

JADH26

Lège Cap-Ferret

20 – 25 septembre 2026

Nous remercions pour leur soutien :



COMITE SFA

Julien JUMEL <i>Président</i>	ENSTA Bretagne	Brest
Pierre PFIHL <i>Vice-Président</i>	AFICAM-FIPEC	Paris
Maëlen AUFRAY <i>Secrétaire</i>	CIRIMAT (INP-ENSIACET)	Toulouse
Gweltaz HIREL	SFV	Paris
Stéphane AUGUSTE	URGO RECHERCHE	Chenove
Florence BALLY LE GALL	IS2M - UHA	Mulhouse
Stéphane BENAYOUN	LTDS – ECL	Écully
Alexandre BENEDETTO	SAINT GOBAIN Research	Paris
Matteo CICCOTTI	ESPCI - PSL	Paris
Sébastien GENTY	SOCOMORE	Vannes
Marion GIRARD	Nantes Univ.	Nantes
Anthony GRUNENWALD	SAFRAN	Moissy-Cramayel
Yves LETERRIER	EPFL	Lausanne (CH)
Dimitri MERCIER	IRCP	Paris
Eric PAROISSIEN	ISAE-SUPAERO	Toulouse
Julien PORTAL	L'ORÉAL	Aulnay-sous-Bois
Christophe POULARD	LPS – UPS	Orsay
Nassim PUJOL	MICHELIN	Clermont-Ferrand

© Editions SFV 2026

19 rue du Renard – 75004 Paris

Les textes de ce volume sont la propriété exclusive de la Société Française du Vide.

Toute reproduction est interdite sans son accord.

Les Editeurs déclinent toute responsabilité relativement aux erreurs ou omissions qui pourraient se produire dans l'impression de ce volume.

EDITORIAL

Le Comité de la Section Française de l'Adhésion (SFA) a le plaisir de vous inviter aux 24^e Journées d'étude sur l'adhésion (JADH), qui se tiendront du 20 au 25 septembre 2026 au VVF de Lège-Cap Ferret. Niché entre l'océan Atlantique et le bassin d'Arcachon, ce site heureusement épargné par les récents incendies offre un cadre naturel préservé, idéal pour échanger sur nos derniers travaux en adhésion, collage et thématiques associées.

Au programme de cette édition, deux journées de formation sont proposées en ouverture destinées aux doctorants, chercheurs et industriels (développeurs ou utilisateurs de solutions d'assemblage et de traitement de surface). Un panorama complet des principes physiques, chimiques et mécaniques indispensables à la maîtrise du collage et des phénomènes d'adhésion. S'en suivront trois journées consacrées au colloque scientifique accueillant un ensemble de conférenciers invités qui proposeront une synthèse de leurs travaux dans différents domaines d'intérêt pour notre communauté : fonctionnalisation des surfaces, mouillage, nouvelles formulations, mécanique de la rupture des interfaces, durabilité etc.

Les J'Adh sont également un lieu privilégié de rencontre entre le monde académique et le secteur industriel. Lors de cette édition nous accueillerons ainsi sur site une journée technique de l'AFTPVA^[1] dont nous espérons qu'elle permettra de stimuler le partage entre milieu académique et professionnels du secteur et l'émergence de nouveaux projets partenariaux.

Nous espérons vous voir nombreux sur le bassin d'Arcachon pour faire de cet événement un véritable succès collectif.

^[1] AFTPVA : Association Française des Techniciens des Peintures, Vernis, encres, colles et Adhésifs (<https://aftpva.org/>).

Julien JUMEL

Président de SFA

Programme des conférences

MERCREDI 23 SEPTEMBRE 2026

8h20 **Ouverture** - J. Jumel (*Président de SFA, division de la SFV*)

Chair : S. Chaignaud

8h40 **INV1 - Évolution des technologies d'anodisation et de mise en peinture dans le secteur aéronautique, un système multi-couches complexe où la gestion des interfaces est un enjeu majeur**

(Conférence invitée)

J. Tardelli

IRT M2P Metz (France)

9h20 **#22 - Procédés voie sèche pour la préparation de surface de PTFE avant collage**

S. Kirchner¹, L. Ferres¹, P. Mierzejewski², N. Cuvillier³, M. Péron⁴

¹ *IRT Saint Exupéry - Talence (France)*

² *Airbus - Talence (France)*

³ *Safran - Talence (France)*

⁴ *ArianeGroup - Talence (France)*

9h40 **#28 - Optimisation de l'adhésion des revêtements anticorrosion par préparation de surface laser robotisée sur structures complexes en acier**

E. Gourlaouen¹, V. Guillemand Vu², A. Fahs¹, E. Aragon¹

¹ *Univ. Toulon, MAPIEM, Toulon - La Garde (France)*

² *Meliad Sas - Les Sorinières (France)*

10h00 **#10 - Texturation laser sélective de peintures primaires pour le collage adhésif sans endommagement du substrat**

J. Reynis¹, L. Ferres¹, P. Mierzejewski², N. Cuvillier³, M. Péron⁴, S. Kirchner¹

¹ *IRT Saint Exupéry - Talence (France)*

² *Airbus - Toulouse (France)*

³ *Safran - Itteville (France)*

⁴ *Arianegroup - Le Haillan (France)*

- pause 30' -

MERCREDI 23 SEPTEMBRE 2026

Chair : F. Bally Le Gall

- 10h50 **INV2 - Influence relative de la chimie et de la topographie de surface sur l'adhésion cellulaire : intérêt des revêtements à base d'amines**
(Conférence invitée)
H.S. Salapare III¹, S. Staehle², A. Ponche¹, T. Petithory¹, R. Ramos¹, S. Seemann², M. Dubs³, H. Rebi², A. Wartenberg³, L. Pieuchot¹, F. Bally-Le Gall¹, P. Fioux¹, D. Koczan³, F. Haack⁴, M. Bielfeldt², A. Airoudj¹, V. Roucoules¹, M. Schnabelrauch³, J. Barbara Nebe^{2,5}, K. Anselme¹
¹ IS2M, CNRS, UHA, UMR 7361, Mulhouse (France)
² Institute for Cell Biology, Univ. Medical Center Rostock, Rostock (Allemagne)
³ Department of Immunology, Rostock Univ. Medical Center, Rostock (Allemagne)
⁴ Institute for Visual and Analytic Computing, Univ. Rostock (Allemagne)
⁵ Department of Life, Light & Matter, Univ Rostock (Allemagne)
- 11h30 **#23 - Formation in situ de monocouches auto-assemblées de carbenes n-heterocycliques sur oxyde de cuivre**
D. Mercier¹, M. Michaux¹, S. Ba Sowid², L. Perrault², S. Zanna¹, A. Seyeux¹, P. Marcus¹, F. Ribot³, L. Fensterbank², D. Costa¹
¹ Institut de Recherche de Chimie Paris - Paris (France)
² Laboratoire d'Activation Moléculaire - Paris (France)
³ Laboratoire de Chimie de la Matière Condensée de Paris - Paris (France)
- 11h50 **#38 - Amélioration de l'adhésion métal-polymère thermoplastique par traitements de surface dans les assemblages thermocompressés**
M. Mahi¹, L. Trouillet-Fonti², S. Duluard¹, M. Aufray¹
¹ CIRIMAT - Toulouse (France)
² Syensqo - St Fons (France)
- 12h10 **#27 - Crackless technology for new, sustainable and high-performance cyanoacrylate superglues**
E. Faggi, P. Garra
Bostik (Espagne)
- 12h30 **Déjeuner**

MERCREDI 23 SEPTEMBRE 2026

Chair : C. Poulard

- 14h00 **INV3 - Séchage de gouttes/flaques de sang humain**
(Conférence invitée)
D. Brutin
Aix-Marseille Univ., Marseille (France)
- 14h40 **#48 - Wetting and spreading of water droplets on ice**
W. Sarlin¹, D.V. Papa², A. Rosenbaum², R. Grivet², A. Huerre¹, T. Séon³, C. Josserand²
¹ *MSC - Paris (France)*
² *LADHYX - Palaiseau (France)*
³ *IFADYFE - Buenos Aires (Argentina)*
- 15h00 **#06 - Alternative aux PFAS pour la fabrication des circuits électroniques en 3 dimensions**
P. Montméat, T. Enot, F. Fournel, M. Vacon, A. Thiolon, C. Ladner
CEA
- 15h20 **#20 - Effect of surface treatment, pre-coating, and adhesive type on the bonding performance of S275 steel**
A. Bechikh, S.F. Legry, A. Madureira, J. Chambon, M. Lallemand, A. Maurel-Pantel, F. Lebon
Aix-Marseille Univ, Cnrs, Centrale Marseille, LMA - Marseille (France)

- pause 30' -

Chair : S. Benayoun

- 16h10 **#42 - Enhancing fiber/matrix interface adhesion in bio-based composites by cold plasma surface activation**
F. Perrier-Michon¹, S.A.E. Boyer², A. Burr², V.J. Rohani¹
¹ *PERSEE, Mines Paris PSL - Valbonne (France)*
² *CEMEF CNRS 7635, Mines Paris PSL - Valbonne (France)*
- 16h30 **#16 - Mécanismes du renforcement par plasma de l'adhésion moléculaire**
A. Maurel-Pantel¹, F. Lebon¹, F. Fournel², J. Debray³, A. Talneau⁴, V. Menard⁵, C. Hecquet⁶
¹ *Aix Marseille Université - Marseille (France)*
² *CEA LETI - Grenoble (France)*
³ *Institut Néel - Grenoble (France)*
⁴ *C2N - Paris (France)*
⁵ *ENSICAEN - Caen (France)*
⁶ *Institut d'Optique - Paris (France)*
- 16h50 **#32 - Influence of plasma treatment on the structural bonding of CFRP assemblies**
O. Nitusgau¹, S. Amar¹, K. Le Meur², O. Picot², M. Aufray¹
¹ *Université de Toulouse, Toulouse INP, CNRS, CIRIMAT - Toulouse (France)*
² *Collins Aerospace, Ratier-Figeac - Figeac (France)*
- 17h10 **#09 - Industrialisation du traitement plasma sur des matériaux elastomères pour des applications dans des propulseurs**
H. Acheritobehere, C. Laforet
Roxel - Saint Médard en Jalles (France)
- 17h30 **#11 - Recycling of carbon fibers employing debonding on demand approach in composites structures**
D. Ruch, S. Ozyigit, J. Bardon, A. Laachachi, O. Kachouri
Luxembourg Institute of Science and Technology (Luxembourg)

MERCREDI 23 SEPTEMBRE 2026

17h50 **Présentation flash exposants**

Applus+Rescoll

Florent Deliane - www.applus.com

Dataphysics Instruments GmbH

Véronique Schloupt - www.dataphysics-instruments.com

GBX Scientific

Jean-Théodore Busson - <https://gbx.fr/>

Krüss GmbH

Jérémy Cohen - www.kruss-scientific.com

18h30 **Session Posters + Cocktail**

(Voir programme affiches)

20h **Dîner**

JEUDI 24 SEPTEMBRE 2026

Chair : S. Auguste

- 8h20 **INV4 - Mécanismes de renforcement mécanique dans les gels et systèmes fibrillaires**
(Conférence invitée)
A. Marcellan
SIMM, ESPCI Paris, Univ. PSL, CNRS, Sorbonne Univ., Paris (France)
- 9h00 **#36 - Mesure de l'adhésion textile-caoutchouc de composites**
N. Pujol, C. Nannette, R. Cardon, D. Fleury
Michelin - Clermont-Ferrand (France)
- 9h20 **#12 - Adhésifs de décollement à la demande : la solution 3 en 1 pour la réparation, la reprise et le recyclage**
V. Léon
Lohmann Gmbh & Co. Kg - Neuwied (Allemagne)
- 9h40 **#31 - Rate-dependent damage zone in peeling of soft polymer networks**
M. Ciccotti¹, G. Sanoja², A. Arrowood²
¹ ESPCI-SIMM - Paris (France)
² University of Texas - Austin (US)

- pause 30' -

Chair : M. Aufray

- 10h30 **INV5 - Des systèmes « one-pot » aux revêtements intelligents : l'auto-stratification au service de l'adhésion**
(Conférence invitée)
M. Jimenez¹, A. Kerrache^{1,2}, A. Lebeau¹, M. Casetta¹, F. Samyn¹, J-F. Gohy²
¹ Univ. Lille, CNRS, INRAE, Centrale Lille, UMR 8207 - UMET, Lille (France)
² Univ. Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve (Belgique)
- 11h10 **#47 - Improving interfacial properties of immiscible polymer with vitrimers**
C. Spina^{1,2}, B. Bresson¹, C. Creton¹, D. Vlassopoulos²
¹ SIMM, ESPCI Paris, PSL Univ., Paris (France)
² Institute of Electronic Structure and Laser, Univ. Crete, Heraklion (Grèce)
- 11h30 **#45 - Titanate adhesion promoter abstract**
L. Mehenni, S. Genty
Socomore - Vannes (France)
- 11h50 **#26 - Greffage de précurseurs de NHC sur surfaces métalliques : impact du mode de génération du carbène sur l'interface formée**
C. Skoumas¹, E. Ines², L. Perrault³, F. Ribot⁴, L. Fensterbank³, I. Guillot², P. Marcus¹, B. Laik², D. Mercier¹
¹ IRCP, Chimie Paristech, Université PSL, Paris (France)
² ICMPE, CNRS, Université Paris-Est Créteil, Paris (France)
³ LAM, Collège de France, Paris (France)
⁴ LCMCP, Sorbonne Université, Paris (France)
- 12h10 **Déjeuner**
- 14h00 **Programme social**
- Suivi du dîner de convivialité,
avec la remise des Prix « Dédale » et « Icare »

VENDREDI 25 SEPTEMBRE 2026

Chair : M. Girard

- 8h20 **INV6 - Des facteurs empiriques à la probabilité de survie : une troisième voie pour le dimensionnement des joints collés**
(Conférence invitée) – Prix Dédale
T. Vallée
IFAM Fraunhofer (Allemagne)
- 9h00 **#03 - Fatigue behaviour of bonded joints and modelling using an imperfect interface model with variable damage kinetics**
C. Telloli¹, F. Lebon¹, R. Rizzoni², A. Maurel-Pantel¹
¹ *Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique - Marseille (France)*
² *Department of Engineering, Univ. Ferrara (Italie)*
- 9h20 **#35 - Comportement d'assemblage collé sous choc soutenu : approche expérimentale et numérique**
D. Thévenet, A. Annovazzi, L. Taddei, J. Le Clanche
IRDL - Brest (France)
- 9h40 **#43 - Génération et impacts de gouttes géantes**
T. Lamy, E. Rio, F. Boulogne
Laboratoire de Physique des Solides - Orsay (France)
- pause 30' -

Chair : A. Maurel

- 10h30 **INV7 - Essais mécanique à rupture sur éprouvettes technologiques. Dialogue modèles-mesures**
(Conférence invitée)
P. Casari
Nantes Univ., Nantes (France)
- 11h10 **#08 - Évaluation in vitro des propriétés adhésives et cohésives des polymères filmogènes : enjeux de la tenue des dépôts de maquillage**
F. Hernandez
L'Oréal Research & Innovation – Aulnay-sous-Bois (France)
- 11h30 **#24 - Vers des modèles d'apprentissage automatique généralisables pour les assemblages collés : une approche hybride**
M. Cali¹, S. Schwartz¹, F. Lachaud¹, S. Teixeira De Freitas², E. Paroissien¹
¹ *Institut Clément Ader, Univ. Toulouse, ISAE-SUPAERO, INSA, IMT Mines Albi, UTII, CNRS - Toulouse (France)*
² *Aerospace Engineering, Tu Delft - Delft (Pays-Bas)*
- 11h50 **Clôture des Journées**

Session d'affiches

MERCREDI 23 SEPTEMBRE 2026

1. Collage structural - Assemblages - Multimatériaux

- # 07** Endommagement d'adhésifs semi structuraux - effet de la contrainte hydrostatique
J. Jumel¹, H. Zoubir¹, M. Taleb Ali², L. Bercelli¹
¹ ENSTA-IRDL (FR)
² ENIT (FR)
- # 13** Évaluation de l'adhérence lors de l'amorçage de la fissure à l'aide de l'essai de flexion en trois points : influence des hypothèses de modélisation
F. Lovero¹, S. Schwartz¹, E. Paroissien¹, F. Lachaud¹, C. Gillet¹, M. Aufray²
¹ Univ Toulouse, IMT Mines Albi, INSA Toulouse, ISAE-Supaero, CNRS, ICA - Toulouse (R)
² CIRIMAT, Univ Toulouse, CNRS, INPT, UPS - Toulouse (FR)
- # 14** Analyse numérique de l'influence des défauts de collage sur la tenue mécanique des réparations composites par collage structural
E. Hillion, F. Lachaud, E. Paroissien, S. Schwartz
Univ Toulouse, IMT Mines Albi, INSA Toulouse, ISAE-Supaero, CNRS, ICA - Toulouse (FR)
- # 15** Modélisation constitutive multiphysique des adhésifs basée sur le modèle de Mahnken-Schlimmer pour la simulation d'assemblages automobiles multi-matériaux
E. Bernard¹, T. Fkyerat², C. Cellard², L. Sohier², O. Ponte-Felgueiras³, P. Briend³, R. Créac'hcadec¹
¹ ENSTA, IRDL, UMR CNRS 6027 - Brest (FR)
² Univ. Bretagne Occidentale, IRDL, UMR CNRS 6027 - Brest (FR)
³ Stellantis, Advanced Technologies & Regional Partnerships - Chartres de Bretagne (FR)
- # 17** Optimisation de l'adhésion par plasma atmosphérique moléculaire : application à la chimie de formulation aéronautique revêtements aqueux fonctionnels aux coatings aqueux
F. Le Natur¹, P. Tingaut¹, M. Milani², J. Tardelli³
¹ Socomore - Vannes (FR)
² MPG - Leuven (BE)
³ IRT M2P - Duppigheim (FR)
- # 18** Modélisation du claquage électrique d'une colle adhésive non polymérisée dans les assemblages par pions soudo-collés acier-aluminium
V. Barras¹, A. Thibaudeau¹, T. Fkyerat², F. Le Poulain², R. Creac'hcadec²
¹ ENSTA - Brest (FR)
² UBO - Brest (FR)
- # 21** Adhésion latex sur aluminium : caractérisation et perspectives pour les thermoplastiques
F. Eddebarhi¹, J. Jumel¹, C. Goudenhooff¹, E. Chevallier²
¹ IRDL / ENSTA Bretagne - Brest (FR)
² Syensqo - Lyon (FR)

1. Collage structural - Assemblages – Multimatériaux (suite)

- # 25 Désadhésion multi-matériaux sur demande par activation thermique ou électromagnétique
J. Reynis¹, L. Ferres¹, S. Kirchner¹, B. Olalla², S. Couarraze³, P. Jouanne⁴
¹ IRT Saint Exupéry - Talence (FR)
² Valeo - Bobigny (FR)
³ Aumovio - Toulouse (FR)
⁴ Thalès Alenia Space - Cannes La Bocca (FR)
- # 33 Du squeeze flow de l'adhésif au passage du courant : modélisation post-analytique de l'évacuation de la colle dans le soudage par élément résistant
A. Thibaut¹, V. Barras¹, T. Fkyerat², L. Sohier², R. Créac'hcadec¹
¹ ENSTA - Brest (FR)
² Univ. Bretagne Occidentale - Brest (FR)
- # 39 Shear behaviour of adhesive joints using the asymmetric four-point bending test
G. Stamoulis¹, A. Ioualalen², J. Jumel²
¹ UBO, IRDL, UMR CNRS 6027 - Brest (FR)
² ENSTA, IRDL, UMR CNRS 6027 - Brest (FR)
- # 53 Investigating the bondline interphase and its role in moisture diffusion within FRP-steel adhesive joints
D. Petrov¹, M. Girard², E. Leprêtre¹, S. Chataigner¹, S. Paboeuf³, M. Deydier³
¹ Univ. Gustave Eiffel - Bouguenais (FR)
² Nantes Univ. - Saint-Nazaire (FR)
³ Bureau Veritas Marine & Offshore - Saint-Herblain (FR)
- # 55 Contraintes résiduelles de polymérisation dans un assemblage collé : effet de la cinétique de réticulation sur le développement d'un gradient de contraintes
K. Chouaieb¹, M. Girard¹, M. Peron¹, R. Tomasi², S. Laik²
¹ Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GEM), UMR CNRS 6183, Nantes Univ., Centrale Nantes, CNRS, Saint Nazaire (FR)
² CETIM : Centre Technique des Industries Mécaniques - Nantes (FR)
- # 57 Présentation des essais de fissuration en sollicitations mixtes dans les assemblages collés
J. Forler
ENSTA Bretagne – Brest (FR)

2. Surfaces

- # 30 Mouillabilité et énergie de surface des surfaces traitées en lien avec l'adhésion
M. Laupheimer, V. Schloupt
Dataphysics Instruments - Filderstadt (DE)
- # 34 Effet du traitement plasma du polypropylène sur le comportement au gel d'une goutte sessile
L. Guymard¹, A.C. Brulez^{1,2}, L. Fu¹, S. Benayoun¹
¹ LTDS, CNRS UMR 5513, École Centrale de Lyon, Ecully (FR)
² ITECH Lyon, Ecully (FR)
- # 37 Effet de la morphologie des poudres sur l'adhérence d'un revêtement cold spray basse pression sur substrat thermoplastique
J-F. Coulon¹, B. Sauvager¹, A. Al-Khatib¹, J.B. Le Cam²
¹ ECAM Louis de Broglie - Bruz (FR)
² Institut de Physique de Rennes - Rennes (FR)

2. Surfaces (suite)

- # 40 Évolution de surface vers l'auto-organisation du Ti-6Al-4V par traitements combinés : sablage, texturation laser et anodisation alcaline

G. Miranda, R. Tarpani

Univ. São Paulo - Sao Carlos (BR)

3. Adhésion de matériaux mous

- # 29 Evolution of surface energy in polypropylene cheese molds under cleaning and fouling cycles

T. Rabesolonirina¹, É. Perry², B. Paysant³, V. Humblot⁴, C. Le Floch-Fouéré⁴

¹ L'Institut Agro, INRAE, STLO - Rennes (FR)

² SERVI DORYL, R&D Department - Langeais (FR)

³ ACTALIA - Analytical Expertise Division - Poligny (FR)

⁴ Univ. Marie et Louis Pasteur, CNRS, FEMTO-ST - Besançon (FR)

5. Aspects fondamentaux de l'adhésion / Aspects industriels / Aspects prospectifs

- # 19 Mesure par impédancemétrie du gradient de teneur en eau dans une colle polymère

H. Gzara¹, G. Wasselynck¹, M. Girard²

¹ Institute of Research in Electrical Energy of Nantes Atlantic - Saint Nazaire (FR)

² Research Institute of Civil and Mechanical Engineering - Saint Nazaire (FR)

6. Aspects fondamentaux de l'adhésion / Aspects industriels / Aspects prospectifs

- # 51 Functional fillers: engineering the mineral-polymer interface for next-generation adhesives

C. Lefèvre

XATICO – Maizières-les-Metz (FR)

- # 59 Projet « Ça colle au trait » : des posters pour apprendre et communiquer en science des matériaux

M. Aufray¹, L. Rivière²

¹ CIRIMAT, Univ. Toulouse, Toulouse INP, CNRS - Toulouse (FR)

² Les deux mains - Toulouse (FR)

SESSIONS CONFÉRENCES

Conférence invitée

**ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES D'ANODISATION ET DE MISE EN
PEINTURE DANS LE SECTEUR AÉRONAUTIQUE, UN SYSTÈME
MULTI-COUCHES COMPLEXE OU LA GESTION DES INTERFACES
EST UN ENJEU MAJEUR**

J. Tardelli

IRT M2P Metz (France)

La substitution du chrome hexavalent dans les procédés de traitement de surface représente un enjeu capital pour l'industrie du traitement des métaux car le règlement européen REACH (Registration, Evaluation, Authorization and restriction of Chemicals) interdit son usage sans autorisation depuis septembre 2017. Son remplacement dans les procédés d'anodisation des alliages d'aluminium et dans les peintures anti-corrosion mis en œuvre par l'industrie aéronautique a conduit au développement de nouveaux systèmes multi-couches plus complexes mais nécessaires pour répondre aux exigences industrielles. Cette présentation expliquera cette évolution et reviendra en particulier sur les problématiques d'adhérence rencontrées ponctuellement lors de la mise en peinture de pièces anodisées sans chrome hexavalent. Une conclusion globale sera également formulée afin de souligner l'importance de la caractérisation et de la compréhension des processus physico-chimiques permettant de garantir l'adhérence d'un revêtement sur un substrat métallique, thématique particulièrement motivée par l'émergence de nouvelles technologies de traitement de surface ces quinze dernières années.

JADH00022

PROCÉDÉS VOIE SÈCHE POUR LA PRÉPARATION DE SURFACE DE PTFE AVANT COLLAGE

S. Kirchner¹, L. Ferres¹, P. Mierzejewski², N. Cuvillier³, M. Péron⁴

¹ Irt Saint Exupéry - Talence (France)

² Airbus - Talence (France)

³ Safran - Talence (France)

⁴ Arianegroup - Talence (France)

Le poly(tétrafluoroéthylène) (PTFE) est un polymère fluoré constitué de motifs répétés $(-CF_2-)_n$. Il est largement utilisé en raison de ses propriétés physico-chimiques remarquables, telles qu'une excellente résistance chimique, une grande stabilité thermique, un faible coefficient de frottement, entre autres. Ces caractéristiques sont liées à la présence de liaisons C-F et C-C particulièrement fortes au sein de la chaîne polymère, conférant au matériau une grande stabilité structurale.

Cependant, cette inertie chimique constitue également un frein majeur à l'adhésion, pourtant indispensable dans de nombreuses applications du secteur aéronautique et spatial. À l'échelle industrielle, la préparation de surface du PTFE avant collage repose généralement sur des traitements chimiques d'attaque des fluorocarbures. Ces produits sont aujourd'hui visés par les réglementations REACH, ce qui rend nécessaire le développement de solutions alternatives permettant d'assurer une adhésion efficace tout en respectant les contraintes réglementaires.

Plusieurs approches alternatives à la voie chimique ont été décrites dans la littérature pour modifier la surface du PTFE et améliorer ses propriétés d'adhésion, notamment le bombardement électronique [1], l'irradiation par faisceau d'ions [2] ou encore le dépôt de revêtements fonctionnalisés [3]. De nombreux travaux portent également sur la défluoration et la fonctionnalisation de surface par procédés plasma, qu'ils soient basse pression ou atmosphériques [4]. Les procédés laser ont également été étudiés, bien que souvent à l'aide de technologies aujourd'hui obsolètes [5]. Malgré leur potentiel, ces différentes méthodes n'ont que rarement fait l'objet d'évaluations comparatives vis-à-vis des méthodes conventionnelles.

Dans ce contexte, cette étude propose une investigation exploratoire de la préparation de surface du PTFE avant collage, basée sur différentes technologies par voie sèche. Les procédés étudiés incluent des traitements laser nanoseconde dans l'infrarouge et l'ultraviolet, ainsi que des activations par plasma atmosphérique, éventuellement couplées à un dépôt de précurseur par plasma. Des approches combinant ces différentes techniques sont également examinées. Les assemblages, réalisés à l'aide d'un adhésif époxy, sont caractérisés par des essais de pelage. Les performances obtenues sont comparées à celles issues des traitements chimiques conventionnels, afin d'évaluer le potentiel des procédés voie sèche comme alternatives industrielles pour l'amélioration de l'adhésion du PTFE.

Références

- [1] J. A. Kelber, J. W. Rogers, et S. J. Ward, « Effects of low-energy electron bombardment on the surface chemical structure and adhesive properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) », *J. Mater. Res.*, vol. 1, no 5, p. 717-723, 1986
- [2] S. W. Lee, et al. , « Surface modification and adhesion improvement of PTFE film by ion beam irradiation », *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At.*, vol. 219-220, p. 963-967, 2004
- [3] C. Li et al., « Constructing chemically durable hydrophilic interfaces on PTFE via hybrid covalent networks for oil-in-water separation », *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 247, p. 112021, 2026
- [4] A. Komlev et al., « Improved Adhesion of PTFE Surfaces via Low-Power DC Plasma and Fast Neutrals Flow », *Coatings*, vol. 15, no 6, p. 644, 2025
- [5] J. Reichert, S. Brückner, H. Bartelt, et K. D. Jandt, « Tuning Cell Adhesion on PTFE Surfaces by Laser Induced Microstructures », *Adv. Eng. Mater.*, vol. 9, no 12, p. 1104-1113, 2007

JADH00028

OPTIMISATION DE L'ADHÉSION DES REVÊTEMENTS ANTICORROSION PAR PRÉPARATION DE SURFACE LASER ROBOTISÉE SUR STRUCTURES COMPLEXES EN ACIER

E. Gourlaouen¹, V. Guillemand Vu², A. Fahs¹, E. Aragon¹

¹ Univ Toulon, Mapiem, Toulon, France - La Garde (France)

² Meliad Sas, Les Sorinières, France - Les Sorinières (France)

L'efficacité et la durabilité des revêtements anticorrosion, dans le cadre de la maintenance et de la construction neuve de structures en acier, sont largement influencées par la préparation de surface. En pratique, des procédés par projection d'abrasif (e.g. sablage) sont couramment employés dans différents secteurs, tels que l'industrie maritime [1]. Néanmoins, l'implémentation de ces traitements de surface au sein de structures complexes et exiguës, comme les ballasts, est difficile pour des raisons techniques, économiques et d'hygiène/sécurité. Des solutions robotisées peuvent répondre à ces contraintes tout en garantissant de bonnes performances des revêtements, bien que leur opérabilité soit limitée à des environnements accessibles par rover ou véhicules à guidage automatique.

Dans le cadre du projet PARME financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR)*, le consortium de collaborateurs industriels et académiques vise à réaliser, à la fois, la préparation de surface et la remise en peinture, même dans les zones les plus exiguës, en utilisant un robot d'inspection polymorphe dont l'architecture révolutionnaire et brevetée lui confère une agilité sans précédent. Compte tenu de la légèreté du transporteur robotisé, la préparation de surface est conduite de manière innovante *via* un procédé de traitement laser-pulsé qui présente de multiples avantages pour l'adhésion des revêtements, dont la récupération d'effluents à la source, limitant ainsi la contamination de surface. En effet, contrairement à une préparation de surface par sablage, qui engendre des topographies de surface aléatoires et grossières, le traitement de surface par laser permet de générer des morphologies contrôlées à l'échelle micrométrique, contribuant ainsi à améliorer l'ancrage mécanique du revêtement au substrat métallique [2]. De plus, l'irradiation laser peut également, de manière synergique, induire des modifications chimiques (e.g. création d'oxydes), qui augmentent l'énergie de surface du substrat et, *in fine*, l'adhérence du revêtement ; à l'inverse d'une simple projection d'abrasif, qui n'induit qu'une rugosité par déformation plastique du substrat [3,4]. Plus important encore, la large plage de paramètres de traitement laser offre un moyen efficace d'optimisation de l'adhésion et de la durabilité des revêtements anticorrosion.

Dans cette perspective, l'influence des paramètres tels que la fluence (i.e. densité d'énergie), la fréquence d'impulsion et le recouvrement sur les modifications chimiques et morphologiques (e.g. rugosité) de différentes nuances d'acier a été explorée. Dans un second temps, des essais d'arrachement ont été effectués pour évaluer l'adhésion d'un primaire époxy commercial afin d'identifier les paramètres laser qui maximisent l'adhésion à l'interface revêtement/acier.

Références

- [1] Kim et al. (2021). Coatings 11 (12), 1510. <https://doi.org/10.3390/coatings11121510>.
(Peinture Assistée par Robot pour Milieu Exigu) project and France 2030, grant number : ANR-23-DMRO-0011.
- [2] Caraguay et al. (2023). Progress in Organic Coatings 180, 107558.
<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107558>.
- [3] Saffioti et al. (2025). Procedia Computer Science 253, 3143-3150. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.039>.
- [4] Rotella et al. (2015). International Journal of Adhesion and Adhesives 63, 87-95.
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.08.009>

Remerciements

*Ce travail est financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet PARME

JADH00010

TEXTURATION LASER SELECTIVE DE PEINTURES PRIMAIRES POUR LE COLLAGE ADHESIF SANS ENDOMMAGEMENT DU SUBSTRAT

J. Reynis¹, L. Ferres¹, P. Mierzejewski², N. Cuvillier³, M. Péron⁴, S. Kirchner¹

¹ IRT Saint Exupéry - Talence (France)

² Airbus - Toulouse (France)

³ Safran - Itteville (France)

⁴ ArianeGroup - Le Haillan (France)

Dans les secteurs aéronautique et spatial, le recours aux assemblages collés s'intensifie en raison de leurs avantages en termes de réduction de masse, de répartition homogène des contraintes et de compatibilité avec des matériaux dissemblables, notamment les métaux et les composites. Dans ce contexte, de nombreuses structures sont protégées par des systèmes de peinture multicouches intégrant des primaires anticorrosion. Toutefois, la présence de ces couches peintes constitue un verrou pour le collage adhésif, les propriétés de surface du primaire n'étant pas intrinsèquement optimisées pour l'adhésion.

Afin de pallier ces limitations, la préparation de surface constitue une étape clé pour garantir la qualité et la durabilité des assemblages collés. Dans le cas de substrats peints, cette préparation vise à modifier les propriétés physico-chimiques et topographiques du primaire afin d'améliorer l'adhésion de l'adhésif. Les méthodes conventionnelles utilisées en industrie sur pièces représentatives, telles que le sablage ou ponçage, permettent d'augmenter la rugosité de surface et d'éliminer les contaminants. Toutefois, ces procédés présentent des limites importantes : ils sont souvent peu sélectifs, peuvent entraîner une altération du primaire, voire un endommagement du substrat sous-jacent, et génèrent des variabilités ainsi que des contraintes environnementales et industrielles.

Les traitements de surface par laser suscitent un intérêt croissant en raison de leur automatisation ainsi que leur capacité à modifier de manière localisée et contrôlée les propriétés de surface. En ajustant les paramètres opératoires, tels que la fluence, fréquence et le taux de recouvrement, il est possible de générer des micro- et nanostructures favorables à l'adhésion [1]. Appliquée aux systèmes peints, cette approche offre un potentiel intéressant pour texturer sélectivement le primaire (majoritairement polymère) sans affecter le substrat sous-jacent. Néanmoins, les mécanismes d'interaction laser-revêtement, en particulier pour les peintures primaires, restent encore insuffisamment compris, et le contrôle de la sélectivité du procédé constitue un verrou majeur pour son déploiement industriel.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est d'évaluer la faisabilité d'une texturation laser de primaires de peinture en vue d'améliorer les performances en collage adhésif au travers d'essais de pelage, tout en préservant l'intégrité des substrats métalliques et composites. À cette fin, l'influence des paramètres laser sur les modifications de surface du primaire est étudiée, en lien avec les propriétés d'adhésion obtenues. Les travaux s'appuient sur les moyens expérimentaux disponibles à l'IRT, comprenant deux sources laser nanosecondes infrarouge et ultraviolet.

Références

Muhammad Adeel Khan et al., « Influence of Laser Surface Texturing on Adhesive Bonding: A Comprehensive Review on Surface Morphology and Strength Enhancement », *Optics & Laser Technology* 191 (décembre 2025): 113339, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.113339>.

Conférence invitée

INFLUENCE RELATIVE DE LA CHIMIE ET DE LA TOPOGRAPHIE DE SURFACE SUR L'ADHÉSION CELLULAIRE : INTÉRÊT DES REVÊTEMENTS À BASE D'AMINES

H.S. Salapare III¹, S. Staehlke², A. Ponche¹, T. Petithory¹, R. Ramos¹, S. Seemann², M. Dubs³, H. Rebl², A. Wartenberg³, L. Pieuchot¹, F. Bally-Le Gall¹, P. Fioux¹, D. Koczan³, F. Haack⁴, M. Bielfeldt²,

A. Airoudj¹, V. Roucoules¹, M. Schnabelrauch³, J. Barbara Nebe^{2,5}, K. Anselme¹

1. Institut de Science des Matériaux de Mulhouse (IS2M), CNRS, UHA, UMR 7361, Mulhouse, France

2. Institute for Cell Biology, University Medical Center Rostock, Rostock, Germany

3. Department of Immunology, Rostock University Medical Center, Rostock, Germany

4. Institute for Visual and Analytic Computing, University of Rostock, Rostock, Germany

5. Department of Life, Light & Matter, University of Rostock, Rostock, Germany

La prévalence croissante des maladies liées à l'âge a accru la demande d'implants orthopédiques offrant une intégration osseuse supérieure, obtenue grâce à une topographie et une chimie de surface optimisée. Notre équipe a développé de nombreux travaux sur la possibilité de contrôler le devenir de cellules osseuses *in vitro* grâce à la topographie de substrats métalliques ou céramiques (1, 2). Plus récemment nous avons mis en évidence pour la première fois, en collaboration avec des collègues allemands, qu'un revêtement d'amine empêchait l'orientation cellulaire sur des surfaces rainurées (3). **Ceci a été la première démonstration de la possibilité de supprimer un signal topographique fort en modifiant la chimie de surface.** Dans le but de déterminer le rôle de la densité de surface et/ou du volume des groupes amines dans cette réponse cellulaire, nous avons développé des nanocouches contrôlées riches en amines en utilisant trois techniques différentes permettant d'augmenter les niveaux de contrôle de la composition chimique : (a) la polymérisation par plasma, (b) le greffage covalent de nano-revêtements à base de polymères riches en amines avec une teneur variable en groupes amines, et (c) des monocouches auto-assemblées avec des groupes amines terminaux. L'adsorption quantitative des protéines a révélé des profils dépendants de l'architecture. Malgré leurs différences architecturales moléculaires marquées, les trois revêtements ont tous abrogé le guidage par contact cellulaire, démontrant que l'adhérence améliorée médiée par les protéines peut dominer des signaux topographiques forts. La densité des groupes amines est apparue comme un déterminant général de la réponse cellulaire, avec des relations positives cohérentes entre la teneur en amines et la suppression du guidage par contact sur des surfaces présentant une polarité de charge, une épaisseur de revêtement et une composition de substrat différentes. En dissociant la densité des amines de l'architecture moléculaire, cette étude comparative révèle que les relations structure-fonction dans les surfaces fonctionnalisées par des amines sont multidimensionnelles : les cellules réagissent à l'adhésion médiée par les protéines comme un mécanisme sous-jacent commun aux trois architectures, mais l'architecture moléculaire des amines module l'amplitude, la cinétique et le phénotype cellulaire spécifique obtenu.

1. K. Anselme et al., The relative influence of topography and chemistry of TiAl6V4 surfaces on osteoblastic cell behavior, *Biomaterials* (2000) doi: [10.1016/S0142-9612\(00\)00042-9](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(00)00042-9)

2. E. A. dos Santos et al., Chemical and topographical influence of hydroxyapatite and beta-tricalcium phosphate surfaces on human osteoblastic cell behavior, *Journal of Biomedical Material Research A* (2009) doi: [10.1007/s10856-007-3347-4](https://doi.org/10.1007/s10856-007-3347-4)

3. C. Mörke et al., Abrogated Cell Contact Guidance on Amino-Functionalized Microgrooves, *ACS Applied Materials and Interfaces* (2017), doi: [10.1021/acsami.6b16430](https://doi.org/10.1021/acsami.6b16430)

4. S. Seemann et al., Response of osteoblasts on amine-based polymer coatings correlates with the amino group density, *Molecules* (2023), doi: [10.3390/molecules28186505](https://doi.org/10.3390/molecules28186505)

JADH00023

FORMATION IN SITU DE MONOCOUCHEs AUTO-ASSEMBLÉES DE CARBÈNES N-HÉTÉROCYCLIQUES SUR OXYDE DE CUIVRE

D. Mercier¹, M. Michaux¹, S. Ba Sowid², L. Perrault², S. Zanna¹, A. Seyeux¹, P. Marcus¹,
F. Ribot³, L. Fensterbank², D. Costa¹

¹ Institut De Recherche De Chimie Paris - Paris (France)

² Laboratoire D'activation Moléculaire - Paris (France)

³ Laboratoire De Chimie De La Matière Condensée De Paris - Paris (France)

Au cours des dernières années, le développement d'inhibiteurs organiques pour la protection des métaux contre la corrosion a suscité un intérêt croissant. Parmi eux, les carbènes N-hétérocycliques (NHC) occupent une place particulière en raison de leur forte affinité pour les surfaces métalliques et de leur grande stabilité chimique. Capables de former des liaisons covalentes avec les métaux, ils constituent une alternative prometteuse aux monocouches auto-assemblées classiques, notamment sur l'or et le cuivre. Toutefois la littérature montre que leur adsorption dépend de nombreux paramètres, tels que la structure moléculaire, la méthode de dépôt, la nature du substrat ou encore le temps d'exposition, soulignant l'importance des effets cinétiques. Dans ce contexte, les mécanismes d'adsorption des précurseurs de NHC sur le cuivre naturellement oxydé demeurent encore mal compris.

Cette étude vise à élucider le mécanisme et la cinétique d'adsorption du bromure de bisdodécylimidazolium (IC12) déposé en phase liquide (10^{-2} M dans l'éthanol) sur du cuivre naturellement oxydé (Cu_2O , 2,5 nm), sous atmosphère contrôlée en boîte à gants sous argon. Une approche combinant spectroscopie de photoélectrons X (XPS) et spectrométrie de masse des ions secondaires en temps de vol (ToF-SIMS) met en évidence une dissolution complète de la couche d'oxyde native dans les deux premières heures d'exposition, suivie de l'adsorption de la molécule intacte sur le cuivre métallique entre 2 et 18 h. Cette adsorption s'effectue via la formation d'une liaison C-Cu selon deux modes distincts : une adsorption directe, minoritaire, et une adsorption majoritaire impliquant la formation de complexes de type $(\text{IC12})_2\text{-Cu}$.

L'analyse quantitative révèle une densification progressive du film organique ainsi qu'une organisation des chaînes alkyles au cours de l'immersion. La caractérisation met également en évidence une co-adsorption de l'imidazolium et du contre ion bromure. Une étude complémentaire du rôle du contre ion montre que le bromure favorise la dissolution initiale de l'oxyde, agissant comme une étape de prétraitement qui permet ensuite le greffage de l'imidazolium sur le cuivre métallique. Après 18 h d'immersion, le film atteint une densité de 2,2 molécules·nm⁻² et une épaisseur de 1,4 nm, compatibles avec une adsorption quasi verticale des molécules, les chaînes alkyles étant inclinées d'environ 35° par rapport à la normale à la surface. Enfin, les essais de réexposition à l'air montrent qu'au-delà de 4 h de traitement, les surfaces modifiées présentent une forte limitation de la réoxydation, confirmant la formation d'une couche organique dense et protectrice.

JADH00038

AMÉLIORATION DE L'ADHÉSION MÉTAL-POLYMÈRE THERMOPLASTIQUE PAR TRAITEMENTS DE SURFACE DANS LES ASSEMBLAGES THERMOCOMPRESSÉS

M. Mahi¹, L. Trouillet-Fonti², S. Duluard¹, M. Aufray¹

¹ Cirimat - Toulouse (France)

² Syensqo - St Fons (France)

Les assemblages dits «dissymétriques» ou «hybrides» sont composés de deux parties de natures différentes : métaux, céramiques ou polymères. Ces assemblages permettent de combiner les propriétés de chacun des matériaux assemblés afin de concevoir un matériau plus adapté à des applications précises. Dans le cas des assemblages métal/thermoplastique, la partie polymère permet d'alléger la masse totale de l'assemblage (aspect recherché dans les transports aéronautique et automobile), mais aussi d'allier une partie isolante à un conducteur électrique (aspect recherché dans l'électronique et la conception des batteries) [1,2].

La mise en forme par assemblages directs permet de mettre en commun la partie métallique et la partie polymérique de l'assemblage sans troisième corps (colle, vis, boulons, etc.). Généralement, ces assemblages sont réalisés par des techniques dites « in situ », par exemple lors de la mise en forme du polymère par voie fondue [3-4].

Pour pallier le manque de faible réactivité des polymères thermoplastiques, les techniques d'assemblage in situ exploitent les effets d'ancrage mécanique par infiltration de polymère dans les rugosités des substrats métalliques ainsi que l'effet des traitements de surface sur les substrats métalliques en amont de l'étape d'assemblage. Les traitements de surface permettent de modifier les propriétés physico-chimiques de surface afin d'augmenter les affinités chimiques entre les deux matériaux [5].

La problématique de nos travaux consiste à déterminer dans quelle mesure les traitements de surface sélectionnés améliorent l'adhésion à l'interface métal/thermoplastique. Pour cela, des substrats en aluminium et des films de polyamide-6 ont été assemblés par thermocompression. Avant l'assemblage, les substrats en aluminium ont reçu différents traitements de surface : brut (pas de traitement), dégraissé et décapé, sablé, ou recouvert d'une couche polymère innovante développée par Syensqo. Ces quatre conditions permettent de comparer l'adhérence dans les assemblages hybrides et d'évaluer l'importance relative de la rugosité et de la chimie de surface. Les effets des traitements seront évalués par des mesures d'adhérence en flexion trois points (norme ISO 14679), des essais de scratch-tests et des analyses de surface.

Références

- [1] S. Kleinbaum, C. Jiang, et S. Logan, « Enabling sustainable transportation through joining of dissimilar lightweight materials », *MRS Bull.*, vol. 44, no 8, p. 608-612, août 2019, doi: 10.1557/mrs.2019.178
- [2] M. Delogu, L. Zanchi, C. A. Dattilo, et M. Pierini, « Innovative composites and hybrid materials for electric vehicles lightweight design in a sustainability perspective », *Mater. Today Commun.*, vol. 13, p. 192-209, déc. 2017, doi: 10.1016/j.mtcomm.2017.09.012.
- [3] S. T. Amancio-Filho et J. F. Dos Santos, « Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: Recent developments and trends », *Polym. Eng. Sci.*, vol. 49, no 8, p. 1461-1476, août 2009, doi: 10.1002/pen.21424.
- [4] P. Kah, R. Suoranta, J. Martikainen, et C. Magnus, « Techniques for joining dissimilar materials: Metals and polymers », *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 36, p. 152-164, avr. 2014.
- [5] N. G. Gonzalez-Canche, E. A. Flores-Johnson, P. Cortes, et J. G. Carrillo, « Evaluation of surface treatments on 5052-H32 aluminum alloy for enhancing the interfacial adhesion of thermoplastic-based fiber metal laminates », *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 82, p. 90-99, avr. 2018, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2018.01.003.

JADH00027

CRACKLESS TECHNOLOGY FOR NEW, SUSTAINABLE AND HIGH-PERFORMANCE CYANOACRYLATE SUPERGLUES

E. Faggi, P. Garra

Bostik (Spain)

Cyanoacrylate adhesives, introduced in the 1950s as super glues, have remained largely unchanged due to the constraints of conventional synthesis, which relies on a high-temperature pyrolysis step. This step limits the range of accessible monomers and requires high energy consumption. Industrial production has historically focused on two monomers only: ethyl cyanoacrylate (ECA 1960s) and methoxyethyl cyanoacrylate (MECA – 1995s).

Crackless Technology: Eliminating Pyrolysis

Recently, Bostik, the adhesive division of Arkema, developed and industrialized a novel synthesis route—the Crackless Technology—that removes the pyrolysis stage. This innovation enabled the production of new cyanoacrylate monomers previously inaccessible at scale, while significantly reducing energy consumption and environmental impacts. This new process was successfully scaled up resulting in the industrial production and commercialization of different alkoxyalkyl cyanoacrylate monomers in 2021.

Heptyl Cyanoacrylate: A new molecule

Arkema produces bio-based heptanol as a co-product of its monomer for polyamide-11. Leveraging this biobased alcohol with the new Crackless process, Bostik developed heptyl cyanoacrylate (HpCA), a new-to-the world bio-based monomer that breaks a 30-year period without any new molecules in the instant-adhesive market. HpCA-based adhesives exhibit distinct advantages over conventional formulations:

- No blooming: Minimal vapor-phase polymerization, eliminating whitening on substrates.
- Thermomechanical performance: Increased ductility and thermal stability up to 95 °C.
- Hydrophobicity: Enhanced water resistance. HpCA is the first instant adhesive to offer hygrothermal aging resistance at 85°C and 85% humidity for more than 1,000 hours, compared to only 170 hours for ECA.

Sustainability and Industrial Outlook

Born2Bond™ K85 contains 60% bio-based carbon, derived from non food-competing resources. This breakthrough innovation addresses critical limitations of traditional cyanoacrylate adhesives, offering improved performance and renewable raw materials at a competitive cost, opening the route to new applications for instant adhesives in particular in the field of precision assembly.

Industrialization and commercial roll out of this new adhesive technology started in August 2024.

Conférence invitée

SÉCHAGE DE GOUTTES/FLAQUES DE SANG HUMAIN

D. Brutin

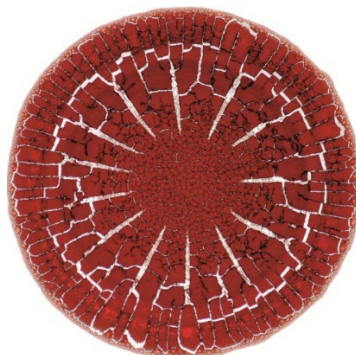
Aix-Marseille Univ., Marseille (F)

Le sang est sans doute l'un des fluides les plus fascinants et les plus exigeants qu'il soit donné d'étudier à un chercheur non spécialisé dans le biomédical. Loin du liquide simple auquel on le réduit parfois, il constitue un fluide biologique complexe : une suspension concentrée de cellules déformables, les globules rouges, dispersés dans un plasma lui-même chargé de protéines et d'électrolytes. Cette composition confère au sang un comportement rhéologique non-newtonien et des propriétés de mouillage, d'étalement et de séchage qui défient les modèles établis pour les fluides usuels.

J'aborderai d'abord les enjeux et la complexité du sang comme objet d'étude sous l'angle qui structure depuis plusieurs années mes travaux : celui du séchage d'une goutte de sang humain à des fins de pré-diagnostic médical. Lorsqu'une goutte de sang s'étale puis sèche sur une surface, elle laisse un dépôt organisé, structuré en couronne périphérique, en réseau de fractures et en motifs qui portent la signature de sa composition et des conditions dans lesquelles elle s'est déposée. Comprendre ce séchage suppose de remonter en amont, vers les phénomènes de mouillage et d'étalement qui gouvernent la mise en place de la goutte et sa composition locale : angle de contact, ligne triple, redistribution des cellules par écoulements internes. Ces mécanismes, riches de physique fondamentale, ouvrent des perspectives concrètes du côté biomédical, où la morphologie d'un dépôt asséché peut renseigner sur l'état physiologique ou pathologique du donneur, et faire du séchage d'une simple goutte un outil de pré-diagnostic.

Je basculerai ensuite vers un tout autre terrain, celui des sciences criminelles, où les échelles changent et les enjeux se déplacent. Sur une scène de crime, on ne raisonne plus à l'échelle d'une goutte isolée, mais de traces multiples, de projections et de flaques dont les volumes sont sans commune mesure avec ceux du laboratoire. Une flaque de sang ne sèche pas comme une goutte : sa dynamique dépend de son volume, du substrat, de la température et de l'hygrométrie ambiantes, et la dynamique de son séchage devient porteuse d'information temporelle. Interpréter correctement ces traces, leur forme, leur étalement, l'avancement de leur coagulation et de leur dessiccation, c'est potentiellement reconstituer la chronologie et le déroulement d'événements, avec des conséquences directes sur le plan judiciaire. Les enjeux y sont d'autant plus grands que l'erreur d'interprétation n'a plus seulement un coût scientifique, mais humain.

Cette intervention sera ainsi l'occasion de montrer comment une même physique des interfaces, celle du mouillage, de l'étalement et du séchage, relie deux mondes que tout semble opposer : la paillasse du laboratoire et la scène de crime. Le sang, fluide unique par sa complexité, se révèle un formidable objet de recherche fondamentale autant qu'un témoin dont il faut apprendre à lire les traces.



JADH00048

WETTING AND SPREADING OF WATER DROPLETS ON ICE

W. Sarlin¹, D.V. Papa², A. Rosenbaum², R. Grivet², A. Huerre¹, T. Séon³, C. Josserand²

¹ Msc - Paris (France)

² Ladhyx - Palaiseau (France)

³ Ifadyfe - Buenos Aires (Argentina)

A wide variety of ice structures result from the interplay between phase change (freezing or melting) and capillary flows (such as drops, rivulets and thin liquid films), including ice accretion on airplanes, icicles, frozen rivers and aufeis. However, despite this ubiquitous coexistence of ice and capillary flows in nature, several open questions remain regarding their interaction and the resulting ice morphogenesis [1]. In particular, does water wet its own solid phase?

To tackle this question, we report experiments of water droplet deposition on ice layers with varying surface temperatures. Below 1 K of undercooling, the entire spreading dynamics is unaffected by thermal effects and phase change, so that conditions of mechanical and thermal equilibrium are closely approached. In this regime, the short time motion of the contact line is driven by an inertial-capillary balance while the evolution towards mechanical equilibrium is described by a viscous-capillary dynamics and is therefore capillary - and not thermally - related. This allows us to provide an accurate measurement of the macroscopic contact angle of water on ice [2].

Références

[1] A. Huerre, C. Josserand, and T. Séon. “Freezing and Capillarity”. In: Annu. Rev. Fluid Mech. 57. Volume 57 (2025), pp. 257–284.

[2] W. Sarlin, D. V. Papa, R. Grivet, A. Rosenbaum, A. Huerre, T. Séon, and C. Josserand. “The macroscopic contact angle of water on ice”. In: J. Fluid Mech. 1019 (2025), A31.

JADH00006

ALTERNATIVE AUX PFAS POUR LA FABRICATION DES CIRCUITS ELECTRONIQUES EN 3 DIMENSIONS

P. Montméat, T. Enot, F. Fournel, M. Vacon, A. Thiolon, C. Ladner

CEA

Depuis les années 2000, on assiste à l'éclosion d'une nouvelle méthode de fabrication des composants électroniques : il s'agit de l'intégration en 3 dimensions 3D [1]. Cette méthode consiste à empiler les composants les uns sur les autres au lieu de les assembler en deux dimensions sur un même support. Elle est censée réduire les délais d'interconnexion et la consommation électrique, mais surtout elle offre la possibilité d'intégrer au sein d'un même système des composants ou des matériaux hétérogènes.

Empiler des circuits nécessite la mise en œuvre de procédés de collage ou de démontage. Pour chacun, on utilise souvent des composés organiques fluorés de synthèse bien connus pour leur propriétés antiadhésives. Certaines de ces molécules appartiennent à la famille des PFAS (Substances poly ou perfluoroalkyles) dont le squelette présente au moins un groupement CF₂ ou CF₃. La grande stabilité chimique et thermique de ces groupements génère une pollution durable associée à de graves risques pour la santé. Le 4 avril 2024, l'Assemblée Nationale a adopté une proposition de loi qui vise à réglementer l'utilisation de ces substances dangereuses [2].

Dans le domaine du collage des composants en 3D, on propose ici de montrer dans quelles mesures il est possible de substituer aux PFAS des molécules non fluorées et bien moins toxiques. Nous avons identifié plusieurs chlorosilanes apolaires qui présentent une alternative durable aux molécules fluorées. Deux axes feront l'objet de la présentation : la fabrication de circuits amincis [3] et le collage auto-assemblé des puces [4]. Les performances des différents revêtements seront évaluées du point de vue de l'énergie de surface, de l'adhérence et de l'hydrophobie.

Références

[1] G. Poupon, Techniques de l'Ingénieur, 2016, E3401 V1

[2] Le Monde du 4 Avril 2024

[3] J. Charbonnier, 59th ECTC, 2009, pp.865-871

[4] T. Fukushima, IEEE Transaction on Components Packaging and Manufacturing Technology, Vol 1-12, 2011, pp.1873-1884

JADH00020

EFFECT OF SURFACE TREATMENT, PRE-COATING, AND ADHESIVE TYPE ON THE BONDING PERFORMANCE OF S275 STEEL

A. Bechikh, S.F. Legry, A. Madureira, J. Chambon, M. Lallemand, A. Maurel-Pantel, F. Lebon

Aix-Marseille Univ, Cnrs, Centrale Marseille, Lma - Marseille (France)

Structural bonding is increasingly used in civil engineering, automotive, aerospace, and marine applications due to its numerous advantages, including weight reduction, continuous load transfer, vibration damping, and the ability to join dissimilar materials. However, the main limitation of this technique lies in the inherently low adhesion properties of materials in their as received state, which makes surface preparation a critical step prior to bonding. Various surface treatments are therefore commonly applied to improve adhesion by modifying surface roughness and wettability. However, these treatments must be adapted to the nature of the substrate, as a given method may not be equally effective for all materials. Nevertheless, the performance of bonded joints does not depend solely on surface condition, but is also influenced by other parameters such as adhesive type and service environment. In this context, the present work investigates the steel-steel bonding behavior of S275 structural steel by combining different surface treatment strategies and adhesive systems in order to identify the most favorable conditions for adhesion. In this study, both mechanical and chemical surface treatments were considered. Sandblasting was carried out at three pressures (2, 2.5, and 3 bar) in order to identify the optimal surface condition for bonding. A precoating treatment based on a 10 wt% resin-acetone mixture was also evaluated, where a diluted resin layer was applied prior to the adhesive to improve contact by filling surface cavities and promoting better mechanical interlocking. In addition, two structural adhesives, Sikadur-30 and Araldite AV 138M-1, were tested under identical conditions to assess the influence of adhesive type on bonding performance. Following these treatments, the surface state was characterized through roughness and wettability measurements. Surface roughness parameters Ra and Rz were measured using a MarSurf M410 tactile profilometer, while the fractal dimension Df was estimated from the surface profiles. Wettability was evaluated through static contact angle measurements of distilled water using a Krüss DSA30 goniometer. Finally, adhesion performance was assessed by Double Lap Shear Joint tests using a universal testing machine. The results show that sandblasting significantly modifies the surface roughness, with both Ra and Rz decreasing as the pressure increases. The effect of sandblasting also depends on the initial surface state, increasing roughness for initially smoother surfaces and reducing it for initially rougher ones. Wettability was improved after sandblasting, with the lowest contact angle obtained at 2 bar. However, the highest shear strength was achieved at 3 bar, indicating that optimal adhesion does not correspond to maximum wettability, but rather to a more suitable surface topography. Fractal dimension increased after sandblasting but remained almost unaffected by pressure variation. The comparison of adhesives revealed that Sikadur-30 provides higher shear strength and a mixed failure mode, whereas Araldite AV 138M-1 leads to lower strength with predominantly adhesive failure. Finally, the precoating treatment improves adhesion compared to the untreated condition but reduces the performance achieved with sandblasting alone, likely due to the formation of a less efficient interfacial layer.

Références

B. Wang, Xiaozhi Hu, Pengmin Lu, Improvement of adhesive bonding of grit-blasted steel substrates by using diluted resin as a primer, International Journal of Adhesion and Adhesives, Volume 73, 2017, Pages 92-99, ISSN 0143-7496

JADH00042

ENHANCING FIBER/MATRIX INTERFACE ADHESION IN BIO-BASED COMPOSITES BY COLD PLASMA SURFACE ACTIVATION

F. Perrier-Michon¹, S.A.E. Boyer², A. Burr², V.J. Rohani¹

¹ Persee, Mines Paris Psl - Valbonne (France)

² Cemef Cnrs 7635, Mines Paris Psl - Valbonne (France)

Bio-based composites reinforced with plant fibers are a promising alternative to synthetic and petro-based materials, particularly for fluid transport applications. Their growing interest is driven by key advantages such as low density, cost-effectiveness, biodegradability, and reduced environmental footprint.

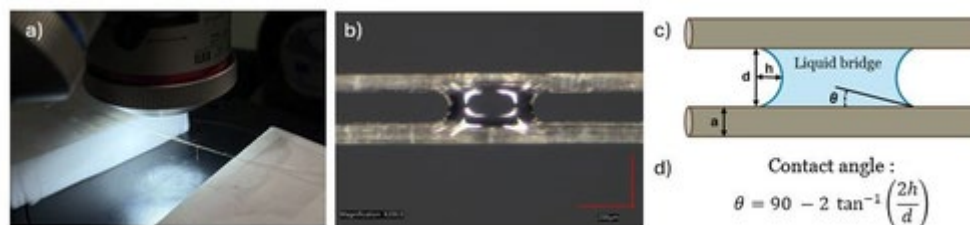
However, the performance of these composites strongly depends on the quality of the fiber–matrix interface, which governs stress transfer efficiency and the overall cohesion of the material. Interfacial adhesion between plant fibers and thermoplastic matrices is often limited by surface contaminants, such as natural waxes and extractives, as well as polarity mismatches between constituents. These limitations affect fiber wetting, reduce interfacial interactions, and may compromise the mechanical and rheological properties of the composite.

This study investigates an eco-friendly surface modification strategy based on cold plasma pre-treatment of flax fibers to improve interfacial adhesion with a thermoplastic matrix. This solvent-free process removes surface impurities and modifies fiber topography through surface roughness generation, enhancing physical anchoring at the fiber–matrix interface by increasing mechanical interlocking, as evaluated by scanning electron microscopy (SEM). In addition, cold plasma induces physicochemical surface modifications, increasing surface energy and improving affinity with the polymer matrix. These changes were characterized using an innovative surface tension measurement method (Figure 1) [1], revealing an increase of 11 mN/m in treated flax fibers (3 cycles of 7 min at 425 W under air atmosphere). This increase improves fiber wettability, promotes better interfacial wetting, and strengthens fiber–matrix interactions, as confirmed by rheological behavior and SEM observations of the resulting composite.

These results highlight cold plasma treatment as an efficient tool for engineering high-performance interphases and improving adhesion in bio-based composites, opening new opportunities for sustainable materials in fluid transport and structural applications.

Références

[1] S.L. Schellbach, S.N. Monteiro, J.W. Drelich, A novel method for contact angle measurements on natural fibers, *Mater. Lett.*, 164, **2016**, 599-604, doi: 10.1016/j.matlet.2015.11.039



Contact angle measurement by liquid bridge method

JADH00016

MÉCANISMES DU RENFORCEMENT PAR PLASMA DE L'ADHÉSION MOLÉCULAIRE

A. Maurel-Pantel¹, F. Lebon¹, F. Fournel², J. Debray³, A. Talneau⁴, V. Menard⁵, C. Hecquet⁶

¹ Aix Marseille Université - Marseille (France), ² CEA LETI - Grenoble (France), ³ Institut Néel - Grenoble (France), ⁴ C2N - Paris (France), ⁵ ENSICAEN - Caen (France), ⁶ Institut d'Optique - Paris (France)

Ce projet vise à identifier et comprendre les mécanismes qui se produisent lors du collage spontané (adhésion puis adhérence par recuit) et quelles sont les conséquences de la préparation par plasma des surfaces. Cette compréhension ouvrira alors la voie à de nouvelles procédures d'adhésion, et à l'étude d'interfaces hybrides. Les partenaires du projet ont chacun une expertise reconnue dans le domaine de l'adhésion moléculaire, présentées dans plusieurs communications et publications [1]. Toutefois les connaissances nécessaires à la spatialisation de la technologie et l'application à des nouveaux matériaux ne sont pas encore claires, en effet, certaines zones d'ombre subsistent dans la compréhension mécano-chimico-physique des liens entre la préparation des surfaces de collages (rugosité, énergie de surface, liaisons pendantes disponibles...) et les énergies d'adhésion obtenues. Pour cela, nous proposons d'amorcer au sein du consortium des actions collaboratives permettant de travailler à une description théorique des phénomènes mis en jeux au niveau de l'adhésion et de son renforcement pour créer une adhérence de tenue mécanique à évaluer en abordant les points suivants :

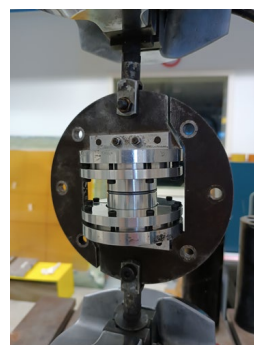
- La maîtrise des procédés de mise en œuvre, notamment les traitements par plasma [2] et les préparations de surface, et l'explicitation de leurs implications dans les phénomènes d'adhésion.
- Une caractérisation des propriétés mécaniques des assemblages sous sollicitations complexes.
- Une amélioration nette de la tenue mécanique des assemblages en cherchant des moyens de renforcer la liaison moléculaire de l'adhésion.
- La mise en place de modèles (mécanique, physique...) permettant de rendre compte des phénomènes de l'adhésion et de l'adhérence de l'échelle de la liaison pendant au comportement de la structure

Le projet se propose de mettre en place un plan d'expériences sur des disques de wafer de Silicium adhésés et sur des cylindres de silices fondue pour comparer l'effet des traitements plasmas sur l'énergie d'adhérence des interfaces créées en se limitant à des recuits à 200°C. L'étude expérimentale propose de se fixer 8 traitements dont 2 traitements de références et 6 traitements plasmas.

Ensuite les surfaces et les interfaces sont caractérisées, premièrement par une analyse XPS de la surface permettant de comprendre ce qu'il se passe au niveau de la chimie de l'interface, puis ensuite les essais maszara anhydre au CEA LETI permettant de mesurer un taux de restitution d'énergie et finalement des essais de traction au LMA avec un essai Arcan modifié permettant de mesurer la contrainte à rupture.

Références

- [1] A. Maurel-Pantel, F. Fournel, T. Billeton, J. Debray, C. Hecquet, A. Talneau, F. Lebon « Collage direct-Assemblage sans adhésif pour environnements extrêmes » Techniques de l'ingénieur (2024), N-2000.
- [2] F. Fournel, C. Martin-Cocher, D. Radisson, V. Larrey, E. Beche, C. Morales, P. A. Delean, F. Rieutord and H. Moriceau "Water Stress Corrosion in Bonded Structures" ECS J. Solid State Sci. Technol. 4 P124 (2015) DOI 10.1149/2.0031505



Essai Arcan modifié pour wafers de silicium

JADH00032

INFLUENCE OF PLASMA TREATMENT ON THE STRUCTURAL BONDING OF CFRP ASSEMBLIES

O. Nitusgau¹, S. Amar¹, K. Le Meur², O. Picot², M. Aufray¹

¹ Université De Toulouse, Toulouse Inp, Cnrs, Cirimat - Toulouse (France)

² Collins Aerospace, Ratier-Figeac - Figeac (France)

Structural adhesive bonding is a technique widely used in the aerospace industry to assemble parts and provides many advantages: improved stress distribution, elimination of added mechanical elements (bolts, rivets) to reduce structure's weight and preserve fiber integrity [1]. However, the long-term performance of these assemblies is highly dependent on the adhesive's intrinsic properties and its interaction with the substrate [1], hence the need for effective surface preparation such as atmospheric plasma [2].

Bonding of high-performance thermoplastic composites, such as PEEK based composites, remains a challenge due to the polymer's hydrophobic properties [3], which limits the adhesion of the structural adhesive. Amongst surface treatment processes for thermoplastics, atmospheric plasma stands out as a clean process that can modify the extreme surface, in the first molecular layers (around ten nanometers) [3]. This modification can be achieved by grafting new chemical functions or by breaking chemical bonds [3]. In this context, atmospheric plasma treatment of thermoplastic composites with a PEEK matrix appears to be a promising solution.

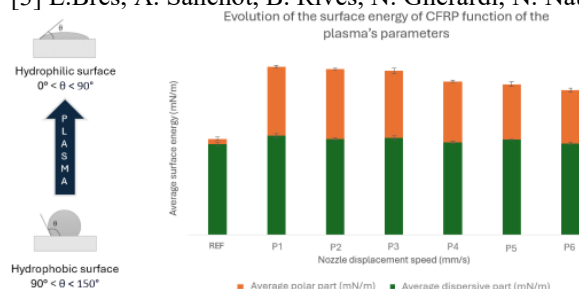
In the current work, atmospheric plasma is used to increase surface free energy of PEEK/UD carbon composites. The surface treatment is assessed through contact drop angle measurements following the Owens-Wendt methodology. This method was used to calculate surface free energy and determine polar and dispersive components. Plasma treatment was found to increase surface free energy by 70% with an increase in the polar energy ratio which can be attributed to new functional groups present on the PEEK surface (Figure 1).

To assess the impact of the surface modification on the quality of the assembly, mechanical testing through 3 point bending test (ISO 14679) and Double Cantilever Beam (ASTM D5528) were carried out. The results show a clear improvement in bonding performance, whereby the untreated samples show adhesive failure between the adhesive and the composite (Figure 2a), while plasma treated coupons failed within the composite substrate (Figure 2b) demonstrating improved adhesion quality.

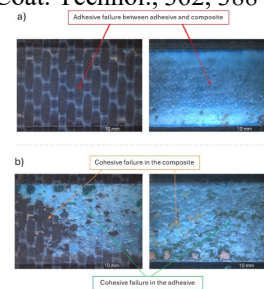
Atmospheric plasma treatment of thermoplastic composites appears to be a potentially attractive method for improving the chemical affinity of these surfaces with structural adhesives.

Références

- [1] G. Kafkopoulos, J. Duveigneau, G. J. Vancso, Macromol. Mater. Eng., 309, 1438 (2024).
- [2] V. Marinosci, J.B. Groupe, B. de Rooij, S. Wijskamp et R. Akkerman, J. Adhes. Sci. Technol., 109, 102893 (2021).
- [3] L.Brès, A. Sanchot, B. Rives, N. Gherardi, N. Naudé, M. Aufray, Surf. Coat. Technol., 362, 388 (2019).



Evolution of the surface energy function of plasma



Failure facies after mechanical testing

JADH00009

INDUSTRIALISATION DU TRAITEMENT PLASMA SUR DES MATERIAUX ELASTOMERES POUR DES APPLICATIONS DANS DES PROPULSEURS

H. Acheritobehere, C. Laforet

Société Roxel - Saint Medard En Jalles (France)

Roxel, leader dans le domaine de la propulsion solide, doit relever des défis croissants en matière de productivité et d'augmentation de sa capacité de production pour satisfaire les exigences du marché.

Les moteurs de Roxel intègrent des pièces en élastomère, telles que les joints ou les isolants, qui jouent un rôle essentiel dans la performance et la fiabilité des propulseurs. Parmi les étapes clés de la fabrication des moteurs, la préparation de surface des pièces en élastomère avant collage constitue un point de blocage majeur. Le traitement plasma sous vide émerge comme une solution innovante, permettant de remplacer les méthodes traditionnelles de dégraissage et de ponçage, tout en assurant une qualité de collage optimale et une répétabilité industrielle.

Pour optimiser ce nouveau procédé, une étude a été menée afin d'évaluer l'influence de paramètres tels que la puissance, le type de gaz, la position des pièces et la durée du traitement. Un programme de validation complet a été mis en place, incluant des essais comparatifs de collage entre l'ancien et le nouveau procédé, ainsi que des tests de vieillissement accéléré pour évaluer la durabilité des assemblages. Les résultats ont démontré une amélioration significative de la résistance mécanique et de la tenue des pièces dans des environnements sévères. L'intégration du traitement plasma dans la ligne de production a nécessité des adaptations matérielles et une formation des opérateurs. Les bénéfices obtenus sont multiples : réduction notable du temps de préparation des surfaces, augmentation de la cadence pour répondre à la demande croissante, et amélioration de la qualité grâce à une diminution des défauts de collage et une meilleure traçabilité. À terme, cette technologie pourrait être étendue à d'autres matériaux ou à d'autres étapes de fabrication.

Le traitement plasma sous vide représente une avancée technologique majeure pour Roxel, combinant performance industrielle et fiabilité technique. Ce projet illustre comment l'innovation dans les procédés peut transformer un processus historique en un véritable levier de compétitivité.

JADH00011

RECYCLING OF CARBON FIBERS EMPLOYING DEBONDING ON DEMAND APPROACH IN COMPOSITES STRUCTURES

D. Ruch, S. Ozyigit, J. Bardon, A. Laachachi, O. Kachouri

Luxembourg Institute Of Science And Technology (Luxembourg)

A debonding-on-demand method using intumescent particles as a debonding agent is employed to recycle carbon fibers from their thermoset epoxy matrix in structural composites. These debonding agent particles are incorporated into an epoxy matrix which is then used to produce carbon fiber-reinforced composites through the vacuum-assisted compression molding technique. Under normal usage conditions, the agents remain inert, ensuring that the modified composites retain their structural integrity and mechanical performance. When the composites are subjected to heat, the debonding agents are activated, releasing inert gases and causing physical changes in the composite matrix. This process allows for the effective separation and recovery of carbon fibers at lower temperatures compared to non-modified reference composites. After the debonding step, the recovered carbon fiber layers undergo acetic acid based mild chemical cleaning to remove epoxy residues from their surfaces, resulting in fully reusable recycled carbon fiber fabrics. These recycled carbon fiber fabrics are then used to produce a recycled composite. To assess the performance characteristics of the reference, modified, and recycled composites, flexural and dynamic mechanical analysis (DMA) tests are conducted. Modification of composites by debonding agent proves its efficiency for structural applications by maintaining their mechanical performance under usage conditions while recycled composites show that the recycling method does not have a negative effect on the structural properties of carbon fibers.

Références

Ozyigit S.; Kachouri O.; Bardon; J. Ruch D.; Laachachi A., Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2026 -05, DOI: 10.1016/j.compositesa.2026.109614
Kachouri O.; Bardon; J. Ruch D.; Laachachi A, Materials Science Forum, 2024-11-05, DOI: 10.4028/p-020koq
Patent WO2021219736 (2021): Multi-Materials disassembling, A. Laachachi, N. Burger, G. Mertz, D. Ruch

Conférence invitée

MÉCANISMES DE RENFORCEMENT MÉCANIQUE DANS LES GELS ET SYSTÈMES FIBRILLAIRES

A. Marcellan

Sciences et Ingénierie de la Matière Molle, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, 75005 Paris, France

Les objets de la matière molle – tels que les hydrogels – suscitent un intérêt particulier au sein de la communauté des matériaux polymères. Comment ces matériaux, principalement constitués d'eau – typiquement au-delà de 90 % – et qui se comportent comme des solides souples, peuvent conduire à des résistances mécaniques remarquables ? Ces dernières années, des avancées significatives ont été réalisées dans le domaine.

Ainsi, pour améliorer la résistance à la rupture de ces systèmes, une stratégie consiste à faire la chasse aux défauts en concevant des réseaux idéaux avec une distribution de mailles parfaitement uniforme. Cette solution s'avère complexe et finalement peu efficace en terme de résistance à la rupture. Nous avons adopté une stratégie différente, en tirant parti de la fragilité intrinsèque du gel et en introduisant des hétérogénéités dynamiques. En nous appuyant de principes de physique des polymères, nous avons conçu des systèmes modèles – simples à mettre en œuvre – dans lesquels nous avons introduit des interactions sacrificielles réversibles. Contrairement aux liaisons covalentes conventionnelles, ces interactions faibles, peu sélectives, peuvent se rompre et se reformer facilement, assurant un réarrangement de la topologie du réseau sous étirement. La clé du renforcement repose sur la dynamique de ces interactions ainsi que de leur coopérativité. Ce concept de renforcement par liaisons sacrificielles réversibles trouve des échos dans les tissus biologiques.

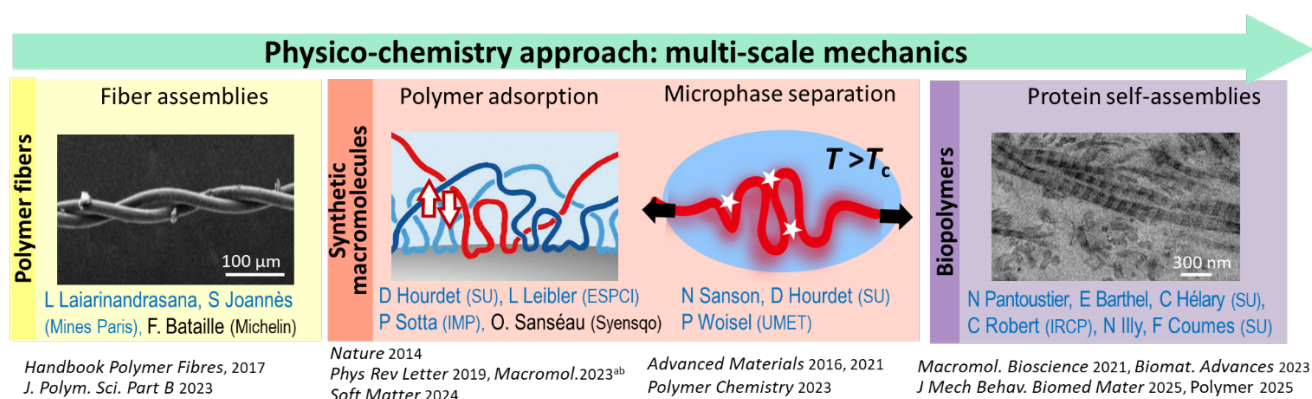


Figure 1. Renforcer et réparer les matériaux polymères via des liaisons sacrificielles “réversibles”.
Ces travaux sont issus d’une recherche collaborative.

Mots clés : rupture, adhésion, collagène, adsorption, micro-séparation de phase, auto-assemblage

JADH00036

MESURE DE L'ADHÉSION TEXTILE-CAOUTCHOUC DE COMPOSITES

N. Pujol, C. Nannette, R. Cardon, D. Fleury

Michelin - Clermont-Ferrand (France)

La conception d'architectures pneumatiques robustes vis-à-vis des sollicitations mécaniques repose sur l'utilisation de composites textiles en tant que matériaux de renforcement. Des fibres textiles sont utilisées dans la carcasse du pneu, les nappes sommet, souvent en complément de métal, et sur les flancs [1]. Une des problématiques rencontrées dans ce domaine est l'adhésion entre un renfort textile et le caoutchouc, ces deux substrats présentant des modules, une polarité, très différents. Pour améliorer l'adhésion il est courant d'utiliser des systèmes adhésifs afin de créer des ponts entre les élastomères et les renforts. Ainsi, toute fabrication de renfort textile doit répondre à un critère strict de performance adhésive mesurée selon un protocole interne de pelage à 180° inspiré de la norme D4393 [2] (Figure 1). Lors de la traction, le front de rupture peut rester localisé proche de son initiation, dans l'épaisseur du caoutchouc ou atteindre l'interface avec le renfort, mettant en compétition énergie de cohésion de la matrice caoutchouc et énergie d'adhésion de l'interface. De ce test, sont extraits deux données : le pourcentage de recouvrement par du caoutchouc des fibres textiles après traction et la force de traction de l'éprouvette. Cependant, dans quelques cas très particuliers, avec certaines natures de fibres, le front de rupture se décale au sein du renfort occasionnant la rupture des filaments [3]. Ce phénomène de fibrillation n'est pas corrélé à un manque d'adhésion des renforts textiles, mais perturbe la mesure qui en est faite.

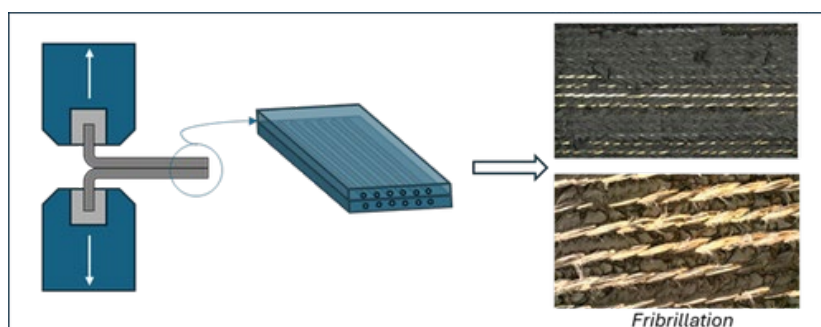
Les études expérimentales menées ont montré que la localisation de ce front de rupture dépend certes des propriétés mécaniques du caoutchouc et de la performance du système adhésif, mais est également influencé par des facteurs géométriques tels que l'épaisseur de la nappe composite. Malgré ces résultats empiriques, la mesure présente toujours une grande variabilité. Une meilleure compréhension de la mécanique de ce test de pelage est nécessaire. Pour cela, une étude de simulation doit être lancée afin d'identifier les facteurs les plus influents et d'en déduire des leviers de contrôle pertinents.

Références

[1] « Tout sur le pneu - Les matériaux ». [En ligne]. Disponible sur: <https://toutsurlepneu.michelin.com/les-materiaux>

[2] ASTM D4393 - Standard Test Method for Strap Peel Adhesion of Reinforcing Cords or Fabrics to Rubber Compounds, 7 août 2017.

[3] H. Li et al., « Interfacial adhesion and shear behaviors of aramid fiber/polyamide 6 composites under different thermal treatments », Polym. Test., vol. 81, p. 106209, janv. 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.106209.



Test de pelage 180° et facies de rupture

JADH00012

ADHÉSIFS DE DÉCOLLEMENT À LA DEMANDE : LA SOLUTION 3 EN 1 POUR LA RÉPARATION, LA REPRISE ET LE RECYCLAGE

V. Leon

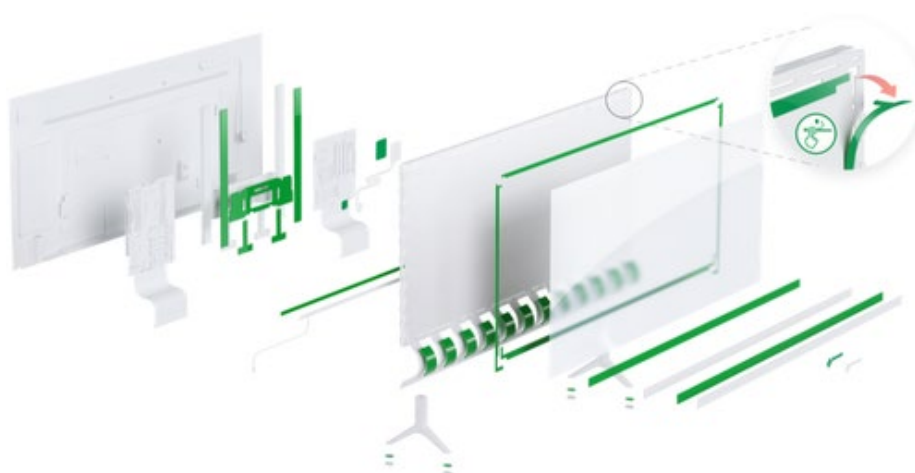
Lohmann Gmbh & Co. Kg - Neuwied (Germany)

Les adhésifs à décollage à la demande (DoD) constituent une nouvelle classe de matériaux conçus pour offrir des liaisons fortes et durables, pouvant être décollées proprement sous l'effet de stimuli externes contrôlés. En permettant un démontage sélectif, ces systèmes répondent au besoin industriel croissant de réparabilité, de remise en état et de recyclage, conformément aux principes de l'économie circulaire et du « droit à la réparation ». Les mécanismes d'activation comprennent la chaleur, le courant électrique, l'irradiation lumineuse, la contrainte mécanique et l'induction électromagnétique [1-5]. Les conceptions classiques utilisent des chimies covalentes dynamiques ou photoréversibles, des agents de liaison thermolabiles ou des additifs conducteurs pour faciliter le clivage de la liaison par un stimulus.

Des défis importants subsistent, notamment l'équilibre entre durabilité et décollabilité, la garantie d'une séparation sans résidus, l'intégration de méthodes d'activation pratiques et l'obtention d'un coût équivalent à celui des adhésifs conventionnels (Fig. 1). Les recherches en cours portent sur les systèmes d'activation multi-déclencheurs et à faible consommation d'énergie, l'amélioration de la compatibilité avec les substrats et l'optimisation du cycle de vie. Face à l'intensification des pressions réglementaires et de durabilité, les adhésifs DoD devraient devenir une technologie fondamentale pour la conception de produits circulaires, offrant des solutions de collage durables et réversibles dans divers secteurs de fabrication.

Références

- [1] Rodrigues, V.C.M.B.; Kasaei, M.M.; Marques, E.A.S.; Carbas, R.J.C. & da Silva, L.F.M. "Adhesive bonding in automotive battery pack manufacturing and dismantling: a review", *Discov. Mech. Eng.*, 2025, 4 (1), 25
- [2] Fleck-Kunde, T.; Buga, D.; Franken, U.; Stapf, S. & Kamm, T. "Bonded structure comprising an electrochemically debondable adhesive", European Patent EP 4566808 A1 (2025) Henkel AG & Co. KGaA.
- [3] Akamatsu, K.; Mizobata, K.; Awane, R.; Hirao, A. & Yokoyama, J. "Electrical debonding type adhesive sheet, joined body, and debonding method for joined body", United States patent US 12037522 B2 (2024) Nitto Denko Corp.
- [4] Leon, V.; Ritter, V. & Friedland, R. "Adhesive tape", PCT patent WO 2023/222200 A1 (2023) Lohmann GmbH & Co. KG
- [5] Yoder, G.S.; Bowers, S.D. & Owen, C.D. "Electrical battery de-bonding", United States patent US 11081898 B2 (2021) Microsoft Technology Licensing LLC.



Rework in production

RATE-DEPENDENT DAMAGE ZONE IN PEELING OF SOFT POLYMER NETWORKS

² *University Of Texas - Austin (United States)*

Références

Mechanophore crosslinker Activated mechanophore crosslinker Physical bonds across interface ~ 1-10 nm

Conférence invitée

DES SYSTÈMES « ONE-POT » AUX REVÊTEMENTS INTELLIGENTS : L'AUTO-STRATIFICATION AU SERVICE DE L'ADHÉSION

M. Jimenez¹, A. Kerrache^{1,2}, A. Lebeau¹, M. Casetta¹, F. Samyn¹, J-F. Gohy²

¹ Univ. Lille, CNRS, INRAE, Centrale Lille, UMR 8207 - UMET, F-59000 Lille, France

² Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique

Compte tenu de la demande croissante en technologies de surface éco-conçues, les revêtements auto-stratifiants apparaissent comme une alternative durable et efficace aux systèmes multicouches conventionnels. Ces systèmes, basés sur des formulations « one pot » de polymères incompatibles, permettent la formation spontanée d'architectures multicouches fonctionnelles en une seule application et une seule étape de durcissement, avec une excellente adhésion interfaciale comparativement à l'application de deux couches successives. Ce procédé permet de réduire l'utilisation de matières premières, la consommation d'énergie et la complexité des formulations [1].

Ces dernières années, nous avons conçu des systèmes auto-stratifiants pour différentes applications, telles que la résistance au feu [2], la résistance à l'encrassement et l'aérospatial [3]. Ils sont principalement basés sur des époxydes biosourcés [4] combinés à différents polymères tels que le polyuréthane, le silicone et le PVDF. Une analyse comparative du cycle de vie (ACV) a révélé une réduction significative de l'impact environnemental - jusqu'à 30 % par rapport aux systèmes multicouches [5].

Nos recherches se concentrent actuellement sur les revêtements auto-stratifiants qui intègrent des réseaux polymères covalents dynamiques, comme les vitrimères. Deux revêtements auto-stratifiants originaux ont été récemment conçus, à savoir un système biosourcé vitrimère époxy/PVDF [6] et un système biosourcé époxy/vitrimère silicone [7]. Le premier présente une excellente adhérence aux substrats métalliques, tout en étant détachable à partir d'une certaine température, permettant la récupération du substrat et le recyclage potentiel du matériau. Le second présente une excellente adhérence aux plastiques et des propriétés d'auto-réparation à température ambiante.

Cette étude ouvre la voie à de nouvelles générations de revêtements alliant durabilité, haute performance et fonctionnalités intelligentes, avec des perspectives prometteuses dans les secteurs de l'emballage, de la transformation alimentaire, de l'électronique et de l'aérospatial.

Références bibliographiques

1. Beaugendre et al., *Prog. Org. Coat* 110 (2017), 210
2. Beaugendre et al. *RSC Adv* 7 (2017), 40682
3. Lebeau et al., *Subm. to Surf. Coat. Tech.* (2025)
4. Lemesle et al., *Appl. Surf. Sci.* 536 (2021), 147687
5. Lemesle et al., *J. Cleaner Production* 242 (2020), 118527
6. Kerrache et al., *Prog. Org. Coat.* 209 (2025), 109593
7. Samyn et al., *Prog. Org. Coat.* 196 (2024), 108732

JADH00047

IMPROVING INTERFACIAL PROPERTIES OF IMMISCIBLE POLYMER WITH VITRIMERS

C. Spina^{1,2}, B. Bresson¹, C. Creton¹, D. Vlassopoulos²

¹ Sciences Et Ingénierie De La Matière Molle, Espci Paris, Psl University, Paris, France

² Institute Of Electronic Structure And Laser, Forth, Heraklion, Crete, Greece-Department Of Materials Science & Engineering, University Of Crete, Heraklion, Crete, Greece

A significant portion of polymeric materials consists of polymer blends, multilayer polymers, and adhesive joints. Nevertheless, most polymer pairs exhibit unfavourable thermodynamics for blending, leading to macroscopic phase separation and poor interfacial adhesion, reducing final material performances [1]. Therefore, improving the mechanical strength of the polymer-polymer interface has always been a focus of interest. Vitrimer networks are studied as an alternative to address this issue, since they are polymers with dynamic cross-links that can rearrange their network topology through bond-exchange reactions [2].

In this work, adhesion properties of a dioxaborolane-based vitrimer [3] embedded into two immiscible polymers, polystyrene and polymethyl methacrylate, have been assessed. The dioxaborolane bond exchanges can be easily thermally activated at high temperatures, enabling dynamic bond breaking and reformation at the interface between the two polymers, thereby increasing the adhesion. An asymmetric double cantilever beam test was performed to quantify changes in adhesion properties [1,4] as a function of adhesion temperature, dwell time, and vitrimer content, by measuring the critical energy release rate (G_c). Layered samples were employed, with adhesion assessed on spin-coated vitrimer films on polymer substrates, with low usage of vitrimer.

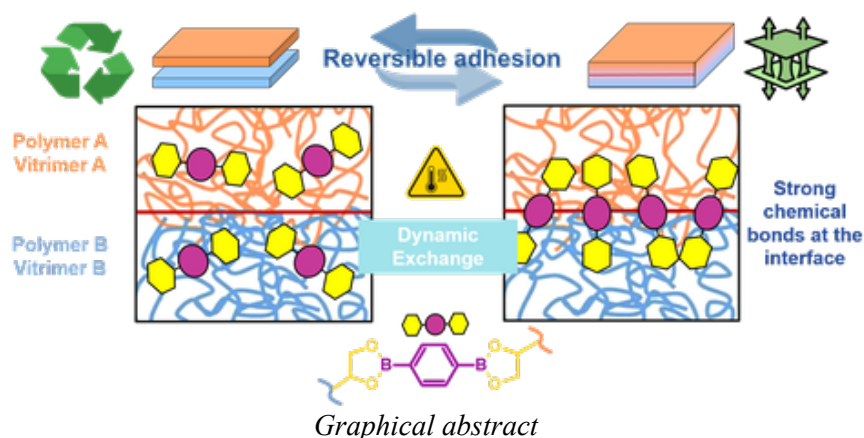
New insights into the compatibility between the vitrimer and the commercial polymer have been obtained, paving the way for material optimisation through tuning of the degree of functionalisation.

Références

- [1] C. Creton, E.J. Kramer, H.R. Brown, C.-Y. Hui, Molecular Simulation Fracture Gel Theory (2002) 53–136.
- [2] D. Montarnal, M. Capelot, F. Tournilhac, L. Leibler, Science 334 (2011) 965–968.
- [3] M. Röttger, T. Domenech, R. van der Weegen, A. Breuillac, R. Nicolaÿ, L. Leibler, Science 356 (2017) 62–65.
- [4] C. Creton, E.J. Kramer, C.-Y. Hui, H.R. Brown, Macromolecules 25 (1992) 3075–3088.

Remerciements

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 101119786.



JADH00045

TITANATE ADHESION PROMOTER ABSTRACT

L. Mehenni, S. Genty

Socomore - Vannes Cedex (France)

Achieving strong and durable adhesion on various substrates remains a major challenge, especially on bare metals such as titanium, composites, and low-reactivity coatings. To ensure a good adhesion, it is often necessary to use specific surface preparation to improve chemical interactions at the interface [1]. In this context, titanates, particularly organo-titanates are well known to be very effective coupling agents for improving interface bonding and long-term resistance. They are often used as coupling agents in composite [2]. In this case, titanates are used to enhance adhesion before bonding or sealant applications and significantly improve adhesion on surfaces like stainless steel [3], their industrial use is often limited. Their main drawback is a high sensitivity to moisture, which leads to a short shelf life and inconsistent performances after the packaging is opened. This stability issue is a well-known technical barrier for many end users. This poster presents a newly developed solvent based titanate that successfully combines performances with long term stability. To date, it has achieved a validated shelf life of 12 months, doubling the current industry standard. The efficiency of this new promoter was tested through peel tests on a wide range of substrates:

Metals: Stainless steel, aluminum alloys, and titanium

Coatings: Epoxies (chromated, non chromated, water or solvent-based) and polyurethanes (chromated and non-chromated).

The results demonstrate strong adhesion performances at room temperature and after fluid immersion (water, kerosene, etc) on all the tested configurations. This technology provides a reliable solution to enhance adhesion on metallic surfaces, coatings and adhesives.

Références

[1] Marques, A. C. et al. "Review on Adhesives and Surface Treatments for Structural Applications: Recent Developments on Sustainability and Implementation for Metal and Composite Substrates." *Materials* 2020, 13(24), 5590.

[2] Sharaifi Zamir, S.; Fathi, B. "Organo-titanates and zirconates coupling agents in polymer composites: A review." *Journal of Composite Materials* 2025.

[3] Zhu, D. et al. "Improvement of adhesion performance between modified phenolic and stainless steels by titanate coupling agent treatment." *Journal of Adhesion Science and Technology* 2020, 34(7), 782–791.



JADH00026

GREFFAGE DE PRÉCURSEURS DE NHC SUR SURFACES MÉTALLIQUES : IMPACT DU MODE DE GÉNÉRATION DU CARBÈNE SUR L'INTERFACE FORMÉE

C. Skoumas¹, E. Ines², L. Perrault³, F. Ribot⁴, L. Fensterbank³, I. Guillot², P. Marcus¹, B. Laik², D. Mercier¹

¹ Ircep, Chimie Paristech, Université Psl, Paris, France - Paris (France)

² Icmpe, Cnrs, Université Paris-Est Créteil, France - Paris (France)

³ Lam, Collège De France, Paris, France - Paris (France)

⁴ Lcmcp, Sorbonne Université, Paris, France - Paris (France)

La fonctionnalisation de surfaces métalliques par des carbènes N-hétérocycliques (NHC) constitue une approche prometteuse pour le contrôle des propriétés interfaciales dans des domaines tels que la protection contre la corrosion, l'adhésion ou la catalyse. En raison de la formation d'une liaison métal-carbone forte, les NHC offrent une alternative robuste aux monocouches auto-assemblées à base de thiols, avec une stabilité thermique et chimique accrue. Toutefois, les mécanismes de greffage des NHC à la surface des métaux, en particulier en fonction de l'état de surface et de la méthode d'activation, restent encore insuffisamment compris.

Dans ce travail, le greffage de précurseurs de NHC est étudié sur deux types de substrats métalliques, un métal modèle (Au) et un métal présentant une couche d'oxyde stable, afin de comprendre les mécanismes de greffage et d'évaluer l'influence de la nature de la surface et de la voie de fonctionnalisation sur la formation de l'interface molécule-métal. La génération du carbène sera assurée par deux approches : une voie chimique en présence de borohydrure de sodium (NaBH_4) et une voie assistée par électrochimie.

La réactivité des surfaces sera évaluée par une caractérisation chimique fine des surfaces par spectroscopie de photoélectrons X (XPS) combinée à des mesures électrochimiques. Cette approche, originale, permettra de remonter à des informations telles que la nature du film greffé, son épaisseur, sa densité, mais aussi aux modifications chimiques de la surface induites par le greffage.

Les résultats obtenus montrent que la nature du substrat et la méthode de greffage influencent significativement la formation et l'organisation de la couche de NHC, en particulier la nature de l'interaction métal / molécule et les propriétés barrières associées. Ce travail apporte une compréhension fine des mécanismes de greffage des NHC à la surface des métaux et ouvre des perspectives pour la conception de surfaces fonctionnalisées durables adaptées à des environnements variés.

Conférence invitée

DES FACTEURS EMPIRIQUES À LA PROBABILITÉ DE SURVIE : UNE TROISIÈME VOIE POUR LE DIMENSIONNEMENT DES JOINTS COLLÉS

T. Vallée

IFAM Fraunhofer, Allemagne

Le dimensionnement des joints collés reste notoirement difficile en pratique. La diversité des géométries et des matériaux, la présence de pics de contraintes, la fragilité des modes de rupture et la forte dispersion des résistances rendent les approches classiques basées sur les contraintes locales peu fiables, malgré l'usage massif de paramètres de calage ad hoc. Face à cela, la mécanique de la rupture et la modélisation par zone cohésive offrent un cadre théorique puissant, mais au prix d'une complexité expérimentale et numérique qui limite leur adoption par les praticiens.

Cette contribution met en avant une troisième voie encore largement méconnue : une approche de dimensionnement combinant effet d'échelle et méthodes probabilistes, formulée comme une extension naturelle de la mécanique classique. Dans un premier temps, les raisons profondes de la difficulté du dimensionnement des joints collés sont discutées, en les rapprochant d'autres problèmes structuraux présentant singularités, fragilité et effets de taille.

La méthodologie est ensuite présentée étape par étape : détermination numérique du champ de contraintes sous une charge de référence, caractérisation expérimentale de la résistance et d'un critère de rupture adapté, puis description statistique permettant de passer de la contrainte locale à une probabilité de survie de l'assemblage.

Enfin, une série d'exemples représentatifs illustre la capacité de cette approche probabiliste à prédire les charges de rupture, intégrer l'effet d'échelle et proposer un dimensionnement sans paramètres empiriques de calage, tout en restant compatible avec la « culture » d'ingénieur.

JADH00003

FATIGUE BEHAVIOUR OF BONDED JOINTS AND MODELLING USING AN IMPERFECT INTERFACE MODEL WITH VARIABLE DAMAGE KINETICS

C. Telloli¹, F. Lebon¹, R. Rizzoni², A. Maurel-Pantel¹

¹ Laboratoire De Mécanique Et D'acoustique - Marseille (France)

² Department Of Engineering, University Of Ferrara - Ferrara (Italy)

In recent years, bonding techniques have received increasing attention in a variety of industrial applications, including aerospace, civil engineering, energy, automotive, and biomedical engineering. Compared with traditional joining methods such as welding and riveting, bonding offers several advantages, including reduced stress concentration, improved resistance to harsh environments, and the ability to join dissimilar materials. However, the long-term reliability of these joints remains a challenge, particularly in terms of their fatigue resistance.

This work focuses on the fatigue behaviour of bonded joints subjected to Mode II loading, using double strap joints made of steel and epoxy adhesive (see Figure 1). The study includes experimental tests to evaluate the influence of load ratio and frequency on the fatigue life of these joints. Mode II was chosen due to its feasibility for experimental implementation, enabled by the recent introduction of a dedicated bonding procedure for the first non-monotonic cyclic tests [1]. The results are analysed using force-displacement curves, stress-strain responses, and S-N curves to identify the main trends and compare the behaviour of bonded joints under different loading conditions. Figure 2 shows the S-N curve with frequency of 10 Hz and $R=0.1$. The aim of this study is to model this behaviour using an imperfect interface model that incorporates the variable damage kinetics observed in the experimental tests [2]. Ultimately, the development of an experimental database and predictive models will support the integration of bonded assemblies into the construction of primary or secondary structures in offshore wind turbines.

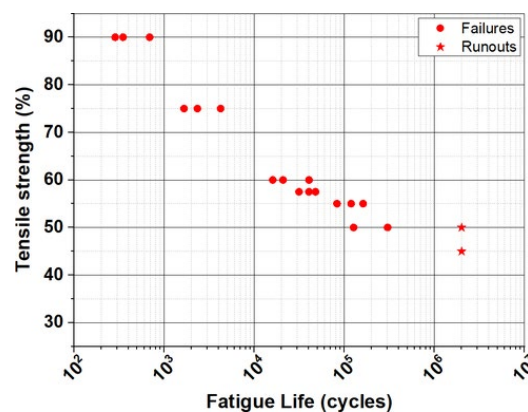
Références

[1] M. Lamberti, A. Maurel-Pantel, F. Lebon, «Experimental characterization and modelling of adhesive bonded joints under static and non-monotonic fracture loading in the mode II regime», International Journal of Adhesion and Adhesives, vol. 124, p. 103394, mag. 2023, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2023.103394.

[2] E. Bonetti, G. Bonfanti, F. Lebon, R. Rizzoni, «A model of imperfect interface with damage», Meccanica, vol. 52, fasc. 8, pp. 1911–1922, giu. 2017, doi: 10.1007/s11012-016-0520-1.



Double strap joint before testing



S-N curve at 10 Hz and $R=0.1$

JADH00035

COMPORTEMENT D'ASSEMBLAGE COLLE SOUS CHOC SOUTENU : APPROCHE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE

D. Thevenet, A. Annovazzi, L. Taddei, J. Le Clanche

IRDL - Brest (France)

Depuis ces dernières décennies, les progrès réalisés en termes de performance et d'adhésion des adhésifs structuraux se sont avérés remarquables. Cependant, la tenue mécanique d'un assemblage collé, technique largement répandue pour assembler des matériaux de natures très différentes, dépend fortement de la vitesse de sollicitation qui lui est appliquée en service. Jusqu'à présent, les essais destinés à la caractérisation des adhésifs sont essentiellement effectués pour des chargements quasi-statiques. Cependant, lors de leur utilisation, les structures assemblées par collage peuvent être soumises à des conditions d'impact sévères. C'est le cas, entre autres, des véhicules terrestres (accident) et aériens (impact à l'oiseau) et des protections balistiques (tir de munition). Afin d'assurer l'intégrité de ces structures et par conséquent la sécurité de ses utilisateurs, il est donc nécessaire de prendre en considération dès la phase de conception, le comportement sous sollicitations dynamiques de ces dernières.

Pour atteindre cet objectif, un essai multi-instrumenté destiné à appliquer un chargement dynamique sur des assemblages collés à partir d'un tube à choc (TAC) à gaz comprimé, a été développé. Il s'agit d'un dispositif expérimental permettant de générer des ondes de choc à l'échelle du laboratoire. Des essais en configuration classique de type « choc soutenu » ou en configuration raccourcie de type « blast » permettant de générer un profil de pression ressemblant à celui d'une onde de souffle peuvent être réalisés. Ce dispositif expérimental est complété par une instrumentation basée sur l'utilisation de la vélocimétrie hétérodyne, d'une caméra rapide et de corrélation d'images numériques. Ce type d'essais, appliqué à un assemblage collé, peut notamment conduire à la détermination du taux de restitution d'énergie critique de l'adhésif étudié sous chargement dynamique mais peut également permettre d'étudier la tenue mécanique d'assemblages collés plus « complexes ». Une campagne expérimentale a été menée sur une colle structurale mono-composant à base époxy. Parallèlement à ce travail, un modèle numérique de cet essai a été développé et permettra de mener une confrontation essais/calculs et ainsi de conclure sur la pertinence des outils développés dans le cadre de ce travail.

JADH00043

GÉNÉRATION ET IMPACTS DE GOUTTES GÉANTES

T. Lamy, E. Rio, F. Boulogne

Laboratoire De Physique Des Solides - Orsay (France)

L'étude des gouttes d'eau est un sujet fortement étudié et ce, depuis le 17^{ème} siècle. Leur génération, formes, impacts et déformations sont un sujet d'actualité tant dans l'industrie que dans la recherche fondamentale. Particulièrement, la très grande majorité des études portant sur l'impact se focalisent sur des gouttes dont la taille reste inférieure à la longueur capillaire.

Nous adoptons ici un dispositif décrit par Dighe et al (Phys. Rev. E 109, 045107). Nous proposons de rationaliser le fonctionnement de ce dispositif par un modèle mécanique que l'on compare aux expériences.

Nous utilisons ce dispositif pour générer des gouttes d'une taille caractéristique entre 1 et 5 cm afin d'étudier l'impact sur une plaque de verre horizontale.

Nous mettons en avant le fait que ces grands volumes diffèrent des petites gouttes par la forme avant l'impact affectant par ailleurs la dynamique d'étalement. Cette dynamique d'étalement dépend du volume d'eau et de la hauteur de lâché, alliant des comportements issus des petites gouttes habituellement observés lors de l'impact sur solide à des comportements issus des impacts sur films liquides.

Nous quantifions la dynamique ainsi que le rayon maximal de cet étalement en comparant nos résultats avec les modèles existants de la littérature.

Références

Dighe et al (Phys. Rev. E 109, 045107), <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.109.045107>

Conférence invitée

**ESSAIS MÉCANIQUES À RUPTURE SUR ÉPROUVETTES
TECHNOLOGIQUES. DIALOGUE MODÈLES-MESURES**

P. Casari

Univ. Nantes (France)

Cette présentation réunit les résultats d'un article publié dans *Composite Structures* (2019) et ceux de la thèse de doctorat de Mohamed Amine Tazi (HESAM Université / CESI LINEACT, 2026), dirigée par Silvio de Barros et co-encadrée par Mouad Jebli.

Ensemble, ces deux volets illustrent une démarche commune visant à favoriser le dialogue mesures-modèles au service de la prédiction de la ruine et de la durabilité des assemblages collés acier/composite.

Le premier focus porte sur un essai « blister » comme alternative aux essais hydrostatiques pour la qualification des réparations composites de pipelines. Ce travail très cosmopolite, mené par S. de Barros, B. M. Fadhil, F. Alila, J. Diop, J. M. L. Reis, P. Casari et F. Jacquemin, associe le CEFET de Rio de Janeiro (Brésil), l'Université de Koya (Iraq), l'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique de l'Université de Nantes (Saint-Nazaire) et l'Universidade Federal Fluminense (Brésil).

L'essai, instrumenté par corrélation d'images numériques permet de remonter de la charge critique de décollement au taux de restitution d'énergie, puis à la pression de rupture via l'équation des normes ISO/TS 24817 et ASME PCC-2. Validé par un modèle éléments finis à zones cohésives, il présente une sensibilité environ dix fois supérieure aux essais WTDCB de la littérature, et identifie mieux l'amorçage du décollement que la fuite observée en essai hydrostatique.

Le second focus, cœur de l'exposé, présente les principaux travaux de la thèse d'Amine Tazi : des essais de flexion trois points sur plaques acier renforcées par patchs carbone, lin et hybrides lin/carbone collés avec trois adhésifs contrastés (époxy rigide, acrylate intermédiaire, SMP souple).

On démontre que le choix de l'adhésif pilote la transition entre décollement interfacial, rupture du composite et non-rupture : l'époxy atteint 58 à 73 % de charge ultime mais rompt à l'interface, tandis que l'acrylate mobilise pleinement le patch (32 à 45 %). L'analyse du comportement hygro-mécanique de ces stratifiés permet de mettre en évidence quelques particularités liées à l'hybridation du concept de renforcement structural. Une modélisation originale sur ABAQUS est conduite par analogie thermique/diffusion avec le concept de fraction d'humidité pour les multi-matériaux.

JADH00008

ÉVALUATION IN VITRO DES PROPRIÉTÉS ADHÉSIVES ET COHÉSIVES DES POLYMÈRES FILMOGÈNES : ENJEUX DE LA TENUE DES DÉPÔTS DE MAQUILLAGE

F. Hernandez

L'oréal Research & Innovation - Aulnay Sous Bois (France)

Dans le paysage actuel de la recherche cosmétique, l'engagement vers l'éco-conception impose de repenser la formulation des produits de maquillage sans compromis sur leur efficacité. Au cœur de cette problématique, le maintien de la « tenue » du dépôt, c'est-à-dire sa capacité à persister durablement sur des substrats biologiques variés tels que la peau, les lèvres ou les fibres kératinisées (cils et sourcils) — constitue un enjeu scientifique majeur. Cette performance de tenue est multidimensionnelle : elle se définit par la capacité du film cosmétique à résister à un ensemble complexe d'agents d'élimination rencontrés au quotidien. Ces agressions peuvent être d'ordre mécanique, incluant les frottements répétés, l'abrasion ou les contacts involontaires, mais également d'ordre physico-chimique, à travers l'exposition prolongée à l'eau, au sébum, à la sueur ou aux corps gras d'origine alimentaire.

Le pilier de cette résistance réside dans l'utilisation de polymères filmogènes avancés, essentiels aux formules revendiquant une tenue « longue durée ». Pour être performants, ces polymères doivent présenter un équilibre optimal entre propriétés adhésives et cohésives. D'une part, les propriétés adhésives sont critiques pour assurer un ancrage efficace et pérenne à l'interface entre le produit et le substrat cutané. Elles sont les garantes du caractère « non-transfert » de la formule, empêchant la migration du pigment vers des supports tiers. D'autre part, les propriétés cohésives assurent l'intégrité structurelle interne du matériau déposé.

Afin de quantifier ces interactions complexes, nous avons développé au laboratoire une méthodologie, s'appuyant sur des outils manuels traditionnels ainsi que sur des plateformes de caractérisation hautement automatisées. Cette approche analytique est déployée de manière transversale, depuis le criblage amont de nouvelles matières premières biosourcées jusqu'à la validation finale des formules complexes. Nous utilisons notamment des essais de traction pour sonder les propriétés intrinsèques, des tests de frottement pour évaluer la durabilité de surface, et des protocoles de pelage pour mesurer l'énergie d'adhésion à l'interface.

La cohésion du film est quant à elle éprouvée par des tests de résistance dynamique, permettant de déterminer si la structure reste intacte lorsqu'elle est soumise à des contraintes mécaniques sévères, en présence ou non de solvants modèles (sébum synthétique, solutions salines). Ces protocoles permettent également de prédire avec précision le potentiel de transfert de la formule. Au cours de cette présentation, nous illustrerons la pertinence de ces méthodes à travers plusieurs études de cas, démontrant comment la caractérisation in vitro permet de piloter l'innovation vers des polymères plus durables et performants.

JADH00024

VERS DES MODÈLES D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE GÉNÉRALISABLES POUR LES ASSEMBLAGES COLLÉS : UNE APPROCHE HYBRIDE

M. Calì¹, S. Schwartz¹, F. Lachaud¹, S. Teixeira De Freitas², E. Paroissien¹

¹ Institut Clément Ader, Université De Toulouse, Isae-Supaero, Insa, Imt Mines Albi, Utiit, Cnrs - Toulouse (France)

² Aerospace Engineering, Tu Delft - Delft (The Netherlands)

L'apprentissage automatique connaît une croissance rapide dans toutes les disciplines scientifiques et techniques, et son application au collage structural est un domaine d'intérêt croissant, comme le démontrent des revues récentes [1]. Les techniques d'intelligence artificielle (IA) permettent de générer des modèles de substitution des assemblages collés afin d'obtenir des prédictions précises à partir de variables de conception d'entrée, et ce en un temps d'inférence très faible.

Cependant, les travaux dans ce domaine partagent des limitations communes. En dehors des bornes d'apprentissage des modèles, des résultats non physiques sont fréquemment observés, ce qui limite leur applicabilité aux applications d'ingénierie réelles. Pour remédier à ce manque de capacités de généralisation, un nombre important et souvent prohibitif d'expériences ou de simulations est habituellement nécessaire pour échantillonner l'ensemble du domaine de conception [2]. De plus, la plupart des études se concentrent sur des prédictions directes des charges de rupture, ce qui restreint la compréhension des phénomènes à l'origine de la rupture et limite l'utilisation éclairée de ces outils à des fins de conception.

Dans cette étude, une approche alternative est proposée pour aborder ces limitations. Une approche hybride est construite pour calculer les contraintes dans l'adhésif, plutôt que les charges de rupture, approfondissant ainsi la compréhension du transfert de charge dans l'analyse. Le système se compose d'un modèle analytique « basse fidélité » associé à une architecture encodeur-décodeur. Ce modèle d'IA est entraîné sur un petit ensemble de simulations par éléments finis « haute fidélité », sélectionnées pour être représentatives des formes caractéristiques des distributions de contraintes adhésives. Le système ainsi obtenu est capable de produire des résultats physiquement cohérents et de qualité « haute fidélité ». Cette approche est comparée à un réseau de neurones conventionnel afin d'évaluer la précision des prédictions et la capacité de généralisation en dehors du domaine d'entraînement.

Références

- [1] Y. Wei, X. Jin, Q. Luo, Q. Li, and G. Sun, “Adhesively bonded joints – A review on design, manufacturing, experiments, modeling and challenges,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 276, p. 111225, May 2024, doi: 10.1016/j.compositesb.2024.111225.
- [2] B. Birecikli, Ö. A. Karaman, S. B. Çelebi, and A. Turgut, “Failure load prediction of adhesively bonded GFRP composite joints using artificial neural networks,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 11, pp. 4631–4640, Nov. 2020, doi: 10.1007/s12206-020-1021-7.

SESSION AFFICHES

JADH00007

ENDOMMAGEMENT D'ADHÉSIFS SEMI STRUCTURAUX - EFFET DE LA CONTRAINTE HYDROSTATIQUE

J. Jumel¹, H. Zoubir¹, M. Taleb Ali², L. Bercelli¹

¹ ENSTA-IRDL (France)

² ENIT (France)

Les adhésifs utilisés sous forme de joints collés sont soumis en service à des combinaisons d'états mécaniques complexes que l'on désigne par des termes souvent technologiques (clivage, pelage, cisaillement, tension, ...) associés à des modes de sollicitations de l'assemblage qui se traduisent souvent à l'échelle du joint de colle par des gradients d'état mécanique importants. A l'échelle locale de l'élément de volume, l'adhésif est soumis à des sollicitations combinées de cisaillement et de tension mais également à des pressions hydrostatiques importantes du fait du confinement de la couche d'adhésif entre des substrats présentant des rigidités plus importantes. L'objet du travail principalement expérimental présenté ici est d'illustrer l'impact de cette sollicitation hydrostatique sur les mécanismes d'endommagement à l'origine de la décohésion des joints de colle en lien avec la structure et microstructure des adhésifs.

JADH00013

ÉVALUATION DE L'ADHÉRENCE LORS DE L'AMORÇAGE DE LA FISSURE À L'AIDE DE L'ESSAI DE FLEXION EN TROIS POINTS : INFLUENCE DES HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION

F. Lovero¹, S. Schwartz¹, E. Paroissien¹, F. Lachaud¹, C. Gillet¹, M. Aufray²

¹ Univ Toulouse, Imt Mines Albi, Insa Toulouse, Isae-Supaero, Cnrs, Ica - Toulouse (France)

² Cirimat, Univ Toulouse, Cnrs, Inpt, Ups - Toulouse (France)

Les assemblages collés sont de plus en plus utilisés dans de nombreux domaines, y compris le secteur aéronautique, en raison de leur rapport tenue/masse élevé par rapport aux autres méthodes d'assemblage. Cependant, leur application reste limitée par les incertitudes sur leurs propriétés mécaniques et les difficultés liées à leur modélisation, en particulier concernant l'estimation quantitative de la rupture à l'interface adhésif/adhérent. Les essais de flexion trois points (F3P) se sont révélés être un outil très utile pour identifier les forces et déplacements critiques liés à la résistance de l'assemblage [1], mais l'utilisation des données expérimentales seules ne permet qu'une évaluation qualitative de l'adhérence [2]. En 2020, Birro et al. [3] ont présenté une nouvelle approche pour déterminer la contrainte à rupture (σ_c) et le taux de restitution d'énergie (G_c) en combinant le critère couplé contrainte-énergie [4] et les essais 3FP. L'application de cette approche nécessite cependant deux essais numériques (i.e. avec et sans modélisation de la fissure) et repose sur des hypothèses de modélisation : en particulier, Birro et al. ont utilisé un modèle de poutre 1D de Timoshenko sur fondation élastique (BOEF) résolu par la méthode macro-élément (ME). La présente étude vise à évaluer l'influence des hypothèses de modélisation sur σ_c et G_c , calculés selon l'approche présentée par Birro et al. appliquées aux essais F3P. Différentes hypothèses sont décrites et comparées : (i) la formulation du tenseur contrainte/déformation – 1D, 2D (contraintes planes ou déformations planes) et 3D – (ii) la représentation de l'interface – sans interface, interface faible, interface forte – (iii) la présence ou non de congés ainsi que (iv) la variation progressive des propriétés dans l'épaisseur au niveau de l'interphase. Quatre schémas de résolution différents sont utilisés selon les hypothèses sélectionnées : analytique, semi-analytique, ME et Éléments Finis.

Références

- [1] A.A. Roche, A. K. Behme, J. S. Solomon, Int. J. Adhes. Adhes., 2 (4), 249–254 (1982)
- [2] S. Genty, J.B. Sauvage, P. Tingaut, M. Aufray, Int. J. Adhes. Adhes., 79, 50–58 (2017)
- [3] T.V. Birro, E. Paroissien, M. Aufray, F. Lachaud, Int. J. Adhes. Adhes., 102 (2020)
- [4] D. Leguillon, Eur. J. Mech. – A/Solids, 21 (1), 61–72, (2002)

JADH00014

ANALYSE NUMÉRIQUE DE L'INFLUENCE DES DÉFAUTS DE COLLAGE SUR LA TENUE MÉCANIQUE DES RÉPARATIONS COMPOSITES PAR COLLAGE STRUCTURAL

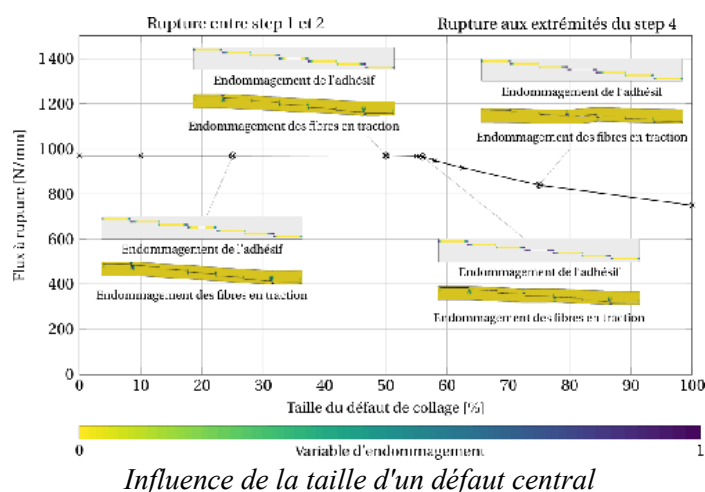
E. Hillion, F. Lachaud, E. Paroissien, S. Schwartz

Univ Toulouse, IMT Mines Albi, INSA Toulouse, ISAE-Supaero, CNRS, ICA - Toulouse (France)

L'augmentation de l'utilisation des matériaux composites, notamment dans le secteur de l'aéronautique, rend les structures plus sensibles aux impacts et aux collisions. Les réparations de structures composites permettent de restaurer la tenue mécanique initiale d'une pièce et d'éviter son remplacement. Cependant, pour des pièces structurales aéronautiques, les réparations par assemblages mécaniques restent privilégiées alors que le collage structural présente un meilleur rapport tenue-masse, pour des raisons de certification. Une première étude [1] a permis de montrer que la tenue nominale statique et le scénario de rupture d'une plaque réparée par patch circulaire steppée collée peuvent être prédites à partir de la simulation numérique d'un coupon parallélépipédique équivalent, pour un système composite stratifié carbone/époxy tissé 2D associé à un adhésif époxy structural. Ce modèle considère à la fois le décollement de l'adhésif et le délaminage inter-laminaire modélisés par des zones cohésives (CZM), ainsi que l'endommagement des plis via le critère de Hashin. L'étude présentée, s'inscrivant dans la continuité des travaux précédents [1], analyse l'influence des défauts de collage de type décollement sur la tenue résiduelle statique des réparations par patch steppés collés, et vise à terme le développement d'un modèle multi-échelle équivalent dédié à l'étude de la tolérance aux dommages. Le défaut est modélisé par une absence d'adhésif, induisant une absence locale de transfert d'efforts ; la pertinence de cette approche a été validée par des observations expérimentales [2]. Une vaste campagne d'essais numériques, a permis d'étudier l'influence de la taille et de la position du défaut sur la tenue mécanique et le scénario à rupture en statique. L'étude révèle la modification du scénario de rupture et une diminution significative de la tenue mécanique en fonction des paramètres caractérisant le défaut, mais également un effet de taille seuil, en dessous duquel le défaut n'affecte pas la rupture est également observé (voir Figure 1). Ces résultats serviront à définir une campagne expérimentale destinée à valider les modèles numériques.

Références

- [1] J.-B. Orsatelli, E. Paroissien, F. Lachaud, S. Schwartz, N. Barrière, Thin-Walled Struct., 208, 112764 (2025)
- [2] M.F.S.F. de Moura, R. Daniaud, A.G. Magalhães, Int. J. Adhes. Adhes., 26 (6), 464–473 (2006)



JADH00015

MODÉLISATION CONSTITUTIVE MULTIPHYSIQUE DES ADHÉSIFS BASÉE SUR LE MODÈLE DE MAHNKEN-SCHLIMMER POUR LA SIMULATION D'ASSEMBLAGES AUTOMOBILES MULTI- MATÉRIAUX

E. Bernard¹, T. Fkyerat², C. Cellard², L. Sohier², O. Ponte-Felgueiras³, P. Briend³,
R. Créac'hcadec¹

¹ Ensta, Irdl, Umr Cnrs 6027 - Brest (France)

² Université De Bretagne Occidentale, Irdl, Umr Cnrs 6027 - Brest (France)

³ Stellantis, Advanced Technologies & Regional Partnerships - Chartres De Bretagne (France)

Dans le cadre de la stratégie d'allègement de ses véhicules, Stellantis cherche à substituer certains éléments de carrosserie en acier par leur homologue en aluminium, introduisant ainsi des assemblages multi-matériaux dans lesquels les adhésifs de calage jouent un rôle critique. Dans l'application étudiée — un pavillon aluminium collé sur des traverses acier — l'adhésif est sollicité dès son application et soumis à l'ensemble du procédé de fabrication. Des défauts d'aspect et un endommagement de l'adhésif sont observés en fin de procédé, rendant le véhicule invendable. Comprendre et prédire le comportement de l'adhésif tout au long de ce procédé constitue donc un enjeu industriel majeur, d'autant que la simulation de la structure assemblée représente déjà un coût numérique significatif sans modélisation de l'adhésif [3].

La simulation de ce comportement requiert des modèles constitutifs capables d'appréhender les couplages entre phénomènes mécaniques, thermiques, rhéologiques et chimiques qui gouvernent la réponse de l'adhésif au cours du procédé de fabrication. Le modèle de Mahnken-Schlimmer [1] et ses extensions successives [2] offrent des bases solides, mais restent incomplets au regard des physiques mises en jeu dans cette application : le retrait chimique et la dilatation thermique, les changements de phase induits par la température et le degré de polymérisation, ainsi que leurs couplages avec le comportement mécanique, ne sont pas tous pris en compte simultanément.

Ce travail a pour objectif de proposer un cadre de modélisation constitutive enrichi, intégrant ces différentes contributions physiques de manière cohérente. Une attention particulière est portée à la représentativité du modèle vis-à-vis des conditions réelles de l'application, ainsi qu'à sa compatibilité avec une implémentation dans un code de calcul par éléments finis.

À terme, ce modèle vise à permettre la simulation numérique du comportement de l'assemblage soumis aux conditions du procédé de fabrication complet, avec pour objectif la compréhension et la prédiction des défauts d'aspect et de l'endommagement de l'adhésif observés, ouvrant ainsi la voie au choix d'adhésifs de calage adaptés pour maîtriser ces défauts en production.

Références

[1] Mahnken, R. ; Schlimmer, M. Simulation of strength difference in elasto-plasticity for adhesive materials. *Int. J. Numer. Meth. Engng.* 2005, 63, 1461–1477.

[2] Devaux, O. *Analysis and optimization of mixed-mode conical adhesively bonded joints under thermo-mechanical loadings*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 2015.

[3] Da Silva, L.M.; Cellard, C.; Geslain, E.; Sohier, L.; Ponte-Felgueiras, O.; Créac'hcadec, R. Numerical investigation of thermal buckling and post-buckling behavior of an EN AW 6016-T4 car roof assembled in a steel body-in-white. *Mech. Ind.* 2023, 24, 36.

JADH00017

OPTIMISATION DE L'ADHÉSION PAR PLASMA ATMOSPHÉRIQUE MOLÉCULAIRE : APPLICATION À LA CHIMIE DE FORMULATION AÉRONAUTIQUE REVÊTEMENTS AQUEUX FONCTIONNELS AUX COATINGS AQUEUX

F. Le Natur¹, P. Tingaut¹, M. Milani², J. Tardelli³

¹ Socomore - Vannes (France)

² MPG - Leuven (Belgium)

³ IRT M2P - Duppigheim (France)

Dans un contexte de diminution globale de l'empreinte carbone et face à une évolution constante de la réglementation, la filière aéronautique transitionne vers des coatings (peintures) à faible émission de COV, le plus souvent en phase aqueuse (water-based). Toutefois, ces formulations peinent souvent à adhérer sur des substrats complexes, tels que les composites ou certains alliages métalliques, sans préparation de surface lourdes ou polluantes. Le traitement par plasma à pression atmosphérique avec injection de précurseurs, dit "plasma moléculaire" à faible énergie, offre une solution de rupture en créant une interphase nanométrique capable de ponter chimiquement le substrat et le revêtement [1]. Il offre également un gain de temps, des temps de recouvrement après traitement plus longs et l'opportunité d'automatiser le process en comparaison de préparation de surface mécanique (ponçage, sablage, ...) [2]. C'est dans ce contexte qu'une étude de faisabilité a été réalisée.

En premier lieu, la morphologie du film polymère plasma a été mise en évidence par des observations en microscopie électronique (MEB, TEM). Les espèces chimiques présentes, ainsi que le greffage de sites fonctionnels, ont également été caractérisés par Spectroscopie Photoelectronique (XPS), à la fois sur substrats composite thermoplastique ou aluminium 2024 T3.

Une fois le dépôt caractérisé, une étude de performance d'adhésion (quadrillage - ISO 2409 et plots collés - ISO 4624) d'un primaire (ou système complet) anti-érosion a été réalisée en considérant l'influence des paramètres plasma (passes, puissance, distance, ...), substrat (état de surface initial) ou encore précurseur chimique (formulation), démontrant une augmentation de la force d'adhésion.

Les résultats ont mis en évidence une transition des modes de rupture, passant de défaillances adhésives à des comportements cohésifs performants, suite au traitement plasma atmosphérique. Ces travaux confirment que le dépôt de précurseur par la technologie plasma est un levier de performance majeur, offrant une alternative sèche, robuste, versatile et automatisable aux préparations chimiques classiques pour sécuriser les assemblages multi-matériaux.

Références

- [1] Weltmann K-D, Kolb JF, Holub M, et al. The future for plasma science and technology. *Plasma Process Polym.* 2019;16:e1800118, <https://doi.org/10.1002/ppap.201800118>
- [2] Noeske, M., Degenhardt, J., Strudthoff, S., & Lommatzsch, U. (2004). Plasma jet treatment of five polymers at atmospheric pressure: surface modifications and the relevance for adhesion. *International journal of adhesion and adhesives*, 24(2), 171-177. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2003.09.006>

JADH00018

MODÉLISATION DU CLAQUAGE ÉLECTRIQUE D'UNE COLLE ADHÉSIVE NON POLYMÉRISÉE DANS LES ASSEMBLAGES PAR PIONS SOUDO-COLLÉS ACIER-ALUMINIUM

V. Barras¹, A. Thibaudeau¹, T. Fkyerat², F. Le Poulain², R. Creac'hcadec²

¹ ENSTA - Brest (France)

² UBO - Brest (France)

Dans l'industrie automobile, la réduction du poids des véhicules est un enjeu actuel majeur. Le remplacement partiel de l'acier par l'aluminium allège les structures, mais complexifie les assemblages multi-matériaux. La technique du soudage par élément résistant est utilisée dans ce travail : des pions en acier sont insérés dans la tôle en aluminium, puis ce pion est soudé avec la tôle en acier. Cela permet d'employer des paramètres de soudage proches de ceux de l'acier tout en garantissant une tenue mécanique satisfaisante. Ces assemblages sont dits soudo-collés : une colle isolante non polymérisée est déposée sur la tôle en acier avant assemblage. Après passage en étuve, cette colle joue un rôle structural (rigidité), protège contre la corrosion galvanique et agit comme isolant électrique.

Lors de l'assemblage, la colle est appliquée sur la tôle en acier, puis un effort presseur est exercé entre la tôle aluminium (fonctionnalisée par les pions) et la tôle acier. Sous pression, la colle s'écoule partiellement, mais une épaisseur résiduelle subsiste entre le pion et la tôle acier. Cette couche assure continuité mécanique et protection galvanique, tout en bloquant le courant électrique jusqu'au claquage diélectrique. L'assemblage final du pion est réalisé avec des pinces à souder classiques, déjà présentes sur les chaînes de production.

La présence de cette colle isolante perturbe le passage du courant électrique entre le pion et la tôle d'acier. Pour que le soudage par pion se produise, un claquage diélectrique doit localement se produire dans l'adhésif, permettant au courant de traverser cette couche résiduelle. Ce claquage correspond au passage brutal du courant lorsque le champ électrique, combiné aux contraintes thermiques et mécaniques, dépasse un seuil critique comme le montre [1].

L'objectif de ce travail est de proposer un modèle numérique de claquage diélectrique pour les adhésifs non polymérisés dans les assemblages soudo-collés acier-aluminium. Ce modèle vise à prédire les conditions d'apparition du claquage en fonction du champ électrique local, de la température et de l'état mécanique de la colle. L'intégration de cette brique dans une chaîne numérique multiphysique peut permettre à terme de mieux prédire la qualité des soudures à partir du profil d'intensité électrique mesuré en production.

Références

[1] H.R. Zeller, T. Baumann, E. Cartier, H. Dersch, P. Pfluger, F. Stucki (1987). The Physics of Electrical Breakdown and Prebreakdown in Solid Dielectrics. Brown Boveri Research Center.

JADH00021

ADHÉSION LATEX SUR ALUMINIUM : CARACTÉRISATION ET PERSPECTIVES POUR LES THERMOPLASTIQUES

F. Eddebbarhi¹, J. Jumel¹, C. Goudenhooft¹, E. Chevallier²

¹ Irdl / Ensta Bretagne - Brest (France)

² Syensqo - Lyon (France)

Un latex est une dispersion aqueuse de particules de polymère qui, après séchage et filmification, forme un revêtement entrant dans la composition de peintures ou d'adhésifs, tels que les adhésifs sensibles à la pression (PSA). Les propriétés d'adhésion de ces films dépendent de la température de transition vitreuse (T_g), de la nature du substrat, de son énergie de surface, de sa rugosité ainsi que des propriétés mécaniques intrinsèques du film. L'évaluation de l'adhérence sur substrat métallique reste délicate car les essais mécaniques courants intègrent simultanément la contribution de l'interface et celle du revêtement, rendant difficile toute analyse intrinsèque de l'interface.

Ces travaux, réalisés à l'IRDL en partenariat avec Syensqo, portent sur la caractérisation de l'adhérence de films de latex acryliques sur substrat en alliage d'aluminium. Une campagne expérimentale combinant flexion trois points, cisaillement par recouvrement simple (SLJ), Double Cantilever Beam (DCB) et arrachement (pull-off) a été mise en œuvre sur des substrats bruts et sablés. Les résultats montrent que le sablage induit un passage d'un mode de rupture adhésif vers un mode mixte ou cohésif, traduisant un ancrage mécanique renforcé. La modélisation numérique par éléments finis (CZM, VCCT) a reproduit fidèlement les courbes force-déplacement et a confirmé la cohérence des taux de restitution d'énergie obtenus.

Ces travaux posent les bases d'une méthodologie discriminante pour l'interface latex/métal, mais révèlent que les essais macroscopiques ne permettent pas de dissocier la dissipation volumique du latex de la résistance intrinsèque de l'interface. Des approches à plus haute résolution spatiale (nano-indentation, AFM, choc laser LASAT) sont nécessaires pour lever ce verrou. L'extension aux substrats thermoplastiques, cibles industrielles de Syensqo, soulève par ailleurs de nouveaux enjeux physico-chimiques que ce système modèle ne permet pas d'anticiper. Ces deux points constituent le cœur du projet de thèse proposé conjointement par l'IRDL et Syensqo, dont ces travaux constituent le point de départ.

Références

- [1] Sauvage J.B. et al., Using the 3-point bending method to study failure initiation in epoxide aluminum joints, Int. J. Adhes. Adhes., 2020.
- [2] Da Silva L.F.M., Öchsner A., Adams R.D. (Eds.), Handbook of Adhesion Technology, Springer, 2011.
- [3] Bourbon J., Caractérisation expérimentale et modélisation d'assemblages collés soumis à des sollicitations mixtes, Thèse, Université de Nantes, 2022.

JADH00025

DÉSADHÉSION MULTI-MATÉRIAUX SUR DEMANDE PAR ACTIVATION THERMIQUE OU ÉLECTROMAGNÉTIQUE

J. Reynis¹, L. Ferres¹, S. Kirchner¹, B. Olalla², S. Couarraze³, P. Jouanne⁴

¹ Irt Saint Exupéry - Talence (France)

² Valeo - Bobigny (France)

³ Aumovio - Toulouse (France)

⁴ Thales Alenia Space - Cannes La Bocca (France)

Le collage s'impose aujourd'hui comme une technologie clé dans l'industrie moderne, en se substituant progressivement aux méthodes d'assemblage traditionnelles telles que le vissage ou le rivetage. Au-delà de leur fonction première d'assemblage, les adhésifs doivent assurer un ensemble de propriétés fonctionnelles, parmi lesquelles la conductivité thermique et électrique, de hautes performances mécaniques et thermiques, l'étanchéité, ainsi que l'amortissement des vibrations.

Parallèlement, le concept d'économie circulaire connaît un essor significatif auprès des acteurs industriels comme des utilisateurs finaux. Il s'articule autour des principes de réduction, de réutilisation et de recyclage, regroupés au sein du cadre des « 9R ». Dans ce contexte, la possibilité de désassembler à la demande des structures collées, sans compromettre leurs performances en service, constitue un verrou technologique majeur. Bien que plusieurs approches aient été proposées dans la littérature, la majorité d'entre elles demeure à un faible niveau de maturité technologique (TRL).

Aucune solution universelle ne permet de satisfaire l'ensemble des exigences applicatives ; les stratégies de désadhésion doivent ainsi être adaptées à chaque cas. Cela implique une prise en compte globale du produit, incluant son environnement d'utilisation, afin d'identifier une solution pertinente. Une voie prometteuse consiste à intégrer la fonction de désadhésion directement au sein des systèmes adhésifs existants, par l'incorporation d'additifs spécifiques tels que des agents gonflants physiques ou chimiques, des particules, des sels ioniques ou encore des phases liquides. Dans ce travail, deux stratégies de déclenchement sont étudiées et comparées afin d'évaluer leur efficacité pour le désassemblage : un trigger thermique conventionnel et un trigger électromagnétique. Ce dernier, bien qu'appartenant à la famille des déclenchements thermiques, permet un chauffage plus localisé et contrôlé de la zone adhésive. L'objectif est d'analyser et de comparer ces deux approches en termes d'efficacité de désadhésion, tout en prenant en compte les contraintes applicatives propres aux secteurs automobile et spatial[1],[2], telles que la limitation des températures, la diversité des matériaux adhérents (métaux, polymères, verres) et les exigences en performances mécaniques et fonctionnelles.

Références

[1] Xinying Cheng et al., « Enabling Contactless Rapid On-Demand Debonding and Rebonding Using Hysteresis Heating of Ferrimagnetic Nanoparticles », *Materials & Design* 210 (novembre 2021): 110076, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110076>.

[2] Yuchen Lu et al., « A Review of Innovations in Disbonding Techniques for Repair and Recycling of Automotive Vehicles », *International Journal of Adhesion and Adhesives* 50 (avril 2014): 119-27, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.01.021>.

JADH00033

DU SQUEEZE FLOW DE L'ADHÉSIF AU PASSAGE DU COURANT : MODÉLISATION POST-ANALYTIQUE DE L'ÉVACUATION DE LA COLLE DANS LE SOUDAGE PAR ÉLÉMENT RÉSISTANT

A. Thibaudeau¹, V. Barras¹, T. Fkyerat², L. Sohier², R. Créac'hcadec¹

¹ Ensta - Brest (France)

² Université De Bretagne Occidentale - Brest (France)

La réduction du poids de la structure des voitures est une voie majeure de développement de l'industrie automobile. En cherchant à obtenir des structures multimatériaux, des méthodes d'assemblage ont été développées afin de permettre l'usage de pièces d'acier ou d'aluminium selon les besoins locaux de la structure.

Le soudage par pion résistant permet l'assemblage de tôles de nature différente en s'affranchissant des contraintes de compatibilité propres au soudage par élément résistant conventionnel. L'application d'un joint de colle permet la liaison surfacique des deux pièces assemblées, tout en limitant la corrosion galvanique de la structure. Dans le cas du soudage par pion, la tôle d'aluminium est poinçonnée par le pion jusqu'à son épaulement, puis amené sur la tôle d'acier. Le pion est alors séparé de la tôle d'acier par une mince couche d'adhésif, isolant électriquement les deux pièces. Le procédé de soudage par point consiste à faire passer un très fort courant à travers deux plaques tout en écrasant les aspérités du contact entre les deux pièces pour faire fondre le métal environnant l'interface entre les deux pièces. Il faut donc évacuer la colle localement sous le pion pour permettre au courant de passer, et permettre alors le soudage. Cette contribution s'intéresse à la phase préalable au soudage, durant laquelle l'adhésif est soumis à un écoulement en squeeze flow sous l'action du pincement. L'objectif est de construire un cadre de modélisation progressif, partant d'un modèle analytique idéalisé, puis enrichi par l'introduction d'effets plus représentatifs du procédé. Cette approche vise à relier les paramètres matériau, géométriques et de chargement aux conditions d'amincissement et d'évacuation de la colle sous le pion.

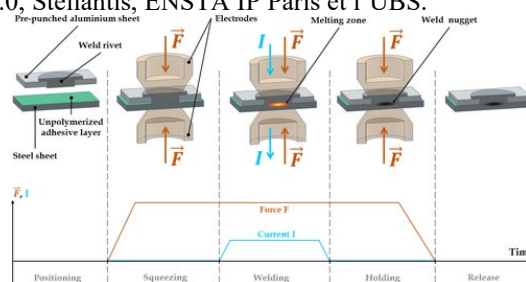
Ce travail vise à identifier les conditions favorables à l'amorçage de la conduction électrique dans l'assemblage pion-colle-tôle, tout en préparant le rapprochement entre modélisation et futures validations expérimentales à partir d'essais dédiés ou de configurations issues de la littérature.

Références

- [2]. O. Reynolds, On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp Tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 177 (1886) 157–234. doi:10.1098/rstl.1886.0005.
- [3]. M. Kaufmann, F. Flaig, M. Müller, H. Fricke, T. Vallée, Do surface pretreatments for adhesives influence the squeeze flow?, International Journal of Adhesion and Adhesives 124 (2023) 103362. doi:10.1016/j.ijadhadh.2023.103362.
- [4]. M. Huf, T. Vallée, H. Fricke, Numerical modelling and experimental validation of squeezing flows in the automobile production, International Journal of Adhesion and Adhesives 130 (2024) 103616. doi:10.1016/j.ijadhadh.2023.103616.

Remerciements

Les auteurs remercient l'IRDL pour son environnement de recherche, ainsi que le Pôle Thématique de Recherche (PTR) n°2 « Assemblages multi-matériaux » pour le cadre scientifique de ces travaux. Cette étude s'inscrit dans le projet Spotwelding Connected Solutions, financé par Bpifrance dans le cadre de l'appel à projets CORAM – France 2030, en partenariat avec 4itec 4.0, Stellantis, ENSTA IP Paris et l'UBS.



Détail du soudage par élément résistant

JADH00039

SHEAR BEHAVIOUR OF ADHESIVE JOINTS USING THE ASYMMETRIC FOUR-POINT BENDING TEST

G. Stamoulis¹, A. Ioualalen², J. Jumel²

¹ Ubo, Irdl, Umr Cnrs 6027 - Brest (France)

² Ensta, Irdl, Umr Cnrs 6027 - Brest (France)

The growing industrial preference for adhesive bonding as an assembly solution necessitates the continuous development of advanced methods to characterize their mechanical behaviour under various stress states. This paper introduces a method for investigating adhesive behaviour under pure shear using an Asymmetric Four-Point Bending (AFPB) specimen with metallic substrates. While this test is standardized for ceramic joints [1], the AFPB test has rarely been applied to adhesives, despite the significant drawbacks of conventional shear loading methods. Notably, Ashkpour et al. [2], utilized this setup to study crack initiation and propagation in laminated glass bonded with epoxy under mode II loading. The primary advantage of the AFPB geometry is its ability to load planar substrates under pure shear, which simplifies manufacturing. This is achieved because bending moments vanish along the centreline of the adhesive layer. To demonstrate this, a theoretical analysis is first presented, followed by a Finite Element Analysis (FEA) to define substrate dimensions and investigate the internal stress state. As simulations revealed edge effects, a modification of the substrate section is proposed to mitigate their impact and capture the full adhesive stress-strain curve. Following this optimization, a dedicated bonding setup was developed to ensure precise adhesive thickness. Two series of five specimens using the Betaguard®-CI6125R adhesive were tested monotonically under quasi-static conditions: (i) specimens with adhesive covering the entire bonding surface and (ii) specimens with a pre-crack at one extremity. The first series utilized Digital Image Correlation (DIC) to measure stress-strain curves, while the second employed the domain contour integral method to calculate the Mode II critical Strain Energy Release Rate (SERR). The validity of the stress-strain results was examined by comparison with the behaviour of the Betaguard®-CI6125R adhesive, previously identified using the Drucker-Prager criterion based on tests performed with a modified Arcan fixture under tensile, tension-shear, pure shear, and compression-shear loading. The mode II critical SERR results were compared with published data for the same adhesive [3]. This study demonstrates that the AFPB configuration is a promising and robust protocol for characterizing the shear behaviour of adhesive joints.

Références

- [1] «Standard Test Method for Shear Strength of Joints of Advanced Ceramics at Ambient Temperature.,» ASTM C1469-22, ASTM International, 2015.
- [2] A. Ashkpour, J. Bidadi et H. Googarchin, «Numerical analysis of mixed-mode I+ II fracture behavior of automotive PVB laminated glass using a novel beam-type test specimen,» Engineering Solid Mechanics, vol. 11(4), pp. 401-410, 2023.
- [3] G. Stamoulis et N. Carrere, «Linear elastic analysis of the loading rate dependency of the fracture properties of structural adhesives in the mixed mode I+II plane,» Engineering Fracture Mechanics, vol. 225, p. 106840, 2020.

JADH00053

INVESTIGATING THE BONDLINE INTERPHASE AND ITS ROLE IN MOISTURE DIFFUSION WITHIN FRP-STEEL ADHESIVE JOINTS

D. Petrov¹, M. Girard², E. Leprêtre¹, S. Chataigner¹, S. Paboeuf³, M. Deydier³

¹ Université Gustave Eiffel - Bouguenais (France)

² Nantes Université - Saint-Nazaire (France)

³ Bureau Veritas Marine & Offshore - Saint-Herblain (France)

The use of fibre-reinforced polymer (FRP) composite patches to repair marine metallic structures is gaining increasing attention [1]. However, durability in humid environments remains a key challenge, since polymeric materials are subjected to moisture uptake, which in most cases occurs by diffusion. The need to study the diffusive behaviour of FRP-steel adhesive joints arises from the significant effects of moisture uptake on both physical and mechanical properties of polymeric materials. For instance, Heshmati et al. [2] observed a significant decrease in failure load and a change in failure mode as a result of prolonged exposure to a humid environment for glass/epoxy-steel double-lap shear specimens. Accurate assessment of the evolution of moisture distribution within FRP-steel adhesive joints in humid environments is crucial to better understand the performance degradation processes of these assemblies.

For homogeneous diffusion systems, the approach to assess the evolution of the moisture distribution is well established in the literature. It relies on periodic weight-gain measurements of dry specimens in humid environments, which enable the identification of a diffusion model and its parameters. However, for heterogeneous systems such as FRP-steel adhesive joints, the diffusion problem becomes more complex, since the number of parameters to identify increases significantly. Indeed, a composite patch is composed of various types of plies, each with different diffusive properties. Moreover, the potential presence of an interphase in the bondline region, which has distinct diffusive properties from the bulk adhesive [3], must be considered.

In this context, this work aims to investigate the bondline interphase and its role in moisture diffusion within FRP-steel adhesive joints. Four types of specimens were manufactured following comparable protocols: FRP-steel assembly, FRP composite alone, resin-steel assembly, and bulk resin. The diffusive behaviour of each type of specimen was characterized by weight-gain measurements of specimens immersed in water. Moreover, hardness profiles were obtained across the FRP-steel and resin-steel assemblies with a nanoindenter (FT-I04, Oxford Instruments).

Weight-gain results obtained so far show typical interphase behaviour for resin-steel specimens, but not for FRP-steel specimens, which raises questions about the interphase thickness – and even its presence – in the latter case. Furthermore, the preliminary nanoindentation test campaign shows, for resin-steel specimens, a hardness gradient with increasing distance from the bondline, which is consistent with the presence of an interphase. However, no significant hardness gradient was observed for the FRP-steel specimens.

These results must be consolidated. Still, they raise questions about the chemical origin of the interphase in this case. Other factors, such as stresses, may play an important role in the formation of the bondline interphase.

Références

[1] Paboeuf S, Deydier M, Sourisseau Q, Leprêtre E, Chataigner S, Chapeleau X. Static and Fatigue Strength Assessment of Composite Patch Repair. OMAE 2024. <https://doi.org/10.1115/OMAE2024-121843>.

[2] Heshmati M, Haghani R, Al-Emrani M. Durability of bonded FRP-to-steel joints: Effects of moisture, de-icing salt solution, temperature and FRP type. *Composites Part B: Engineering* 2017;119:153–67. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.049>.

[3] Grangeat R. Durabilité des assemblages collés en environnement humide – Instrumentation par capteurs à fibre optique. PhD Thesis. Nantes Université, 2019.

Remerciements

The authors wish to acknowledge the financing partners of the Durabond-Offshore Joint Industry Project for their support.

JADH00055

CONTRAINTES RÉSIDUELLES DE POLYMÉRISATION DANS UN ASSEMBLAGE COLLÉ : EFFET DE LA CINÉTIQUE DE RÉTICULATION SUR LE DÉVELOPPEMENT D'UN GRADIENT DE CONTRAINTES

K. Chouaieb¹, M. Girard¹, M. Peron¹, R. Tomasi², S. Laik²

¹ Institut De Recherche En Génie Civil Et Mécanique (gem), Umr Cnrs 6183, Nantes Université, Centrale Nantes, Cnrs-Saint-Nazaire, France - Saint Nazaire (France)

² Cetim : Centre Technique Des Industries Mécaniques - Nantes (France)

Les assemblages collés se développent en aéronautique, automobile, naval et énergies marines renouvelables, mais leur durabilité en milieu humide reste limitée par l'absorption d'eau de l'adhésif. L'eau diffuse plus vite au voisinage des interfaces adhésif-substrat [1], sans que la capillarité ni la sous-réticulation ne suffisent à l'expliquer complètement [2], ce qui oriente l'attention vers les contraintes résiduelles de fabrication. Cette contribution a pour but d'étudier l'effet du procédé de cuisson sur la formation et la distribution des contraintes et des déformations résiduelles dans l'épaisseur du joint, et notamment dans la zone proche du substrat.

L'hypothèse testée est la suivante : un gradient de cinétique de réticulation dans l'épaisseur du joint peut-il induire, en fin de cuisson, un gradient de contraintes résiduelles, même lorsque le degré de conversion final est homogène et proche de 1 partout ? Les zones ne partageant pas la même histoire de gélification conserveraient alors une « mémoire » mécanique de leur histoire thermique.

Un modèle thermo-chimico-mécanique 2D a été développé sous FreeFEM++ pour un assemblage métal / colle époxy / métal. La cinétique de réticulation est décrite par le modèle autocatalytique de Kamal-Sourour complété par un facteur diffusionnel rendant compte de la vitrification [6]. Elle est couplée à l'équation de la chaleur avec un terme source exothermique.

Le comportement mécanique de la colle est décrit par une approche CHILE : le module et le coefficient de Poisson évoluent entre les seuils de gélification et de vitrification, la température de transition vitreuse suit la relation de DiBenedetto, et la déformation libre incrémentale combine dilatation thermique, dont le coefficient dépend de l'état liquide, caoutchoutique ou vitreux, et retrait chimique.

Les solveurs thermo-chimique et mécanique ont été validés sur trois cas de la littérature [3-5]. Une étude de sensibilité a ensuite été menée afin de quantifier l'influence des principaux paramètres du problème, énergie d'activation, largeur de l'assemblage, épaisseur des substrats et épaisseur du joint de colle, sur les champs mécaniques résiduels en fin de cuisson.

La figure 2 illustre la modification des champs mécaniques avec l'augmentation de l'épaisseur du joint dans le cas de référence. Deux régimes se distinguent selon le rapport entre l'épaisseur caractéristique du gradient et la demi-épaisseur du joint : les joints minces sont affectés dans toute leur épaisseur, tandis que les joints épais conservent un cœur quasi homogène, bordé près des substrats par une zone de gradient dont l'épaisseur reste constante.

Références

Zanni-Deffarges & Shanahan (1995), Int. J. Adhesion & Adhesives 15(3), 137–142.

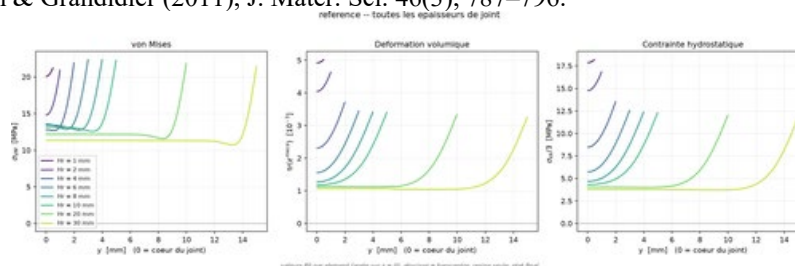
M. Girard (2023) . Habilitation à diriger des recherches. Nantes Université.

Cassano et al. (2021), Composite Structures 289, 115490.

Jumbo et al. (2010), Int. J. Adhesion & Adhesives 30(7), 523–538.

Bruère, Bouchonneau & Jochum (2018), Proc. 4th Brazilian Conference on Composite Materials (BCCM4), Rio de Janeiro, doi:10.21452/bccm4.2018.13.01.

Rabearison, Jochum & Granddier (2011), J. Mater. Sci. 46(3), 787–796.



JADH00057

PRÉSENTATION DES ESSAIS DE FISSURATION EN SOLLICITATIONS MIXTES DANS LES ASSEMBLAGES COLLÉS

J. Forler

Ensta Bretagne - Brest (France)

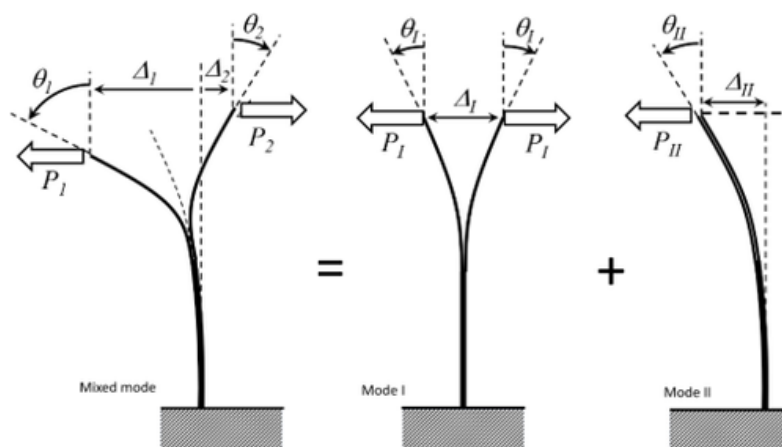
Les assemblages collés sont aujourd'hui largement utilisés dans de nombreux domaines. La caractérisation mécanique des adhésifs est indispensable pour prédire le comportement de ces assemblages, notamment vis-à-vis de la propagation des fissures.

Ce poster propose un tour d'horizon des essais mécaniques de propagation de fissuration sous sollicitations mixtes en régime quasi-statique. Ces essais permettent de déterminer le taux de restitution d'énergie G , et notamment sa valeur critique G_c , très importante pour la conception et le dimensionnement des assemblages collés.

La caractérisation en mode mixte I/II repose sur la combinaison des sollicitations en mode I (ouverture) et en mode II (cisaillement dans le plan). Le mode I est notamment étudié à l'aide de l'essai Double Cantilever Beam (DCB), tandis que le mode II est caractérisé par l'essai End-Loaded Split (ELS).

Dans l'essai DCB, une éprouvette constituée de deux substrats partiellement décollés est soumise, à l'extrémité de la zone décollée, à deux efforts opposés et identiques en norme, provoquant l'ouverture de la fissure en mode I. Dans le cas de l'essai ELS, ces efforts sont appliqués dans le même sens, générant principalement une sollicitation en mode II. En appliquant sur les deux substrats des efforts de normes différentes, il est alors possible de combiner les contributions des modes I et II afin d'obtenir une sollicitation en mode mixte (voir figure).

Les différentes relations entre les efforts appliqués, la géométrie de l'éprouvette et la longueur de fissure seront explicitées dans ce poster afin de montrer leur influence sur le taux de restitution d'énergie G .



JADH00030

MOUILLABILITÉ ET ÉNERGIE DE SURFACE DES SURFACES TRAITÉES EN LIEN AVEC L'ADHÉSION

M. Laupheimer, V. Schloupt

Dataphysics Instruments - Filderstadt (Germany)

La performance des assemblages collés et des revêtements dépend fortement des propriétés de surface des substrats. En particulier, le nettoyage et les traitements de surface tels que les traitements plasma et corona sont largement utilisés pour modifier ces propriétés et améliorer l'adhésion. Une caractérisation fiable de l'état de surface est donc essentielle pour évaluer l'efficacité de ces traitements et anticiper le comportement d'adhésion.

Un des points clés est la connaissance de la mouillabilité et de l'énergie de surface des matériaux, ce qui est expérimentalement accessible par les mesures d'angle de contact. Ces propriétés physiques fournissent des informations quantitatives sur les interactions entre un substrat et un liquide, et permettent d'évaluer la compatibilité entre un substrat et un revêtement. Il est également possible d'estimer le comportement interfacial en calculant le travail d'adhésion à partir de l'énergie de surface du substrat et de la tension de surface du liquide [1].

Plusieurs exemples illustrent l'influence de traitements de surface sur la mouillabilité et l'énergie de surface de différents types de matériaux. Les résultats mettent en évidence des modifications significatives des propriétés de surface en fonction des conditions de traitement. Ces approches permettent de comparer différentes stratégies de traitement et d'identifier des configurations favorables à une bonne adhésion.

Les aspects expérimentaux des mesures d'angle de contact sont essentiels pour garantir une caractérisation précise et reproductible des surfaces. La détermination de l'énergie de surface nécessite l'utilisation d'au moins deux liquides tests. Des unités de dosage à double distribution permettent de réaliser ces mesures de manière fiable et efficace en un seul cycle. Ces mesures sont effectuées soit directement sur site avec un appareil portable pour des contrôles qualité rapides et fiables en production soit en laboratoire où elles peuvent être mises en œuvre même sur des surfaces de très petite taille et/ou microstructurées. Un dépôt contrôlé d'un volume de l'ordre du nanolitre, notamment par double distribution, autorise l'analyse sur un endroit précis de l'échantillon (Figure 1).

Ces approches mettent en évidence l'intérêt des méthodes basées sur la mouillabilité et l'énergie de surface pour la caractérisation et le contrôle des surfaces dans des applications industrielles liées à l'adhésion.

Références

[1] Owens, D.K., Wendt, R.C. (1969), *Estimation of the surface free energy of polymers*. J. Appl. Polym. Sci., 13, 1741-1747.



Dépôt contrôlé de gouttes nanolitriques

JADH00034

EFFET DU TRAITEMENT PLASMA DU POLYPROPYLENE SUR LE COMPORTEMENT AU GEL D'UNE GOUTTE SESSILE

L. Guymard¹, A.C. Brulez^{1,2}, L. Fu¹, S. Benayoun¹

¹ Laboratoire De Tribologie Et Dynamique Des Systèmes (ltds), Cnrs Umr 5513, École Centrale De Lyon, 36 Avenue Guy De Collongue, 69134 Écully, France - Ecully (France)

² Itech Lyon, 87 Chemin Des Mouilles, 69130 Écully, France. - Ecully (France)

Contexte et objectif : Le givrage des surfaces représente un défi technologique majeur, impactant la sécurité et l'efficacité d'installations critiques (aéronautique, réseaux électriques, éoliennes). Le développement de solutions anti-givre passives — capables de retarder la nucléation ou de limiter l'adhésion de la glace sans apport d'énergie externe — constitue une voie de recherche à la fois sur le plan économique et écologique. Si l'influence de la mouillabilité macroscopique est documentée, le rôle du type d'interaction à l'interface entre le substrat et l'eau dans la dynamique de gel reste à approfondir.

Matériels et Méthodes : La démarche repose sur une campagne expérimentale systématique utilisant des substrats de Polypropylène (PP) élaborés par injection plastique et soumis à un traitement plasma afin de faire varier l'énergie de surface.

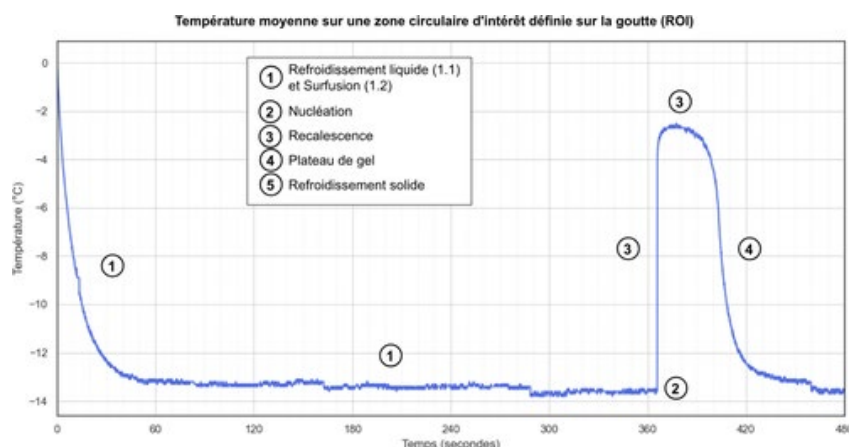
- Caractérisation de surface : Mouillage, énergie de surface et topographie, rugosité.
- Étude du comportement de gel : in situ sur une platine à température contrôlée doté d'un suivi de température par caméra infrarouge. Développement du banc de test, référence [1].
- Modélisation : Les résultats expérimentaux seront confrontés aux modèles théoriques de transfert thermique et de dynamique de transformation de phase [2-4].

Références

- [1] L.Burdin et al., Micromachines 16, 7 (2025) 756, <https://doi.org/10.3390/mi16070756>.
[2] D.Paulovics et al., Langmuir 38, 9 (2022) 2972, <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c03463>.
[3] P.Irajizad et al., Advances in Colloid and Interface Science, 269 (2019) 203, <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.04.005>.
[4] X.Zhang et al, Experimental Thermal and Fluid Science 88 (2017) 1, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.05.009>.

Remerciements

J'exprime ma gratitude envers Li Fu, Anne-Catherine Brulez et Stéphane Benayoun pour leur encadrement et leur soutien scientifique tout au long de mes travaux de thèse. Ce projet bénéficie de l'appui technique et des plateformes du Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS) et de l'ITECH Lyon. Merci à la JADH de nous permettre d'exposer nos travaux et de participer à un réseau scientifique sur des thématiques actuelles.



Courbe de gel d'une goutte sessile (5 μ L) d'eau di

JADH00037

EFFET DE LA MORPHOLOGIE DES POUDRES SUR L'ADHÉRENCE D'UN REVÊTEMENT COLD SPRAY BASSE PRESSION SUR SUBSTRAT THERMOPLASTIQUE

J-F. Coulon¹, B. Sauvager¹, A. Al-Khatib¹, J.B. Le Cam²

¹ Ecam Louis De Broglie - Bruz (France)

² Institut De Physique De Rennes - Rennes (France)

Les thermoplastiques à hautes performances (PA6.6, PEEK, PAEK, PEI) sont de plus en plus intégrés dans les matériaux composites du fait des compromis qu'ils offrent entre légèreté, résistance mécanique et recyclabilité, notamment pour les domaines de l'industrie aéronautique, automobile ou médicale. Un revêtement métallique confère à ces composites thermoplastiques une meilleure résistance à l'usure, une protection aux rayonnements et aux charges électrostatiques induites. Plus spécifiquement, le dépôt de cuivre sur les composites thermoplastiques suscite l'intérêt de l'industrie aéronautique pour l'application parafoudre[1]. Le procédé Cold Spray (CS) est un moyen de projection de particules à haute vitesse qui permet des dépôt épais (0.1 à 1mm) en minimisant l'impact thermique, seulement induit par le gaz porteur (<450°C).

De plus, à basse pression, le procédé Low Pressure Cold Spray (LPCS) est particulièrement adapté au rechargement et au dépôt sur des substrats sensibles[2]. L'un des verrous scientifiques reste toutefois le compromis à trouver entre adhérence et intégrité du substrat (polymères et fibres)[3]. Nous nous intéressons spécifiquement à l'étude de poudres de forme dendritique, comparativement et en addition à des poudres sphéroïdales. Plusieurs stratégies de dépôts sont explorées en vue d'influencer la cohésion des couches métalliques déposées et l'adhérence sur substrats en Poly-éther-éther-cétone (PEEK). La poudre dendritique permet un meilleur ancrage mécanique dans le substrat, confirmée par une rupture cohésive lors du test d'adhérence par plot collé. La géométrie particulière de ces poudres leur confère une vitesse de projection différente, qui mesurée par la technique du LASHPOL (LAsER SHock POWder Launcher) et complétée par les observations MEB de l'interaction grain-substrat permet une corrélation avec l'adhérence obtenue.

La poudre dendritique apparaît particulièrement prometteuse en tant que couche primaire, rendant alors plus aisé l'adhésion des particules sphéroïdales.

Références

- [1] F. Delloro et al., "Cold Spray of metallic coatings on polymer based composites for the lightning strike protection of airplane structures," pp. 1–12, 2022, doi: 10.13009/EUCASS2022-4804.
- [2] V. Gillet et al., "Development of low pressure cold sprayed copper coatings on carbon fiber reinforced polymer (CFRP)," Surf. Coatings Technol., vol. 364, pp. 306–316, 2019, doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.01.011.
- [3] P. Lomonaco et al., "Cold spray technology to promote conductivity of short carbon fiber reinforced polyether-ether-ketone (PEEK)," Key Eng. Mater., vol. 813 KEM, pp. 459–464, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.813.459.

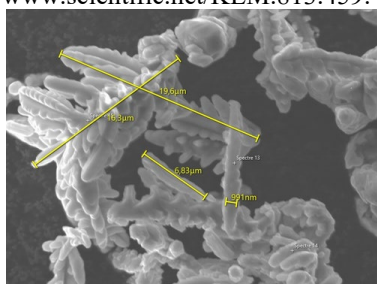
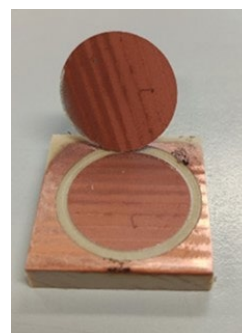


Figure 1 :Morphologie de la poudre dendritique et rupture cohésive dans le dépôt lors du test d'arrachement.



JADH00040

ÉVOLUTION DE SURFACE VERS L'AUTO-ORGANISATION DU Ti-6Al-4V PAR TRAITEMENTS COMBINÉS : SABLAGE, TEXTURATION LASER ET ANODISATION ALCALINE

G. Miranda, R. Tarpani

Universidade De São Paulo - Sao Carlos (Brazil)

La réduction de masse sans compromettre la résistance mécanique est un enjeu majeur dans les industries aéronautique et navale, favorisant le développement de matériaux plus performants. Dans ce contexte, les assemblages hybrides entre CFRP–titane suscitent un intérêt croissant pour leurs propriétés thermiques, anticorrosion et structurales. Cependant, des défis persistent concernant la durabilité des joints CFRP–titane et la compréhension des mécanismes d'adhésion, rendant nécessaire le développement de stratégies pour optimiser l'interaction interfaciale.

Dans cette optique, des surfaces en alliage Ti6Al4V ont été étudiées selon différentes conditions : état brut (Cr), sablage abrasif (Ja), sablage suivi d'anodisation NaTESi (NaTEJa), texturation laser (La), et texturation laser suivie d'anodisation NaTESi (NaTELa).

La texturation laser a été réalisée en régime pulsé, avec des durées d'impulsion de l'ordre de la milliseconde, sous atmosphère contrôlée d'argon avec un débit de 40 L/min. Le procédé a été effectué à l'aide d'un laser à fibre optique dopé à l'ytterbium, de puissance moyenne de 2 kW, opérant à une longueur d'onde de 1070 nm, avec un diamètre de faisceau de 100 µm et une lentille de distance focale de 160 mm. Le traitement d'anodisation NaTESi a débuté par une attaque chimique des échantillons dans une solution d'acide oxalique à 10 % pendant 15 minutes, visant à éliminer la couche d'oxydes passifs et les contaminants de surface. L'électrolyte utilisé était composé d'hydroxyde de sodium (300 g/L), de tartrate de sodium (65 g/L), d'EDTA (30 g/L) et de silicate de sodium (6 g/L). L'anodisation a été réalisée sous une tension de 10 V, à une température de 30 °C pendant 15 minutes.

Le sablage abrasif a été effectué manuellement à l'aide d'un pistolet sous une pression de 735,5 MPa, en utilisant des particules de type AF avec une granulométrie ASTM 74–149. Après traitement, les échantillons ont été nettoyés par jet d'air comprimé puis soumis à un bain ultrasonique dans de l'alcool isopropylique pendant 5 minutes.

Les analyses ont porté sur la mouillabilité, la rugosité et la morphologie des surfaces, afin d'identifier les paramètres favorables à l'application dans des joints hybrides. Les résultats ont montré que la surface (NaTELa), Figure 1, présente le meilleur potentiel, suivie de (NaTEJa), (La) et la surface (Ja). La surface (NaTELa) se distingue par la formation de structures périodiques plus complexes, associées à une surface spécifique élevée et à une bonne mouillabilité, favorisant ainsi les mécanismes d'adhésion et d'ancrage dans les assemblages hybrides.

Références

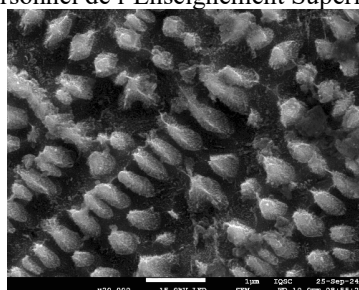
LIPSS-Sticks: Laser-induced dual self-organization enhances broadband light absorption of TiO₂ nanotube arrays. doi.org/10.1002/adpr.202000133

Durability of titanium adhesive bonds with surface pretreatments based on alkaline anodisation. doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.07.001

Nanostructure modification of titanium alloy to achieve ultra-high interfacial bond strength between titanium alloy and polyphenylene sulfide. doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.116

Remerciements

Je remercie l'Université de São Paulo, à l'École Nationale Supérieure de Techniques Avancées (ENSTA) et la Coordination de Perfectionnement du Personnel de l'Enseignement Supérieur(CAPES)



Surface NaTELa

JADH00029

EVOLUTION OF SURFACE ENERGY IN POLYPROPYLENE CHEESE MOLDS UNDER CLEANING AND FOULING CYCLES

T. Rabesolonirina¹, É. Perry², B. Paysant³, V. Humblot⁴, C. Le Floch-Fouéré⁴

¹ *L'institut Agro, Inrae, Stlo, Rennes, France - Rennes (France)*

² *Servi Doryl, R&d Department, Langeais, France - Langeais (France)*

³ *Actalia-Analytical Expertise Division, Poligny, France - Poligny (France)*

⁴ *Université Marie Et Louis Pasteur, Cnrs, Femto-St, Besançon, France - Besançon (France)*

Polymeric surfaces used in food processing environments continuously evolve under the combined effects of fouling, cleaning, and surface changes such as the deposition of organic and mineral residues. However, the impact of these coupled effects on surface energy and adhesion mechanisms remains poorly understood, particularly under industrial operating conditions. In dairy systems, such changes influence interactions between polymer surfaces and soft materials such as curd. Understanding how these events affect interfacial properties is essential to better describe potential adhesion mechanisms at solid-soft matter interfaces.

In this study, polypropylene cheese mold surfaces with different surface energy states were subjected to controlled cleaning cycles using acidic or alkaline solutions, with or without simulated fouling. Fouling was reproduced using a model mixture of proteins, lipids, and minerals of dairy origin, representative of a product undergoing draining. Surface properties were characterized by contact angle measurements to determine total surface energy and its polar and dispersive components, complemented by infrared spectroscopy and scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray analysis.

Results show that surface evolution is mainly driven by changes in the polar component of surface energy, associated with the accumulation and removal of organic and mineral deposits, while the dispersive component remains relatively stable. The observed changes also depend on the initial surface state of the material, with a non-linear evolution of surface energy over successive cleaning cycles.

Variations in surface behavior are observed during cleaning cycles, suggesting important changes at the interface, likely related to changes in the organization of deposits at the surface.

These findings highlight the reactive behavior of polymer surfaces under industrial conditions and provide new insights into the link between fouling, cleaning, and adhesion at solid-soft matter interfaces, particularly in cheese production.

JADH00019

MESURE PAR IMPÉDANCEMÉTRIE DU GRADIENT DE TENEUR EN EAU DANS UNE COLLE POLYMÈRE

H. Gzara¹, G. Wasselynck¹, M. Girard²

¹ Institute Of Research In Electrical Energy Of Nantes Atlantic - Saint Nazaire (France)

² Research Institute Of Civil And Mechanical Engineering - Saint Nazaire (France)

La pénétration de l'eau dans les matériaux constitue l'un des principaux mécanismes de vieillissement, entraînant une dégradation progressive des propriétés mécaniques et diélectriques. Le projet MICMAC (Monitoring par ImpédanceMétrie pour le vieillissement des Assemblages Collés) vise à développer une stratégie de surveillance non-destructive et in situ, afin de suivre la diffusion de l'eau dans les joints collés. Dans un premier temps, ce travail se concentre sur un substrat polymère seul, permettant d'établir et de valider le cadre de modélisation avant de traiter la configuration complète de l'assemblage collé.

La stratégie globale de surveillance repose sur une boucle d'identification inverse visant à reconstruire le gradient de teneur en eau au sein du substrat polymère. Les matrices de capacitance expérimentales C_{ex} sont acquises depuis le capteur dans différentes conditions d'humidité et comparées aux matrices simulées C_{mod} issues d'un modèle électrostatique alimenté par une distribution estimée de permittivité relative locale ϵ_r . L'écart δ entre ces deux quantités pilote un algorithme d'optimisation qui met à jour itérativement le profil de permittivité $\epsilon_{r,i}$ jusqu'à convergence. Le profil conforme $\epsilon_{r,n}$ est ensuite converti, via un modèle d'homogénéisation de Bruggeman [1], en une cartographie locale de teneur en eau W_l , offrant une image spatialement résolue de la pénétration d'eau dans le matériau.

Pour simuler la progression de l'humidité, un modèle de saturation à 20 couches est introduit, où chaque couche est saturée une à une depuis la surface du polymère vers l'intérieur. La matrice de capacitance complète est calculée pour chaque état de saturation par la méthode FP-FEM [2] puis comparée à une matrice de référence à l'état sec, produisant des cartes de sensibilité relative sur l'ensemble des paires d'électrodes. La variation relative de capacitance est définie par :

$$\partial C_{rel}^{(k)} = \frac{C_{sat}^{(k)} - C_{sec}^{(k)}}{C_{sec}^{(k)}} \quad (1)$$

Les matrices de variation relative de capacitance ∂C_{rel} présentées dans la figure 1 sont pour quatre profondeurs de saturation : couches 1, 5, 10 et 15. Lorsque l'eau pénètre plus profondément, la sensibilité s'étend aux termes hors-diagonale, permettant d'identifier, pour

chaque couche saturée, la sous-diagonale dominante de la matrice ∂C_{rel} , dont la position reflète directement l'espacement inter-électrode optimal pour sonder cette couche.

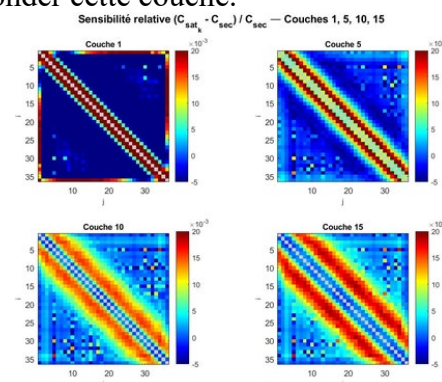
Références

A. Sihvola, "Mixing Rules with Complex Dielectric Coefficients," Subsurface Sensing Technologies and Applications, vol. 1, no. 4, p. 393-413, 2000.

A. Konrad and M. Graovac, "The floating potential approach to the characterization of capacitive effects in high-speed interconnects," IEEE Trans. Magn., vol. 33, p. 1185-1188, 1997

Remerciements

Les auteurs remercient la West Atlantic Marine Energy Community (WEAMEC) et la Région Pays de la Loire (France) pour leur soutien financier



JADH00051

FUNCTIONAL FILLERS: ENGINEERING THE MINERAL–POLYMER INTERFACE FOR NEXT-GENERATION ADHESIVES

C. Lefèvre

AFTPVA - Maizières-Lès-Metz (France)

The performance of adhesives depends not only on the nature of the polymer or mineral filler, but also on the interactions that develop at their interface. In this context, mineral fillers are evolving from a simple filling role into true functional materials capable of simultaneously influencing the rheology, mechanical properties, adhesion and durability of adhesive formulations.

This poster will focus on the main physicochemical mechanisms governing these interactions, including polymer chain adsorption, accessible specific surface area, particle morphology and porosity, as well as stress transfer at the interface. The influence of these parameters on viscosity, stability, mechanical strength, moisture resistance and ageing performance will also be discussed. Stress transfer at the mineral–polymer interface is a key mechanism governing the mechanical performance of filled adhesives. When an adhesive is subjected to mechanical loading, the polymer matrix deforms and the resulting stresses must be efficiently transferred to the mineral particles through the interface. If interfacial adhesion is weak, particles can debond from the polymer matrix, promoting crack initiation and propagation and ultimately leading to premature failure. In contrast, a strong and well-controlled interface enables stresses to be more efficiently distributed throughout the material, increasing strength and improving toughness. The nature, morphology and surface characteristics of the mineral filler therefore play a critical role in controlling stress transfer and, consequently, the overall mechanical performance of the adhesive. These phenomena will be illustrated through several case studies, particularly involving STP/MS Polymer adhesives and structural adhesives. Particular attention will be given to Neuburg Siliceous Earth, whose combination of amorphous silica and kaolinite, microporosity, morphology and intermediate specific surface area gives it a different behaviour from conventional mineral fillers such as calcium carbonate.

The objective is therefore to demonstrate how understanding and controlling the mineral–polymer interface can become a genuine driver of innovation for developing adhesives with improved performance and durability, while optimizing formulation costs and reducing dependence on the polymer phase. These challenges directly address the main concerns currently facing adhesive formulators: reducing polymer content, improving performance, enhancing durability and optimizing the cost/performance ratio.

Références

A critical review of wetting and adhesion phenomena in the preparation of polymer-mineral composites. J. Drelich and J.D. Miller Minerals and Metallurgical Processing, Vol. 12, No.4 November 1995.

Analysis of the influence of coupling agents on the composition of artificial rocks with polymer matrix. Marcelo Barcellos Reis, Elaine Aparecida Santos Carvalho, Geovana Carla Girondi Delaqua, Afonso Rangel Garcez de Azevedo, Sérgio Neves Monteiro & Carlos Maurício Fontes Vieira. [www.nature.com/Scientific Reports \(2025\)](https://www.nature.com/Scientific Reports (2025) 15:32619) 15:32619

Interaction between filler and polymeric matrix in nanocomposites: magnetic approach and applications. Moises Bustamante-Torres, David Romero-Fierro, Belén Arcentales-Vera, Samantha Pardo and Emilio Bucio. *Polymers* 2021, 13, 2998.

Remerciements

Susanne Reiter - Area Sales Manager
HOFFMANN MINERAL GmbH
Muenchener Strasse 75
D-86633 Neuburg a. d. Donau (Germany)

JADH00059

PROJET « ÇA COLLE AU TRAIT » : DES POSTERS POUR APPRENDRE ET COMMUNIQUER EN SCIENCE DES MATÉRIAUX

M. Aufray¹, L. Rivière²

¹ CIRIMAT, Université de Toulouse, Toulouse INP, CNRS - Toulouse (France)

² Les deux mains - Toulouse (France)

Dans le cadre du cours Adhésion et Adhérence, le projet « Ça colle au trait » a permis d'explorer la facilitation graphique comme outil d'apprentissage et de communication scientifique.

Les posters présentés ici ont été conçus et réalisés par Lisa Rivière, facilitatrice graphique, à partir des contenus scientifiques du cours. Ils proposent une traduction visuelle des notions liées à l'adhésion et à l'adhérence.

Le livret associé à cette présentation rassemble les productions réalisées par les étudiant·es de l'INP-ENSIACET à partir de cette démarche. Il permet de découvrir comment ils et elles se sont approprié les notions du cours et les ont traduites graphiquement, en mobilisant à la fois leurs connaissances scientifiques et leur créativité.

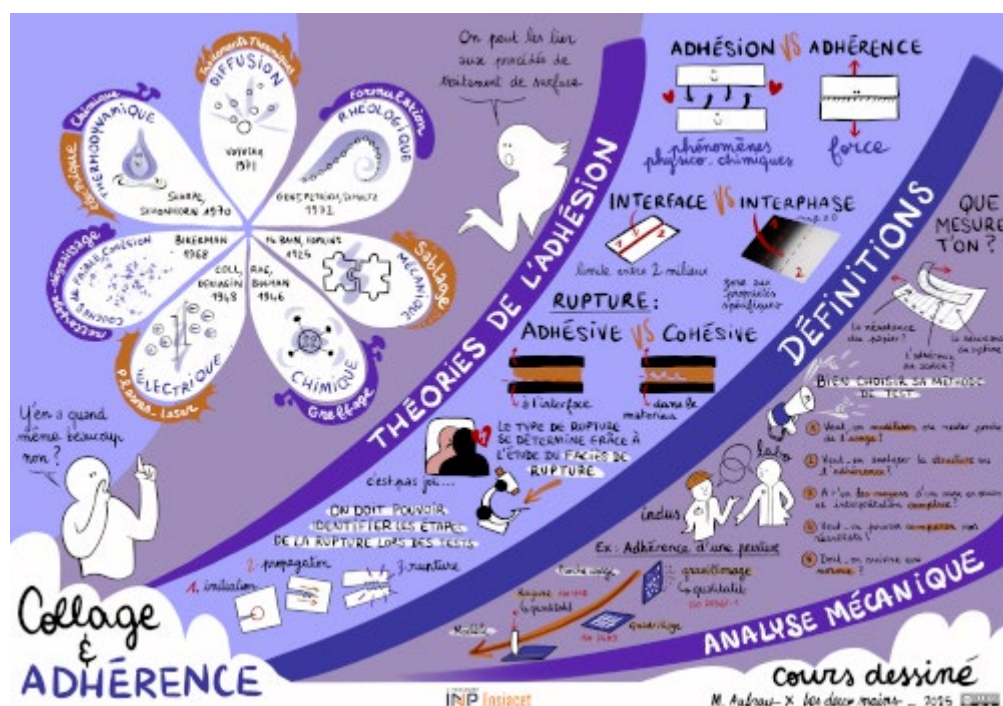
L'ensemble met ainsi en évidence deux niveaux de production complémentaires : les posters de la facilitatrice graphique (figures 1 et 2), conçus comme supports pédagogiques, et les productions des étudiant·es, témoignant de leur appropriation et de leur capacité à communiquer visuellement des connaissances scientifiques.

Références

<https://www.lesdeuxmains.fr/portfolio-collections/tous-les-projets/c%CC%A7a-colle-au-trait-ff5f2c>

<https://www.lesdeuxmains.fr/portfolio-collections/tous-les-projets/c%CC%A7a-colle-au-trait>

<http://maelenn.aufray.free.fr/teaching.php>



Théories de l'adhésion et mesure de l'adhérence

PLANNING GENERAL JADH 2026