans ce manuscrit, j'ai voulu insister sur le fil conducteur qui a guidé ma recherche sur la prédiction de la durée de vie de structures hybrides contenant un endommagement (nature hétérogène, cavités...). La prédiction d'endommagement passe par la caractérisation adéquate couplée aux calculs analytiques et numériques. Ma contribution se situe en interface entre la mécanique de la rupture et la mécanique d'endommagement des composites et structures hybrides collées. Je m'intéresse plus particulièrement à une approche expérimentale ainsi qu'analytique afin de déterminer les paramètres qui interviennent dans le modèle numérique. Ma recherche au laboratoire s'articule autour de l'endommagement à l'échelle méso et macroscopique.

Pendant ces 8 années au laboratoire, nous avons analysé la propagation de dommages dans une structure hybride métal/composite assemblée par collage structural. Nous avons choisi une approche énergétique, pour une sollicitation en mode *I* et *II*. Les éprouvettes de type DCB (Double Cantilever Beam) et ENF (End Notched Flexure) représentatives de la structure hybride, nous ont permis de construire la R-Curve (évolution de G en fonction de la longueur de fissure, a) et d'étudier la cinétique de propagation de fissure sous sollicitations dynamiques. Nous avons conçu un banc d'essais performant en accord avec des exigences industrielles, afin de réaliser les essais quasi-statiques et dynamiques et sous conditions environnementales. Nous avons mis en évidence le pilotage des essais dynamiques à ΔG imposé, ce qui permet de s'affranchir de la dépendance du taux de restitution d'énergie à la longueur du dommage. Les résultats obtenus mettent en évidence la dépendance de la vitesse de propagation (da/dN) à la longueur de fissure et permettent d'évaluer de façon plus complète le domaine de propagation d'un dommage sur la structure. Cette approche peut être transposée sur un autre type de l'éprouvette (ELS pour le mode II à R négatif par exemple). Nous pouvons également évaluer l'influence de chargement en ajoutant l'approche probabiliste.

Nous avons pu consolider les connaissances de la caractérisation et de la modélisation de la durabilité des assemblages collés. Nous avons réparé des composites à matrice élastomère par collage des patches internes en utilisant deux procédés de collage (polymérisation à froid et vulcanisation à chaud). Ce qui nous a permis d'identifier le procédé et l'indicateur d'efficacité du joint. Les calculs de performance des réparations en traction nous ont permis de proposer les modèles analytique et numérique afin d'évaluer les contraintes. Nous avons proposé un outil d'aide à l'optimisation et à la conception des joints de réparation, en tenant compte des paramètres hygro-thermo-mécaniques et géométriques. En particulier, cet outil nous permet de caractériser la loi de transfert hygro-thermique, la loi de vieillissement du matériau, d'évaluer la durée de vie du matériau composite, d'identifier des paramètres de la loi de vieillissement et d'analyser des variabilités des paramètres et des performances. Nous pouvons enrichir les

modèles développés en les adoptant aux matériaux de la nature différente en tenant compte de la multi-physique et du couplage approprié.

Nous avons mis en évidence l'importance du traitement spécifique de surface des matériaux avant le collage sur la tenue des assemblages. Nous avons mis en place une stratégie d'analyse spécifique en caractérisant l'état de surface des substrats, la mouillabilité, l'énergie libre de surface et la tenue du collage. Une étude sur l'impact des différents traitements de surface a été réalisée dans le but d'identifier le traitement adéquat pour chaque matériau. L'adhérence des assemblages (Acier/Acier, composite/composite, acier/composite) après différents traitements a été évaluée, en comparant la tenue au cisaillement. La modélisation micro géométrique de l'assemblage pourrait être fait dans la suite de ces travaux en prenant en compte la rugosité lié au choix du matériau et du traitement de la surface.

Nous avons une base de données expérimentales riches pour des matériaux composites organiques ainsi que pour les composites bio-sourcés. Les modèles développés ainsi que le méthodes de caractérisations sont utilisés pour comprendre les phénomènes physiques responsables de l'endommagement et de la propagation de fissures dans les assemblages en permettant de prédire la durée de vie, mais aussi ouvre également de nouvelles perspectives d'application dans des domaines tels que la biomécanique, l'environnement, le bâtiment, l'énergie, le transport ...

Tout le travail accompli à permis la construction des projets présentés, en particulier les projets Fatcom, Mulibiocomp pour les quels nous avons tous les moyens au laboratoire et dont le financement sont en chemin d'acquisition et les projets SHMonit, SMARTComp et FrottCompUS dont la mise en place est largement commencée, ainsi que les travaux préliminaires sont en cours. Pour la suite, je conserverais la triangulation de mes recherches, c'est à dire la modélisation numérique, le calcul analytique et l'expérimentation. Le projet des future travaux s'articule autour de trois parties. Une partie concerne la modélisation des assemblages composites et composites biosourcés à matrice organique à différentes échelles et la détection de fissures. La modélisation sera faite en utilisant les modèles volumiques FEM classiques couplés avec du XFEM et des lois des interfaces en prenant en compte la rugosité des surfaces modifiée par les traitements de surface(Fatcom et Multibiocomp). La deuxième partie est liée à l'instrumentation pour la caractérisation avancée de la durabilité de matériaux composites structuraux et intelligents sous sollicitation environnementale sévère. Ce projet vise à optimiser la fabrication des matériaux composites "intelligents", à matrice organique. Ces matériaux composites structuraux sont des matériaux avec des éléments actifs, permettant de modifier les propriétés et/ou la forme de la structure de façons significative par les moyens de stimulation externe, telle qu'une contrainte, une température, un rayonnement UV, un PH, une humidité, un champ électrique ou magnétique. Les solutions que nous envisageons concerne notamment le secteur de l'aéronautique, du maritime et de l'éolien. Il s'agit du projet SHMonit et SMARTComp. Enfin, la dernière partie vise à prendre en compte le taux de texturation de surface des composites sur l'usure et le comportement tribologique. La répartition spatiale de fibres dans la surface de contact sera évaluée pour des conditions de freting particularises. La méthodologie d'analyse prend en compte le traitement d'image sous Matlab obtenue par des méthodes microscopiques avant et après les essais de freting. Il s'agit de projet FrottCompUs.

Dans ce manuscrit, j'ai choisi de mettre mes activités de recherche en valeur à travers les différents travaux des thèses que j'ai co-encadré (5 thèses dont 3 sont soutenues). Le co-encadrement des doctorants a toujours fait partie de mes priorités, c'est un moyen de partager, de transmettre mes connaissances scientifiques et mon goût pour le monde de la recherche. J'at-

Axe transversal : FrottCompUs : Étude du comportement tribologique et de l'usure de composites.

tache une attention particulière non seulement à l'encadrement, mais aussi à l'accompagnement des doctorants dans leurs projet professionnel.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] NF ISO 15024 (2002) : Détermination de la ténacité à la rupture interlaminaire en mode I, G1C, de matériaux composites à matrice polymère renforcés de fibres unidirectionnelles, September 2002.
- [2] ISO 25217 (2009) : Determination of the mode I adhesive fracture energy of structural adhesive joints using double cantilever beam and tapered double cantilever beam specimens, May 2009.
- [3] ISO 17212 : Structural adhesives - guidelines for the surface preparation of metals and plastics prior to adhesive bonding, February 2012.
- [4] ASTM D5528-13 (2013) : Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber polymer matrix composites, 2013.
- [5] ISO 9403, Paints and varnishes - Wettability - Part 2 : determination of the surface free energy of solid surfaces by measuring the contact angle, 2017.
- [6] R. D. Adams, J. Comyn, and W. C. Wake. *Structural adhesive joints in engineering*. Number XII, 360. Chapman & Hall, London New York, 1997.
- [7] R. D. Adams, J. Coppendale, V. Mallick, and H. Al-Hamdan. The effect of temperature on the strength of adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 12(3) :185–190, 1992.
- [8] R. D. Adams and V. Mallick. The Effect of Temperature on the Strength of Adhesively-Bonded Composite-Aluminium Joints. *The Journal of Adhesion*, 43(1-2) :17–33, 1993.
- [9] R. D. Adams and N. A. Peppiatt. Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 3 :185–196, 1974.
- [10] O. Al-Khudairi, H. Hadavinia, A. Waggott, E. Lewis, and C. Little. Characterising mode I/mode II fatigue delamination growth in unidirectional fibre reinforced polymer laminates. *Materials & Design (1980-2015)*, 66 :93–102, feb 2015.
- [11] A. Ameli, N. V. Datla, M. Papini, and J. K. Spelt. Hygrothermal properties of highly toughened epoxy adhesives. *The Journal of Adhesion*, 86(7) :698–725, 2010.

- [12] I. Ben Amor, M. Baklouti, O. Klinkova, I. Tawfiq, and R. Elleuch. Regeneration process of short glass fibre reinforced polyamide for the production of electrical parts. In *ICAV2020*, Hammamet - Tunisia, March 2020.
- [13] K. Aniskevich, A. Aniskevich, A. Arnautov, and J. Jansons. Mechanical properties of pultruded glass fiber-reinforced plastic after moistening. *Composite Structures*, 94(9) :2914–2919, 2012.
- [14] M. Kemal Apalak and R. Gunes. Thermal residual stresses in an adhesively-bonded functionally graded single-lap joint. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20(12) :1295–1320, 2006.
- [15] A. Argüelles, J. Viña, A. Fernández-Canteli, I. Viña, and J. Bonhomme. Influence of the matrix constituent on mode I and mode II delamination toughness in fiber-reinforced polymer composites under cyclic fatigue. *Mechanics of Materials*, 43(1) :62–67, January 2011.
- [16] M. D. Aydin, S. Temiz, and A. Ozel. Effect of Curing Pressure on the Strength of Adhesively Bonded Joints. *The Journal of Adhesion*, 83(6) :553–571, 2007.
- [17] A. Baldan. Adhesion phenomena in bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 38 :95–116, October 2012.
- [18] M. D. Banea and L. F. M. da Silva. Adhesively bonded joints in composite materials : An overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L : Journal of Materials : Design and Applications*, 223(1) :1–18, 2009.
- [19] A. Bechikh. *Traitement de surface et caractérisation de l'adhérence dans les assemblages métal-biocomposite*. PhD thesis, Université Cergy Pontoise, 2020.
- [20] A. Bechikh, O. Klinkova, Y. Maalej, I. Tawfiq, and R. Nasri. The effect of different surface pretreatment parameters on galvanized steel to galvanized steel bonded assemblies shear strength and fracture energy. In *AB2019 Porto, Portugal*, 11-12 July 2019.
- [21] A. Bechikh, O. Klinkova, Y. Maalej, I. Tawfiq, and R. Nasri. Sandblasting parameter variation effect on galvanized steel surface chemical composition, roughness and free energy. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 102 :102653, October 2020.
- [22] A. Bechikh, O. Klinkova, Y. Maalej, I. Tawfiq, and R. Nasri. Influence of different mechanical treatments on flax/epoxy composite surface quality and composite to composite bonded assemblies shear resistance. *soumis*, 2021.
- [23] I. Ben Amor. *Régénération des composites d'un polyamide chargé de fibres de verre courtes*. PhD thesis, 2022.
- [24] A. Benjeddou. Smart structures, materials and nano technology in engineering. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 9(2) :85–87, apr 2018.
- [25] D. A. Bigwood and A. D. Crocombe. Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 9(4) :229–242, 1989.
- [26] D. A. Bigwood and A. D. Crocombe. Non-linear adhesive bonded joint. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 10(1) :31–41, 1990.

- [27] B. F. Boukhoulda, E. Adda-Bedia, and K. Madani. The effect of fiber orientation angle in composite materials on moisture absorption and material degradation after hygrothermal ageing. *Composite Structures*, 74(4) :406–418, August 2006.
- [28] B. F. Boukhoulda, L. Guillaumat, J. L. Lataillade, E. Adda Bedia, and A. Lousdad. Aging-impact coupling based analysis upon glass/polyester composite material in hygrothermal environment. *Materials & Design*, 32(7) :4080–4087, August 2011.
- [29] D. Broek. *Elementary engineering fracture mechanics*. Number XIV, 469. Springer Netherlands, Dordrecht, 1982.
- [30] A. Brunner, S. Stelzer, G. Pinter, and G. P. Terrasi. Cyclic fatigue delamination of carbon fiber-reinforced polymer-matrix composites : Data analysis and design considerations. *International Journal of Fatigue*, 83 :293–299, 2016.
- [31] S. Budhe, M. D. Banea, S. de Barros, and L. F. M. Da Silva. An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 72 :30–42, January 2017.
- [32] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura, and J. J. M. S. Domingues. Modelling single and double-lap repairs on composite materials. *Composites Science and Technology*, 65(13) :1948–1958, 2005.
- [33] N. Carrère, E. Martin, and D. Leguillon. Comparison between models based on a coupled criterion for the prediction of the failure of adhesively bonded joint. *Engng. Fract. Mech*, 138 :185–201, 2015.
- [34] A. Celino. *Contribution à l'étude du comportement hygro-mécanique de fibres végétales*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2013.
- [35] G. Chardon, O. Klinkova, J. Rech, S. Drapier, and J.-M. Bergheau. Characterization of friction properties at the work material/cutting tool interface during the machining of randomly structured carbon fibers reinforced polymer with Poly Crystalline Diamond tool under dry conditions. *Tribology International*, 81 :300–308, January 2015.
- [36] F. J. P. Chaves, L. F. M. Da Silva, M. F. S. F. De Moura, D. A. Dillard, and V. H. C. Esteves. Fracture Mechanics Tests in Adhesively Bonded Joints : A Literature Review. *The Journal of Adhesion*, 90(12) :955–992, June 2014.
- [37] P. Cheng, X. J. Gong, D. Hearn, and S. Aivazzadeh. Tensile behaviour of patch-repaired CFRP laminates. *Composite Structures*, 93(2) :582–589, January 2011.
- [38] Y. Cheng, O. Klinkova, L. Corte, L. Laiarinandrasana, L. Helfen, H. Proudhon, T. Baumbach, and T. F. Morgeneyer. Transition between polar and equatorial spherulitic damage in polypropylene as a function of stress states : in-situ 3D measurements. *soumit*, 2020.
- [39] Y. Cheng, L. Laiarinandrasana, L. Helfen, H. Proudhon, O. Klinkova, T. Baumbach, and T. F. Morgeneyer. In situ crack initiation and propagation in semicrystalline polyamide 6 revealed by 3D synchrotron radiation laminography. In *PhotoMechanics2015 Delft Netherlands*, March 2014.

-
- [40] Y. Cheng, L. Laiarinandrasana, L. Helfen, H. Proudhon, O. Klinkova, T. Baumbach, and T. F. Morgeneyer. 3D Damage Micromechanisms in Polyamide 6 Ahead of a Severe Notch Studied in situ synchrotron laminography. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 217(5) :701–715, January 2016.
- [41] P. Cloetens, W. Ludwig, J. Baruchel, M. Schlenker, and J. P. Guigay. La radiographie X conquiert la phase. *CNRS Images de la Physique*, 2000.
- [42] J. Cognard. *Science et technologie du collage*. Number XIV, 322. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2000.
- [43] F. Collombet, M. Torres, B. Douchin, L. Crouzeix, Y.-H. Grunevald, J. Lubin, T. Camps, X. Jacob, G. Luyckx, and K.-T. Wu. Multi-instrumentation monitoring for the curing process of a composite structure. *Measurement*, 157 :107635, jun 2020.
- [44] P. Coudor. *Analyse fine du mécanisme d’interaction dans les structures souples assemblées par collage*. PhD thesis, Université Blaise Pascal -Clermont II, 2009.
- [45] J.-Ph Crete, O. Klinkova, and T. Da Silva Botelho. Revue des méthodes de simulation du comportement d’assemblages collés. In *Les assemblages mécaniques - évolutions récentes et perspectives*, 2019.
- [46] M. F. S. F. de Moura, R. D. S. G. Campilho, and J. P. M. Goncalves. Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading. *Composites Science and Technology*, 68(10) :2224–2230, 2008.
- [47] F. Delale, F. Erdogan, and M. N. Aydinoglu. Stresses in adhesively bonded joints : A closed-form solution. *Journal of Composite Materials*, 15(3) :249–271, May 1981.
- [48] M. Demoura, R. Campilho, and J. Goncalves. Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading. *Composites Science and Technology*, 68(10-11) :2224–2230, August 2008.
- [49] S. Dumont, F. Lebon, M. L. Raffa, and R. Rizzoni. Towards nonlinear imperfect interface models including micro-cracks and smooth roughness. *Annals of Solid and Structural Mechanics*, 9(1-2) :13–27, jul 2017.
- [50] G. Fernlund, R. Chaaya, and J. K. Spelt. Mode I Fracture Load Predictions of Adhesive T-joints. *The Journal of Adhesion*, 50(2-3) :181–190, June 1995.
- [51] I. S. Floros, K. I. Tserpes, and T. Löbel. Mode-I, mode-II and mixed-mode I+II fracture behavior of composite bonded joints : Experimental characterization and numerical simulation. *Composites Part B : Engineering*, 78 :459–468, 2015.
- [52] D. François, A. Pineau, and A. Zaoui. *Mechanical Behaviour of Materials*. Springer-Verlag GmbH, 2013.
- [53] Y. Frostig, O. T. Thomsen, and F. Mortensen. Analysis of adhesive bonded joints, square-end, and spew- llet-high-order theory approach. *Journal of Engineering Mechanics*, 125 :1298–1307, 1999.

- [54] S. Ghalme, A. Mankar, and Y. J. Bhalerao. Parameter optimization in milling of glass fiber reinforced plastic (GFRP) using DOE-Taguchi method. *SpringerPlus*, 5(1), August 2016.
- [55] S. Gohari, S. Sharifi, and Z. Vrcelj. New explicit solution for static shape control of smart laminated cantilever piezo-composite-hybrid plates/beams under thermo-electro-mechanical loads using piezoelectric actuators. *Composite Structures*, 145 :89–112, jun 2016.
- [56] L. D. R. Grant, R. D. Adams, and L. F. M. Da Silva. Effect of the temperature on the strength of adhesively bonded single lap and T joints for the automotive industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(5) :535–542, 2009.
- [57] A. A. Griffith. VI. the phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 221(582-593) :163–198, January 1921.
- [58] A. Guzanová, J. Brezinová, D. Draganovská, and F. Jaš. A study of the effect of surface pre-treatment on the adhesion of coatings. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 28(17) :1754–1771, May 2014.
- [59] H. Hadavinia, A. J. Kinloch, M. S. G. Little, and A. C. Taylor. The prediction of crack growth in bonded joints under cyclic-fatigue loading I. experimental studies. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23(6) :449–461, 2003.
- [60] L. Hamill and S. Nutt. Adhesion of metallic glass and epoxy in composite-metal bonding. *Composites Part B : Engineering*, 134 :186–192, February 2018.
- [61] O. Hamlaoui. *Etude de l'endommagement d'un composite FV/PBT application à une operation de rivetage par compression*. PhD thesis, 2021.
- [62] O. Hamlaoui, O. Klinkova, R. Elleuch, and I. Tawfiq. Brital fracture of glass fiber reinforced PBT ; application for a riveting operation. In *COTUME 2020, Hammamet, Tunisie*, 20-22 mars, 2020.
- [63] O. Hamlaoui, O. Klinkova, R. Elleuch, and I. Tawfiq. Investigation on Crack Damage of fiberglass-reinforced polybutylene terephthalate. In *CIMA2019, Hammamet, Tunisie (Advanced Materials)*, October 25-28, 2019.
- [64] A. F. Harris and A. Beevers. The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 19(6) :445–452, December 1999.
- [65] L. J. Hart-Smith. Adhesive-bonded double-lap joints. Technical report, CR-112235, NASA, 1973.
- [66] L. J. Hart-Smith. Adhesive-bonded single-lap joints. Technical report, CR-112236, NASA, 1973.
- [67] S. Hell, P. Weißgraeber, J. Felger, and W. Becker. A coupled stress and energy criterion for the assessment of crack initiation in single lap joints : A numerical approach. *Engineering Fracture Mechanics*, 117 :112–126, February 2014.

- [68] Franz Hirsch and Markus Kästner. Microscale simulation of adhesive and cohesive failure in rough interfaces. *Engineering Fracture Mechanics*, 178 :416–432, jun 2017.
- [69] N. S. Hirulkar, P. R. Jaiswal, P. N. B. Reis, and J. A. M. Ferreira. Effect of hygrothermal aging and cyclic thermal shocks on the mechanical performance of single-lap adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 99 :102584, June 2020.
- [70] B. Jane Ho, J. Kit-Hon Tsoi, D. Liu, C. Ying-Kei Lung, H.-M. Wong, and J. P. Matinlinna. Effects of sandblasting distance and angles on resin cement bonding to zirconia and titanium. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 62 :25–31, October 2015.
- [71] X. Jiang, H. Kolstein, and F. S. K. Bijlaard. Moisture diffusion in glass-fiber-reinforced polymer composite bridge under hot/wet environment. *Composites Part B : Engineering*, 45(1) :407–416, 2013.
- [72] G. R. Johnson and W. H. Cook. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 21(1) :31–48, 1985.
- [73] S. A. Rodrigues Jr, J. L. Ferracane, and A. Della Bona. Influence of surface treatments on the bond strength of repaired resin composite restorative materials. *Dental Materials*, 25(4) :442–451, April 2009.
- [74] L. M. Kachanov. Rupture time under creep conditions. *International Journal of Fracture*, 97(1/4) :11–18, 1999.
- [75] M. F. Kanninen. An Augmented Double Cantilever Beam Model For Studying Crack Propagation And Arrest. *International Journal of Fracture*, 9(1) :83–92, 1973.
- [76] R. Kessentini. *Contribution à l'étude du comportement des bandes de convoyeurs soumises à des sollicitations opérationnelles*. PhD thesis, Université Paris-Saclay, 2018.
- [77] R. Kessentini, H. Jrad, O. Klinkova, I. Tawfiq, and M. Haddar. Effect of thermal expansion coefficient on the strength of bonded joints under temperature load. In *International Conference on Advanced Materials, Mechanics and Manufacturing A3M2016, Hammamet, Tunisia*, 19-21 December 2016.
- [78] R. Kessentini, H. Jrad, O. Klinkova, I. Tawfiq, and M. Haddar. Analytical study of moisture stress distribution on sandwich structure. In *ATAVI, International Conference on Acoustics and Vibration, ICAV2016, Hammamet - Tunisia*, March 2016.
- [79] R. Kessentini, H. Jrad, O. Klinkova, I. Tawfiq, and M. Haddar. Experimental characterization of the effect of moisture uptake on conveyor textile belt. In *7th International Congress Design and Modelling of Mechanical Systems, Hammamet, Tunisie*, 27 - 29 March 2017.
- [80] R. Kessentini, H. Jrad, O. Klinkova, I. Tawfiq, and M. Haddar. Evaluation of water ingress behavior of conveyor belt composite material. In *4th International conference of structural adhesive bonding*, 6-7 July 2017.
- [81] R. Kessentini, O. Klinkova, H. Jrad, I. Tawfiq, and M. Haddar. Méthodologie de caractérisation hydrique d'une bande de convoyeur en matériau composite. humid characterization methodology of conveyor belt composite material. In *JNC 20*, 2017.

- [82] R. Kessentini, O. Klinkova, H. Jrad, I.d Tawfiq, and M. Haddar. Analytical and numerical investigation of coupled hygro-thermo-mechanical model of multi-layers bonded structure. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 84 :108–118, August 2018.
- [83] R. Kessentini, O. Klinkova, I. Tawfiq, and M. Haddar. Modeling the moisture diffusion and hygroscopic swelling of a textile reinforced conveyor belt. *Polymer Testing*, 75 :159–166, May 2019.
- [84] R. Kessentini, O. Klinkova, I. Tawfiq, and M. Haddar. Transient hygro-thermo-mechanical stresses analysis in multi-layers bonded structure with coupled bidirectional model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 150 :188–201, January 2019.
- [85] R. Kessentini, O. Klinkova, I. Tawfiq, and M. Haddar. Theoretical and Experimental Investigation of Bonded Patch Repairs of a Rubber Reinforced Composite Conveyor Belt. *Polymers*, 13(11) :1710, may 2021.
- [86] A. A. Khan, A. A. Al Kheraif, S. M. Alhijji, and J. P. Matinlinna. Effect of grit-blasting air pressure on adhesion strength of resin to titanium. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 65 :41–46, March 2016.
- [87] O. Klinkova. Prediction of composite materials distortion with SYSPLY. *ESI Success story*, 2011.
- [88] O. Klinkova. *Simulation numerique de la cuisson et de l'usinage de materiaux composites*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et Ecole Nationale d'Ingenieurs de Saint-Etienne, 2011.
- [89] O. Klinkova, F. Bremond, S. Drapier, and J. M. Bergheau. Simulation des contraintes résiduelles dans les structures composites : déformation après cuisson. In *9ème colloque national en calcul des structures*, volume 1, pages 339–344, 2009.
- [90] O. Klinkova, S. Drapier, and J. M. Bergheau. Characterisation of cured-induced residual stresses in composite structures : measurements and prediction of angular variations. In *16 eme Journées Nationales sur les Composites*, pages 353–354. Olivier, P and Lamon, J., 2009.
- [91] O. Klinkova, S. Drapier, and J. M. Bergheau. Simulation des contraintes résiduelles dans les structures composites : déformée après cuisson et usinage. In *19 ème Congrès Français de Mécanique*, pages 1–6, 2009.
- [92] O. Klinkova, S. Drapier, and J. M. Bergheau. Simulation of residual stresses in Hextool composite mold : cured-induced distortions and machining. In *8th European Conference on Residual Stresses, ECRS8, At Riva del Garda, Italy*, 2010.
- [93] O. Klinkova, S. Drapier, and J. M. Bergheau. Simulation of Residual Stresses in T300/914 composite structures. In *SAMPE Europe Brindisi - Sept. 16-17*, pages 1–8, 2010.
- [94] O. Klinkova, S. Drapier, and J. M. Bergheau. Characterization of cured-induced residual stresses. Number 67, pages 49–52. JEC, 2011.

- [95] O. Klinkova, J. Rech, S. Drapier, and J.-M. Bergheau. Characterization of friction properties at the workmaterial/cutting tool interface during the machining of randomly structured carbon fibers reinforced polymer with carbide tools under dry conditions. *Tribology International*, 44(12) :2050–2058, November 2011.
- [96] D. Krajcinovic. Damage mechanics. *Mechanics of Materials*, 8(2) :117–197, 1989.
- [97] P. Kumar, A. Patnaik, and S. Chaudhary. Effect of bond layer thickness on behaviour of steel-concrete composite connections. *Engineering Structures*, 177 :268–282, December 2018.
- [98] R. Suresh Kumar and M. C. Ray. Active control of geometrically nonlinear vibrations of doubly curved smart sandwich shells using 1–3 piezoelectric composites. *Composite Structures*, 105 :173–187, nov 2013.
- [99] P. Ladeveze and E. LeDantec. Damage modelling of the elementary ply for laminated composites. *Composites Science and Technology*, 43(3) :257–267, 1992.
- [100] F. Lahuerta, T. Westphal, R. P. L. Nijssen, F. P. van der Meer, and L. J. Sluys. Measuring the delamination length in static and fatigue mode I tests using video image processing. *Composites Part B : Engineering*, 63 :1–7, 2014.
- [101] L. Laiarinandrasana, O. Klinkova, F. Nguyen, H. Proudhon, T. F. Morgeneyer, and W. Ludwig. Three dimensional quantification of anisotropic void evolution in deformed semi-crystalline polyamide 6. *International Journal of Plasticity*, 83 :19–36, August 2016.
- [102] L. Laiarinandrasana, N. Selles, O. Klinkova, T. F. Morgeneyer, H. Proudhon, and L. Helfen. Structural versus microstructural evolution of semi-crystalline polymers during necking under tension : Influence of the skin-core effects, the relative humidity and the strain rate. *Polymer Testing*, 55 :297–309, October 2016.
- [103] J. Li, Y. Li, M. Huang, Y. Xiang, and Y. Liao. Improvement of aluminum lithium alloy adhesion performance based on sandblasting techniques. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 84 :307–316, August 2018.
- [104] C. D. M. Liljedahl. *Modelling the interfacial degradation in adhesively bonded joints*. PhD thesis, University of Surrey, 2006.
- [105] C. D. M. Liljedahl, A. D. Crocombe, M. A. Wahab, and I. A. Ashcroft. Modelling the environmental degradation of adhesively bonded aluminium and composite joints using a CZM approach. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(6) :505–518, September 2007.
- [106] W. K. Loh, A. D. Crocombe, M. M. Abdel Wahab, and I. A. Ashcroft. Modelling anomalous moisture uptake, swelling and thermal characteristics of a rubber toughened epoxy adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 25(1) :1–12, 2005.
- [107] M. Mejri, L. Toubal, J. C. Cuillère, and V. François. Hygrothermal aging effects on mechanical and fatigue behaviors of a short- natural-fiber-reinforced composite. *International Journal of Fatigue*, 108 :96–108, 2018.
- [108] J. Mercier. *Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites*. PhD thesis, Paris, ENMP, 2006.

- [109] A. Moradi, N. Carrère, D. Leguillon, E. Martin, and J.-Y. Cognard. Strength prediction of bonded assemblies using a coupled criterion under elastic assumptions : Effect of material and geometrical parameters. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 47 :73–82, December 2013.
- [110] T. F. Morgeneyer, L. Helfen, H. Mubarak, and F. Hild. 3D digital volume correlation of synchrotron radiation laminography images of ductile crack initiation : An initial feasibility study. *Experimental Mechanics*, 53(4) :543–556, 2013.
- [111] F. Mortensen and O. T. Thomsen. Analysis of adhesive bonded joints : a unified approach. *Composites Science and Technology*, 62 :1011–1031, 2002.
- [112] M. Mukai, H. Fukui, and J. Hasegawa. Relationship between sandblasting and composite resin-alloy bond strength by a silica coating. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 74(2) :151–155, August 1995.
- [113] A. Murray, D. Attrill, and M. Dickinson. The effects of XeCl laser etching of Ni-Cr alloy on bond strengths to composite resin : a comparison with sandblasting procedures. *Dental Materials*, 21(6) :538–544, June 2005.
- [114] G. B. Murri. Evaluation of delamination growth characterization methods under mode I fatigue loading. In *ASC 27th Technical Conference*, 2012.
- [115] I. U. Ojalvo and H. L. Eidinoff. Bond Thickness Effects upon Stresses in Single-Lap Adhesive Joints. *AIAA Journal*, 16(3) :204–211, March 1978.
- [116] M. Okada, H. Taketa, Y. Torii, M. Irie, and T. Matsumoto. Optimal sandblasting conditions for conventional-type yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystals. *Dental Materials*, 35(1) :169–175, January 2019.
- [117] D. K. Owens and R. C. Wendt. Estimation of the surface free energy of polymers. *Journal of applied polymer science*, 13 :1741–1747, 1969.
- [118] Y. Payandeh, F. Meraghni, E. Patoor, and A. Eberhardt. Effect of martensitic transformation on the debonding propagation in Ni–Ti shape memory wire composite. *Materials Science and Engineering : A*, 518(1-2) :35–40, aug 2009.
- [119] Y. Payandeh, F. Meraghni, E. Patoor, and A. Eberhardt. Debonding initiation in a NiTi shape memory wire–epoxy matrix composite. influence of martensitic transformation. *Materials & Design*, 31(3) :1077–1084, mar 2010.
- [120] A. Pirondi and G. Nicoletto. Fatigue crack growth in bonded DCB specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 71(4-6) :859–871, March 2004.
- [121] Y. N. Rabotnov. Creep rupture. *Applied Mechanics*, pages 342–349, 1969.
- [122] I. Radovic, F. Monticelli, C. Goracci, À. Hafiz Cury, I. Coniglio, Z. R. Vulicevic, F. Garcia-Godoy, and M. Ferrari. The effect of sandblasting on adhesion of a dual-cured resin composite to methacrylic fiber posts : Microtensile bond strength and SEM evaluation. *Journal of Dentistry*, 35(6) :496–502, June 2007.
- [123] M. L. Raffa, J.-Ph. Crete, and O. Klinkova. Micromechanical modeling of quasi-brittle stress-strain behavior of adhesive-bonded joints. Paris France, 19 - 24 Juin 2020.

- [124] Maria Letizia Raffa, Frédéric Lebon, and Giuseppe Vairo. Normal and tangential stiffnesses of rough surfaces in contact via an imperfect interface model. *International Journal of Solids and Structures*, 87 :245–253, jun 2016.
- [125] D. P. Romilly and R. J. Clark. Elastic analysis of hybrid bonded joints and bonded composite repairs. *Composite Structures*, 82(4) :563–576, February 2008.
- [126] A. Rudawska, I. Danczak, M. Müller, and P. Valasek. The effect of sandblasting on surface properties for adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 70 :176–190, October 2016.
- [127] V. Sahadevan. *Dynamic and static signatures for health monitoring of smart composite beams using direct and inverse neural networks approaches*. PhD thesis, Supmeca, Lismma, 2006.
- [128] T. Sawa, J. Liu, K. Nakano, and J. Tanaka. A two-dimensional stress analysis of single-lap adhesive joints of dissimilar adherends subjected to tensile loads. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14(1) :43–66, January 2000.
- [129] M. S. Sciolti, M. Frigione, and M. A. Aiello. Wet Lay-Up Manufactured FRPs for Concrete and Masonry Repair : Influence of Water on the Properties of Composites and on Their Epoxy Components. *Journal of Composites for Construction*, 14 :823–33, 2010.
- [130] N. Selles, P. Cloetens, H. Proudhon, T. F. Morgeneyer, O. Klinkova, N. Saintier, and L. Laiarinandrasana. Voiding Mechanisms in Deformed Polyamide 6 Observed at the Nanometric Scale. *Macromolecules*, 50(11) :4372–4383, May 2017.
- [131] L. F. M. Da Silva and R. D. Adams. Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(5) :362–379, July 2007.
- [132] L. F. M. Da Silva and R. D. Adams. Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(3) :227–235, 2007.
- [133] L. F. M. Da Silva, A. Öchsner, and R. D. Adams. *Handbook of Adhesion Technology*. Number XLVIII, 1554. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [134] L. F. M. Da Silva, M. João, and C. Q. Lopes. Joint strength optimization by the mixed-adhesive technique. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(5) :509–514, 2009.
- [135] L. F. M. Da Silva, T. N. S. S. Rodrigues, M. A. V. Figueiredo, M. F. S. F. de Moura, and J. A. G. Chousal. Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength. *The Journal of Adhesion*, 82(11) :1091–1115, 2006.
- [136] L. F. M. Da Silva, M. Da Silva, J. C. Paulo das Neves, R. D. Adams, and J. K. Spelt. Analytical models of adhesively bonded joints Part I : Literature survey. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(3) :319–330, April 2009.
- [137] N. N. Silveira, R. C. M. Sales, G. M. Cândido, and M. V. Donadon. Fractographic analysis of the hygrothermal effect in co-bonded and secondary bonded joints under mode

- II delamination loading. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 98 :102508, April 2020.
- [138] S. S. Smeltzer and E. C. Klang. Analysis of elastic-plastic adhesively bonded joints with anisotropic adherends. In *In Proceedings of the American Society for Composites 18th Annual Technical Conference*, 2003.
- [139] L. Sorrentino, W. Polini, C. Bellini, and G. Parodo. Surface treatment of CFRP : influence on single lap joint performances. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 85 :225–233, October 2018.
- [140] G. Stamoulis, N. Carrère, J. Y. Cognard, P. Davies, and C. Badulescu. On the experimental mixed-mode failure of adhesively bonded metallic joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 51 :148–158, 2014.
- [141] S. Stelzer, A. J. Brunner, A. Argüelles, N. Murphy, G. M. Cano, and G. Pinter. Mode I delamination fatigue crack growth in unidirectional fiber reinforced composites : Results from ESIS TC4 round-robins. *Engineering Fracture Mechanics*, 116 :92–107, 2014.
- [142] Y. Y. Su and L. Gao. Analytical model for adhesively bonded composite panel-flange joints based on the Timoshenko beam theory. *Composite Structures*, 107 :112–118, 2014.
- [143] S. Sugiman, A. D. Crocombe, and I. A. Aschroft. Experimental and numerical investigation of the static response of environmentally aged adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 40 :224–237, January 2013.
- [144] M. Tahani and S. A. Yousefsani. On thermomechanical stress analysis of adhesively bonded composite joints in presence of an interfacial void. *Composite Structures*, 130 :116–123, oct 2015.
- [145] T. Tang and S. D. Felicelli. Micromechanical models for time-dependent multiphysics responses of polymer matrix smart composites. *International Journal of Engineering Science*, 94 :164–180, sep 2015.
- [146] G.-C. Tsai. Design of composite ENF specimens and conduct three-point test to calculate mode II fracture toughness. *9th International Conference on Engineering Education*, pages 1–5, July 2006.
- [147] W.-A. Jansen van Vuuren, L. Jansen van Vuuren, B. Torr, and J. Neil Waddell. Adhesion between zirconia and indirect composite resin. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 69 :72–78, September 2016.
- [148] H.-Y. Wang, R.-F. Zhu, Y.-P. Lu, G.-Y. Xiao, K. He, Y. F. Yuan, X.-N. Ma, and Y. Li. Effect of sandblasting intensity on microstructures and properties of pure titanium micro-arc oxidation coatings in an optimized composite technique. *Applied Surface Science*, 292 :204–212, feb 2014.
- [149] R. X. Wang, J. Cui, A. N. Sinclair, and J. K. Spelt. Strength of adhesive joints with adherend yielding : I. analytical model. *The Journal of Adhesion*, 79 :23–48, 2003.
- [150] W. Wang, S. Teixeira De Freitas, J. A. Poulis, and D. Zarouchas. A review of experimental and theoretical fracture characterization of bi-material bonded joints. *Composites Part B : Engineering*, page 108537, nov 2020.

- [151] X. Wang, H. Geng, S. He, Y. O. Pokhyl, and K. V. Koval. Effect of thermal expansion coefficient on the stress distribution in solar panel. *International journal of Adhesion and adhesives*, 27(4) :288–297, 2007.
- [152] I. Watanabe, K. S. Kurtz, J. L. Kabcenell, and T. Okabe. Effect of sandblasting and silicoating on bond strength of polymer-glass composite to cast titanium. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 82(4) :462–467, October 1999.
- [153] J. R. J. Wingfield. Treatment of composite surfaces for adhesive bonding. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 13(3) :151–156, July 1993.
- [154] K. J. Wong. *Moisture absorption characteristics and effects on mechanical behaviour of carbon/epoxy composite : Application to bonded patch repairs of composite structures*. PhD thesis, Université de Bourgogne, 2013.
- [155] W. Xiaoyan and Z. Shuang. Analytical model of thermal stress distribution of bonded structure under temperature field. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31 :398–401, 2011.
- [156] C. Yang and S. S. Pang. Stress-strain analysis of single-lap composite joints under tension. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 118 :247–256, 1996.
- [157] J.-Y. Yun, S.-R. Ha, J.-B. Lee, and S.-H. Kim. Effect of sandblasting and various metal primers on the shear bond strength of resin cement to Y-TZP ceramic. *Dental Materials*, 26(7) :650–658, July 2010.
- [158] G. Zambelis. *Étude en tolérance aux dommages des joints de colle sur les bords d’attaques d’hélicoptères. Cas de défauts sollicités en modes I et II, en statique et fatigue dans différentes conditions environnementales*. PhD thesis, Université Paris-Saclay, 2017.
- [159] G. Zambelis, T. Da Silva Botelho, O. Klinkova, I. Tawfiq, and C. Lanouette. Calcul du taux de restitution d’énergie en mode I et II sur assemblage composite-métal. In *JNC19*, 2015.
- [160] G. Zambelis, T. Da Silva Botelho, O. Klinkova, I. Tawfiq, and C. Lanouette. Evaluation of the energy release rates (Mode I) in composite-metal specimens assembled by bonding. In *3rd International Conference on Structural Adhesive Bonding*, 2015.
- [161] G. Zambelis, T. Da Silva Botelho, O. Klinkova, I. Tawfiq, and C. Lanouette. Evaluation of the energy release rate in mode I of asymmetrical bonded composite/metal assembly. *Engineering Fracture Mechanics*, 190 :175–185, March 2018.
- [162] G. Zambelis, T. Da Silva Botelho, O. Klinkova, I. Tawfiq, and C. Lanouette. A new approach in testing fatigue fracture mechanics properties in asymmetrical bonded composite/metal assemblies. *Composites Part B : Engineering*, 158 :390–399, February 2019.
- [163] G. Zambelis, T. Da Silva Botelho, O. Klinkova, I. Tawfiq, and C. Lanouette. Nouvelle approche expérimentale pour calculer les propriétés en fatigue d’un assemblage composite/métal collé. In *Les 36èmes Journées de Printemps*, 30-31 Mai 2017.
- [164] G. P. Zou, K. Shahin, and F. Taheri. An analytical solution for the analysis of symmetric composite adhesively bonded joints. *Composite Structures*, 65(3-4) :499–510, September 2004.