الجمهـوريـــة الجزائـريـــة الديمقـراطيـــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـيـــم العـــالـــي والبـحـــث العـلمـــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Universitéd'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie industriel
Spécialité : Maintenance des automatismes et de l'instrumentation industrielle

Thème

Application des Matériaux Composites pour la Maintenance Préventive et Corrective des Equipements Industriels : Étude Physique, Résistance et Intégration dans les Systèmes Automatisés de Maintenance

Présenté et soutenu publiquement par :

KERDAH Abdelkader

MERHOUL Khawla

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Hasini abdelatif	Presedent	**IMSI**	**Président**
Adda negaz	examinateur	**IMSI**	**Encadreur**
Hadj kadour amel	Encadreur	**IMSI**	**Examinateur**

Année 2024/2025

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier Dieu, notre créateur qui nous a donné la force pour accomplir ce modeste travail. Ce présent mémoire de fin d'étude, n'aurait pu avoir le jour sans contribution de nombreuses personnes, dont nous faisons aujourd'hui un plaisir et un devoir de les remercier. Avant tout, nous tenons à remercier messieurs les membres du jury pour leurs collaborations durant l'examen de ce travail et leurs participations à la soutenance. Nous adressons tout particulièrement notre reconnaissance à madame l'encadrante HADJ KADDOUR AMEL pour la direction de cette thèse, pour ses conseils et son aide. Sans oublier les enseignants de l'Institut de Maintenance et De Sécurité Industrielle. Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à l'élaboration de ce présent mémoire, trouvent ici l'expression de notre profondes gratitudes et respect

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :
À mes très chers parents

Source inépuisable de patience et de sacrifice. Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais jamais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance. Le soutien et les sacrifices qu'il sont consentis pour moi au long de ce travail, je tiens à ce qu'ils sachent
que leurs encouragements sont une part importante de la réussite de mes études. Aucune dédicace ne peut exprimer la profondeur des sentiments fraternels et d'amour, d'attachement que j'éprouve à votre égard.

À mes chères frères et sœurs .Je vous souhaite tout le bonheur du monde. Un grand merci à eux, pour leur encouragement, leur compréhension et leur grand amour et m'ont permis de surmonter toutes les difficultés. Je remercie mes collègues et mes amis tous particulièrement. Ce mémoire est le fruit d'un travail collectif et nous souhaitons dédier cette réalisation à toutes les personnes qui ont cru en nous ,nous ont encouragé set ont contribué à notre réussite .Merci du fond du cœur pour votre soutien indéfectible et votre confiance tout au long de ce parcours

Résumé :

Ce projet de fin d'études porte sur l'application des matériaux composites dans la maintenance industrielle, en se concentrant sur leur utilisation pour la réparation et le renforcement des équipements. L'objectif est d'étudier les propriétés physiques des matériaux composites, tels que les fibres de carbone et de verre, ainsi que leur résistance et durabilité dans un contexte industriel. Le travail inclut des calculs de résistance et des simulations numériques pour évaluer leur comportement sous contraintes. Il aborde également l'intégration de ces matériaux dans des systèmes automatisés de maintenance, afin de proposer des solutions pour améliorer la fiabilité, réduire les coûts de maintenance et prolonger la durée de vie des équipements. Ce projet démontre l'importance des matériaux composites comme alternative efficace aux matériaux traditionnels dans le domaine de la maintenance industrielle.

Mots clés : Matériaux composites- Maintenance industrielle- Réparation industrielle- Systèmes automatisés de maintenance.

Abstract :

This final-year project explores the application of composite materials in the field of industrial maintenance, with a particular focus on their use in the repair and reinforcement of equipment. The studyaims to analyze the physical and mechanical properties of composite materials—such as carbon and glass fibers—and to evaluate their behavior under various loading conditions through strength calculations and numerical simulations. Additionally, the projecti nvestigates the integration of the sematerials into automated maintenance systems, with the goal of developing innovative solutions that enhance equipment reliability, reduce maintenance costs, and extend operational lifespan. This work underscores the growingrole of composite materials as high-performance alternatives to traditional materials in optimizing the efficiency and sustainability of industrial maintenance processes.

Keywords: Composite materials - Industrial maintenance - Industrial repair - Automated maintenance systems

الملخص:
يركز مشروع التخرج هذا على توظيف المواد المركبة في مجال الصيانة الصناعية، مع الاهتمام بشكل خاص بعمليات إصلاح وتقوية المعدات
الصناعية. يهدف المشروع إلى تحليل الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمواد المركبة، مثل ألياف الكربون والزجاج، ودراسة سلوكها تحت تأثير
الأحمال والضغوط المختلفة باستخدام حسابات مقاومة المواد والمحاكاة الرقمية. كما يتناول المشروع سبل دمج هذه المواد ضمن أنظمة
الصيانة المؤتمتة، من أجل تطوير حلول مبتكرة تساهم في رفع موثوقية المعدات، تقليل تكاليف الصيانة، وإطالة عمر الخدمة. يبرز هذا العمل
البحثي الدور المتزايد للمواد المركبة كبديل عالي الأداء للمواد التقليدية في تحسين كفاءة واستدامة عمليات الصيانة الصناعية.
الكلمات المفتاحية : المواد المركبة- الصيانة الصناعية- الإصلاح الصناعي- أنظمة الصيانة الآلية.

Sommaire

Remerciements ***1***

Dédicaces ***2***

Résumé : ***3***

Abstract : ***3***

الملخص: ***4***

Liste des figures ***8***

Listes de tableaux ***10***

Introduction Générale ***11***

Chapitre I: Les Matériaux Composites ***3***

Introduction **4**

1.1. Définition et composition des matériaux composites **4**

1.1.1. Définition 4

1.1.2. Composition 5

1.1.2.1. Les fibres de renforcement 5

1.1.2.2. La matrice 6

1.1.2.3. L'interface 8

1.1.2.4. Les charges additives 8

1.2. Fabrications **8**

1.3. Avantages des matériaux composites **9**

1.4. Différences avec les matériaux classiques **11**

1.5. Limitations des matériaux traditionnels dans la maintenance industrielle **12**

1.6. Propriétés physiques des matériaux **13**

1.6.1. Résistance mécanique des matériaux composites 13

1.6.2. Élasticité et rigidité 14

1.6.3. Durabilité dans les environnements industriels 14

Conclusion **15**

Chapitre II : Applications des Matériaux Composites dans la maintenance ***16***

Introduction **17**

2.1. Maintenance industrielle et rôle des matériaux composites **17**

2.1.1. La maintenance préventive 17

2.1.1.1. Définition 17

2.1.1.2. Types d'interventions en maintenance préventive 18

2.1.1.3. Objectifs de la maintenance préventive 18

2.1.1.4. Avantage de la maintenance préventive 18

2.1.1.5. Limites de la maintenance préventive 19

2.1.1.6. Applications spécifiques en maintenance préventive 19

2.1.2. La maintenance corrective 19

2.1.2.1. Définition 19

2.1.2.2. Types d'interventions en maintenance corrective 20
2.1.2.3. Avantages de la maintenance corrective 20
2.1.2.4. Limites de la maintenance corrective 20
2.1.2.5. Applications spécifiques en maintenance corrective 21

2.2. Intégration des matériaux composites dans les systèmes de maintenance automatisée 21
2.2.1. Définition d'un système automatise de maintenance (AMS) 21
2.2.1.1. Les composantes principales d'un AMS 22
2.2.1.2. Les objectifs d'un AMS 22
2.2.2. Présentation des Technologies : Robots, Drones et Capteurs 23
2.2.2.1. Robots 25
2.2.2.2. Drones 26
2.2.2.3. Capteurs 27
2.2.3. Exemple d'application 29

Description du schéma 30

2.3. Limites et défis liés à l'utilisation des matériaux composites en maintenance 30
2.3.1. Contraintes de coût 30
2.3.2. Contraintes techniques (dégradation thermique, vieillissement) 31
2.3.3. Problèmes d'assemblage et de réparation des composites 31

2.4. Perspectives d'avenir 31
2.4.1. Développement de nouveaux composites plus intelligents 32
2.4.2. Rôle de l'intelligence artificielle dans la maintenance prédictive des composites 32
2.4.3. Exemples de recherches récentes et innovations futures 32

Conclusion 33

Chapitre III: Modélisation et Simulations du Comportements des Composites 34

3.1. Modélisation du comportement des composites. 35
3.1.1. Les méthodes de modélisation 35
3.1.1.1. La méthode des éléments finis (MEF) 35
3.1.1.2. Méthode des éléments de frontière (BEM - Boundary Element Method) 36
3.1.1.3. Méthode des volumes finis (FVM - Finite Volume Method) 36
3.1.1.4. Méthode des différences finies (FDM - Finite Difference Method) 36
3.1.1.5. Méthode des éléments spectraux (SEM - Spectral Element Method) 36
3.1.1.6. Méthode de l'homogénéisation numérique 37
3.1.1.7. Méthode des champs moyens (Mean Field Homogenization) 37
3.1.2. Les niveaux de modélisation 37
3.1.2.1. Modélisation macroscopique (ou homogénéisée) 37
3.1.2.2. Modélisation microscopique (ou microstructurale) 38
3.1.2.3. Modélisation multi-échelle 38

3.2. Outils de simulation 38

3.3. Analyse de la résistance des composites 41
3.3.1. Résistance mécanique : *traction, compression, impact* 41
3.3.1.1. Résistance à la traction 41
3.3.1.2. Résistance à la compression 41
3.3.1.3. Résistance aux impacts 42
3.3.2. Influence de l'environnement industriel 42
3.3.2.1. Chaleur et humidité 42
3.3.2.2. Vibrations et chargements cycliques 43
3.3.2.3. Agents chimiques 43

3.3.3. Validation expérimentale 43
3.4. Applications et perspectives : **44**
3.5. Perspectives et innovations **44**
Conclusion **45**
Chapitre IV : Etude de Cas et Applications Industrielles ***47***
Introduction **48**
4.1. Présentation du câblerie Sidi Bendehiba (GISB) : **48**
4.1.1. Situation géographique : 48
4.1.2. Fonctionnement 49
4.2. Besoins en maintenance et problématique identifiée **49**
4.2.1. Types de défaillances les plus fréquentes : 50
4.2.2. Conséquences sur la production 50
4.3. Limites des méthodes actuelles de maintenance : **50**
4.4. intégration des matériaux composites au sein de l'usine GiSB **51**
4.4.1. Équipements ou zones concernées 51
4.4.2. Application des matériaux composites : 52
4.4.3. Matériaux composites envisageables 52
4.4.4. Avantages attendus 53
4.4.5. Processus d'intégration des matériaux composites 53
4.4.6. Besoins en formation du personnel 54
4.4.7. Conditions de réussite de l'intégration chez GiSB 54
4.4.8. Exemple d'application au sein du site de GiSB 55
4.4.8.1. Exemple 1 55
4.4.8.2. Exemple 2 56
4.5.3. Résultats et Interprétations 61
4.5.3.1. Résultats : 63
4.5.3.2. Interprétations 63
Conclusion **64**
Conclusion Générale ***66***
Référence et bibliographiques ***70***

Liste des figures

Figure 1.1: Schéma de classification des matériaux composites.....4

Figure 1.2: Schéma représentante du composition du composite.....4.

Figure 1. 3: Composition de matériaux composites.....5

Figure 1.4: Structure d'un composite polymère.....6

Figure 1.5:Structure d'une matrice céramique.....7

Figure 2.1: Robot Industriel ABB……..24

Figure 2.2: Drone Agricole DJI AGRAS T25……...….24

Figure 2.3:*Robot industriel en action sur une ligne de production. Source : Unsplash – Photoby Remy Gieling*……..25

Figure 2.4: Robot logistique autonome utilisé pour le tri et le transport dans un entrepôt moderne…….……..……25

Figure 2.5: Système chirurgical robotisé Da vinci utilisé en salle d'opération pour des interventions de haute précision……..……25

Figure 2.6: Inspection d'un bâtiment à l'aide d'un drone pour évaluer l'intégrité structurelle et prévenir les risques……...…….26

Figure 2.7: Utilisation de drones pour la pulvérisation ciblée et la surveillance des cultures dans le cadre de l'agriculture de précision……..…..…….27

Figure 2.8: Utilisation d'un drone pour localiser des victimes et évaluer les dégâts après une catastrophe naturelle…….…….……27

Figure 2.9: Système de contrôle en temps réel supervisant la température, la pression et le débit dans un processus industriel automatise…….……..27

Figure 2.10:Surveillance en temps réel des vibrations et de la température à l'aide d'un capteur connecté pour anticiper les défaillances mécaniques……..….…….28

Figure 2.11: Utilisation d'un détecteur de gaz portable pour surveiller en temps réel les fuites de gaz dangereux dans un environnement industrie……..28

Figure 2.12: Schéma d'intégration des drones en matériaux composites dans les systèmes d'inspection intelligente…….....29

Figure 4.1: Vue géographique de l'entreprise……...48.

Figure 4.2: Exemple de corrosion avancée sur une pièce métallique……..…..……50

Figure 4.3:Réducteur de vitesse encrassé avec fuite d'huile……51.

Figure 4.4: Fissure observée sur un support métallique d'équipement……52

Figure 4.5: Diagramme comparative pales en acier vs composites…….57

Figure 1.6: Diagramme comparative des contraintes moyennes…….62

Figure 4.7:Diagramme comparative des déplacements maximum……..62

Listes de tableaux

Tableau1.1 : Comparatif entre les matériaux composites et les matériaux classiques…..…..9

Tableau 4.1 : Analyse technique comparative **……..**56

Tableau 4.2 : Évaluation des coûts et de la durabilité : Métal vs GFRP……..……...56

Tableau 4.3 : Résultats comparatif avec valeurs approximatives…….……57

Tableau 4.4 : Les données d'entrées…….59

Tableaux 4.5 : Résultats obtenu par le logiciel Matlab…….63

Introduction Générale

La maintenance industrielle constitue un domaine stratégique au sein des systèmes de production modernes. Elle vise à garantir le bon fonctionnement des équipements, à optimiser leur disponibilité et à réduire les coûts liés aux arrêts imprévus. Face à une demande croissante en performance, fiabilité et durabilité, les industriels doivent faire face à plusieurs défis : la gestion de l'usure des matériaux, la détection précoce des pannes, la réduction des temps d'intervention, ainsi que la transition vers des solutions plus durables et intelligentes. Dans ce contexte, l'innovation technologique joue un rôle clé, notamment à travers l'intégration de nouveaux matériaux.

Les matériaux composites, combinant une matrice (souvent polymère) et un renfort (comme les fibres de verre, de carbone ou naturelles), se présentent comme une alternative performante aux matériaux traditionnels utilisés dans la maintenance industrielle. Ces derniers, souvent métalliques, montrent des limites importantes telles qu'un poids élevé, une sensibilité à la corrosion ou des propriétés mécaniques peu adaptées à certaines contraintes spécifiques. À l'inverse, les matériaux composites sont légers, résistants mécaniquement, durables dans des environnements agressifs, et peuvent être adaptés à des configurations complexes. Ces caractéristiques permettent d'améliorer significativement l'efficacité, la durabilité et la fiabilité des interventions de maintenance

Dans le cadre de la maintenance préventive – qui vise à anticiper les défaillances par des inspections régulières, lubrifications, remplacements de pièces, etc. – les composites offrent dissolutions robustes et durables. Pour la maintenance corrective – déclenchée après l'apparition d'un dysfonctionnement – leur capacité à restaurer les structures tout en conservant de bonnes performances mécaniques constitue un avantage majeur. De plus, l'intégration des composites dans les systèmes de maintenance automatisée, tels que les drones d'inspection ou les robots de réparation, permet d'alléger les structures, de renforcer la fiabilité des outils, et de réduire les coûts de maintenance à long terme.

Ce projet de recherche s'inscrit dans cette dynamique et vise à explorer l'apport des matériaux composites dans la maintenance industrielle à travers plusieurs axes. Le chapitre 1 sera dédié à la définition des matériaux composites, à la présentation de leurs composants (matrices et fibres), à leurs propriétés physiques et à la comparaison avec les matériaux traditionnels. Le chapitre 2 analysera en détail les applications des composites dans la maintenance préventive et corrective, ainsi que leur intégration dans des systèmes automatisés. Le chapitre 3 portera sur les approches de modélisation et de simulation

numérique permettant de prédire le comportement mécanique des composites dans divers environnements industriels. Enfin, le chapitre 4 proposera des études de cas issues de

Secteurs comme l'aéronautique, l'automobile ou l'énergie, permettant d'illustrer concrètement les bénéfices liés à l'utilisation des composites dans la maintenance industrielle.

Chapitre I: Les Matériaux Composites

Introduction

Dans un contexte où les industries recherchent des solutions à la fois performantes, légères et durables, les matériaux composites sont devenus des alliés incontournables. Leur part démarché mondial, en croissance constante, est estimée à plus de 130 milliards USD en 2024, avec une forte progression dans les domaines de l'automobile et de l'aéronautique (Market Research Future, 2023). Ces matériaux répondent à des contraintes mécaniques élevées tout en permettant un allègement significatif des structures. Le présent chapitre explore les facteursqui sous-tendentcetessor,en s'appuyant sur des données récentes,

des comparaisons avec les matériaux conventionnels, et une analyse de leur conception et de leur intégration dans des systèmes complexes **[1].**

1.1. Définition et composition des matériaux composites

1.1.1. Définition

Les matériaux composites sont des matériaux formés par l'association de deux ou plusieurs composants distincts, généralement un renfort (comme des fibres) et une matrice (comme des polymères).

Cette combinaison confère au matériau des propriétés supérieures à celles de ses constituants pris individuellement. L'objectif principal est d'optimiser les performances mécaniques, chimiques et thermiques du produit final en tirant parti des avantages de chaque composant. Les composites sont utilisés dans divers domaines industriels, notamment l'aéronautique, l'automobile, la construction, le sport, la médecine, et même dans les énergies renouvelables comme l'éolien **[2].**

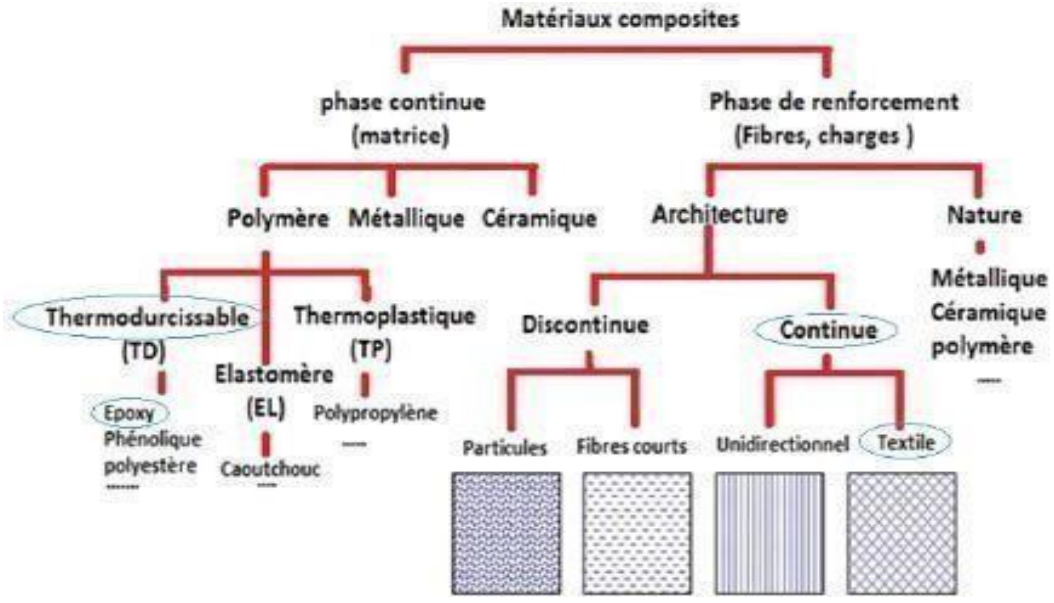


Figure 2.1: Schéma de classification des matériaux composites

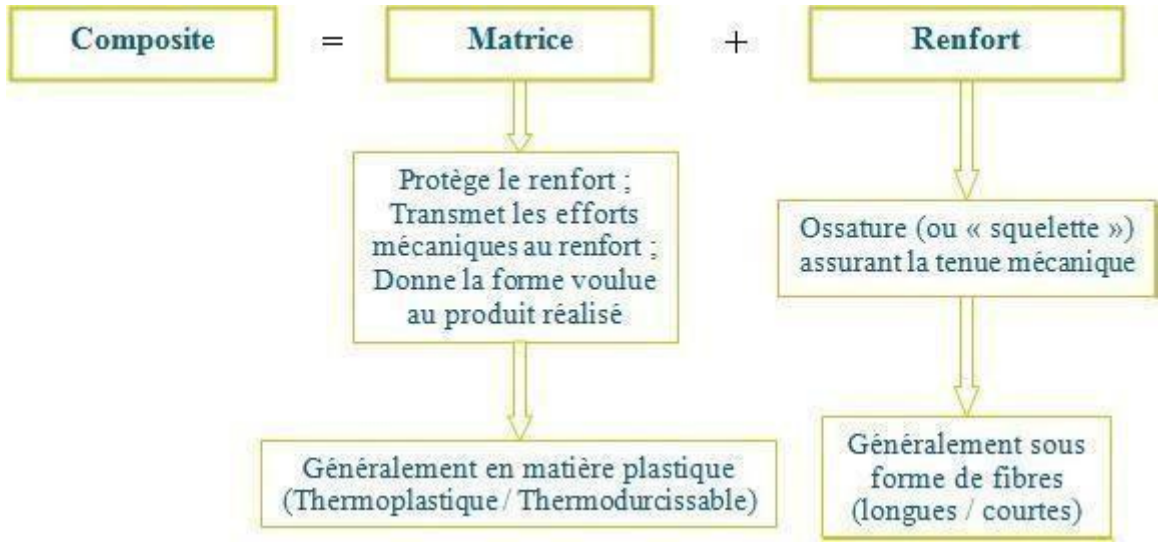


Figure 1.3: Schéma représentante du composition du composite

L'intérêt croissant pour les composites provient de leur capacité à offrir une résistance mécanique élevée pour un poids réduit, ce qui les rend idéaux pour les applications nécessitant légèreté, robustesse et durabilité **[3].** De plus, leur capacité à résister à la corrosion et à la fatigue en fait des matériaux de choix pour des environnements exigeants.

1.1.2. Composition

Un composite se compose principalement de trois éléments

1.1.2.1. Les fibres de renforcement

Elles assurent la résistance mécanique et la rigidité du matériau. On distingue plusieurs types :

- **Fibres de carbone** : Excellente résistance mécanique, rigidité élevée et faible densité. Elles sont couramment utilisées dans l'aéronautique, l'automobile, les équipements sportifs, et les prothèses médicales.
- **Fibres de verre :** Moins coûteuses, elles offrent une bonne résistance chimique et une isolation électrique acceptable. Utilisées dans la construction, les applications marines, et les réservoirs sous pression.
- **Fibres d'aramide (Kevlar)** : Bonne résistance à l'impact, à l'abrasion, et à la traction, mais faible résistance à la compression. Utilisées pour les gilets pare-balles, les équipements de protection, et les structures aérospatiales.
- **Fibres naturelles** : Issues de plantes comme le lin, le chanvre ou le jute, elles

sont écologiques mais présentent des propriétés mécaniques variables. Utilisées pour les applications durables, comme les pièces automobiles écologiques et les matériaux de construction respectueux de l'environnement.

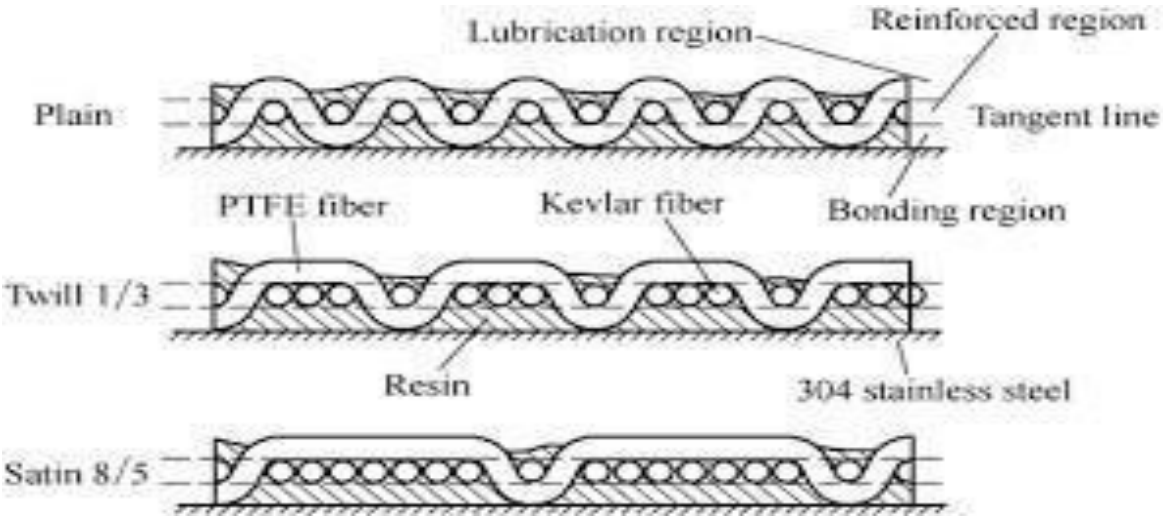


Figure 1. 4: Composition de matériaux composites

1.1.2.2. La matrice

La matrice lie les fibres entre elles et assure la transmission des efforts. Elles sont classées en trois catégories :

- **Matrice polymère** : La plus courante, elle se divise en thermodurcissables (ex. : époxy, polyester) et thermoplastiques (ex. : PEEK, PPS). Les matrices thermodurcissables durcissent de manière irréversible après polymérisation, tandis que les thermoplastiques peuvent être ramollis par chauffage et durcis par refroidissement.

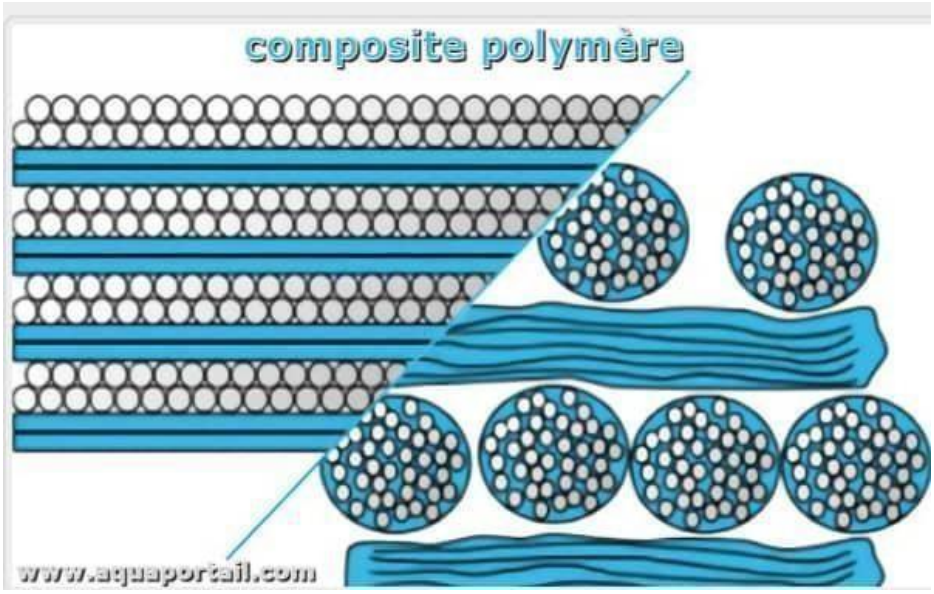


Figure 1.5: Structure d'un composite polymère

- **Matrice métallique** : Utilisée pour les applications à haute température, comme dans l'aéronautique et l'industrie automobile. Ces composites offrent une excellente résistance thermique et mécanique.

- **Matrice céramique** : Résistante à la chaleur mais fragile, utilisée dans les applications nécessitant une isolation thermique extrême, comme les boucliers thermiques des engins spatiaux.



Figure 1.6:Structure d'une matrice céramique

1.1.2.3. L'interface

C'est la zone de contact entre la matrice et les fibres, assurant la cohésion du composite. Une bonne interface garantit un transfert efficace des contraintes, augmentant ainsi la performance globale du matériau. L'interface est cruciale pour la durabilité du composite, car une mauvaise adhésion peut entraîner une défaillance prématurée.

1.1.2.4. Les charges additives

En plus des fibres et de la matrice, des charges peuvent être ajoutées pour améliorer certaines propriétés spécifiques, telles que la résistance aux UV, la conductivité électrique ou thermique, ou encore la résistance au feu. Les charges peuvent être sous forme de particules, de nanoparticules ou de microbilles.

1.2. Fabrications

Les composites sont fabriqués par divers procédés, notamment :

- **Le moulage par injection** : Utilisé pour les composites thermoplastiques.
- **La stratification manuelle** : Idéale pour les petites séries.
- **Le moulage sous vide** : Assure une meilleure imprégnation des fibres par la résine.
- **L'enroulement filamentaire** : Utilisé pour les réservoirs sous pression et les tuyaux.
- **La pultrusion** : Permet de produire des profils composites continus

1.3. Avantages des matériaux composites

Tableau1.1 : Comparatif entre les matériaux composites et les matériaux classiques

Critère	Matériaux composites	Matériaux classiques
Poids	Léger	Lourd
Résistance	Très élevée	Moyenne à élevée
Résistance à corrosion	Excellente	Faible sans protection
Facilité de fabrication	Complexe	Simple

Les matériaux composites présentent plusieurs avantages par rapport aux matériaux traditionnels **[3]** :

- **Légèreté** : Grâce à la faible densité des fibres et des matrices polymères, les composites sont beaucoup plus légers que les métaux, ce qui réduit la consommation énergétique dans les applications de transport. Par exemple, dans l'aéronautique, l'utilisation des composites permet de diminuer la masse des avions, réduisant ainsi la consommation de carburant et les émissions de CO_2 .
- **Résistance mécanique élevée** : Les composites présentent une excellente résistance à la traction, à la compression et à la flexion. Par exemple, les fibres de carbone peuvent supporter des contraintes supérieures à celles de l'acier pour un poids nettement inférieur. Cette propriété est essentielle pour les applications structurelles, telles que les ailes d'avions, les coques de bateaux et les cadres de vélos haut de gamme.
- **Flexibilité de conception** : Les composites peuvent être moulés dans des formes complexes, facilitant la fabrication de pièces sur mesure pour des applications spécifiques. Cette flexibilité permet de concevoir des structures optimisées, réduisant le gaspillage de matériaux et améliorant les performances globales.
- **Durabilité** : Ils résistent à la corrosion, aux produits chimiques, à l'usure et à la fatigue, prolongeant ainsi la durée de vie des structures. Les composites sont

particulièrement appréciés dans les environnements marins, chimiques, et industriels.

- **Isolation thermique et électrique** : Les composites sont d'excellents isolants, ce qui les rend utiles dans les applications électriques et thermiques. Les fibres de verre, par exemple, sont souvent utilisées pour les isolateurs électriques dans les lignes à haute tension.
- **Maintenance réduite** : Leur résistance à la corrosion et à l'usure limite les interventions d'entretien, réduisant ainsi les coûts de maintenance sur le long terme. Les pipelines en composites, par exemple, nécessitent beaucoup moins d'entretien que leurs homologues en acier.
- **Propriétés personnalisables** : En variant les types de fibres, de matrices et les procédés de fabrication, il est possible de concevoir des composites avec des propriétés spécifiques adaptées à chaque application. Cette personnalisation permet d'optimiser les performances en fonction des contraintes environnementales et mécaniques.
- **Écologie et durabilité** : L'utilisation de fibres naturelles, de résines biosourcées et de techniques de fabrication écoresponsables contribue à réduire l'empreinte carbone des composites. De plus, certains composites thermoplastiques peuvent être recyclés, favorisant une économie circulaire.
- **Amortissement des vibrations** : Les composites ont une capacité naturelle à absorber les vibrations, ce qui améliore le confort des structures, comme les sièges d'automobiles ou les cadres de vélos, tout en réduisant les nuisances sonores.
- **Résistance à la chaleur** : Certains composites, en particulier ceux à matrice céramique ou métallique, peuvent résister à des températures très élevées, ce qui les rend idéaux pour les applications aéronautiques, spatiales et industrielles.
- **Sécurité accrue** : Les composites peuvent être conçus pour résister au feu, offrant une meilleure sécurité dans les environnements à risque. Les résines ignifugées sont couramment utilisées dans les trains, les avions et les bâtiments publics.
- **Réduction des coûts énergétiques** : Grâce à leur légèreté, les composites permettent de diminuer la consommation d'énergie des véhicules et des structures, contribuant ainsi à des économies à long terme.

- **Impact environnemental réduit** : Les composites modernes peuvent être produits à partir de matériaux recyclés ou renouvelables, contribuant ainsi à la protection de l'environnement. De plus, leur durabilité réduit la nécessité de remplacer fréquemment les pièces, limitant la production de déchets.

1.4. Différences avec les matériaux classiques

Les composites se distinguent des matériaux traditionnels comme les métaux, les plastiques ou les céramiques par plusieurs aspects **[4]**:

- **Structure anisotrope** : Contrairement aux métaux isotropes, les propriétés des composites dépendent de la direction des fibres, permettant un renforcement ciblé selon les contraintes prévues. Cette anisotropie permet de concevoir des structures légères et résistantes dans les directions critiques.
- **Poids** : Les composites sont jusqu'à 60 % plus légers que l'acier, tout en conservant une résistance mécanique similaire. Cette légèreté est un atout majeur pour les industries aéronautique, automobile, et ferroviaire, où chaque kilogramme économisé se traduit par des gains d'efficacité énergétique.
- **Résistance à la corrosion** : Contrairement aux métaux, les composites ne rouillent pas et résistent mieux aux environnements agressifs, tels que l'eau salée ou les produits chimiques industriels. Cette propriété prolonge la durée de vie des structures sans nécessiter de traitements anticorrosion coûteux.
- **Performance sous charge** : Les composites présentent une meilleure résistance à la fatigue que les plastiques conventionnels. Ils conservent leurs propriétés mécaniques même après de nombreux cycles de charge, ce qui les rend idéaux pour les structures soumises à des vibrations ou à des charges répétées **[5].**
- **Isolation** : Les composites offrent une meilleure isolation thermique et électrique que les matériaux traditionnels, ce qui les rend idéaux pour les applications nécessitant une protection contre la chaleur ou l'électricité. Ils sont couramment utilisés pour les équipements électriques, les conduites thermiques et les revêtements ignifuges.
- **Coût** : Bien que les matériaux composites soient initialement plus coûteux, leur longévité, leur légèreté et leur faible besoin de maintenance réduisent les coûts globaux sur la durée de vie du produit. Par exemple, un pont en composite, bien que plus cher à la construction, coûtera moins cher en entretien qu'un pont en acier ou en béton.

- **Écologie** : Les fibres naturelles et les matrices biodégradables permettent de concevoir des composites plus respectueux de l'environnement. De plus, certaines résines thermoplastiques sont recyclables, favorisant la réduction des déchets industriels.
- **Complexité de fabrication** : La production des composites nécessite des procédés spécifiques, tels que la stratification, le moulage sous vide, ou l'enroulement filamentaire. Bien que ces techniques augmentent les coûts initiaux, elles permettent de produire des pièces sur mesure avec des performances optimisées **[6].**
- **Réparation et recyclage** : Les composites thermodurcissables sont plus difficiles à réparer et à recycler que les composites thermoplastiques. Cependant, des progrès sont réalisés pour améliorer la recyclabilité des composites, notamment par la réutilisation des fibres et la valorisation énergétique des résidus.
- **Durée de vie prolongée** : Grâce à leur résistance à la corrosion, à la fatigue et à l'usure, les composites ont une durée de vie supérieure celle des matériaux traditionnels, réduisant ainsi les coûts liés au remplacement des pièces.

1.5. Limitations des matériaux traditionnels dans la maintenance industrielle

Dans l'industrie, l'utilisation des matériaux traditionnels tels que l'acier, l'aluminium ou le bois pose plusieurs problèmes en termes de maintenance et de durabilité. Ces matériaux ont certes été la norme pendant des décennies, mais leurs limites deviennent de plus en plus évidentes face aux exigences modernes.

- **Problèmes de corrosion :** L'un des plus grands défis avec les matériaux métalliques est leur sensibilité à la corrosion. L'acier, par exemple, rouille lorsqu'il est exposé à l'humidité et aux agents chimiques, ce qui fragilise les structures et nécessite des traitements coûteux, comme des revêtements anticorrosion ou des traitements de surface.
- **Poids élevé et contraintes logistiques :** Les matériaux comme l'acier et le béton sont très lourds, ce qui complique leur transport, leur installation et leur manipulation. Dans des secteurs comme l'aéronautique ou l'automobile, où la réduction du poids est essentielle pour optimiser la performance et la consommation énergétique, ces matériaux ne sont plus toujours adaptés.
- **Rigidité excessive ou manque de souplesse :** Certains matériaux traditionnels,

comme le verre ou certains métaux, sont très rigides mais cassants. Cela signifie qu'ils ne supportent pas bien les chocs et les vibrations, ce qui peut entraîner des fissures et des ruptures soudaines. À l'inverse, d'autres matériaux peuvent être trop souples et se déformer sous des charges importantes, ce qui limite leur efficacité structurelle.

- **Usure et fatigue mécanique :** Dans un environnement industriel, les équipements sont soumis à des charges répétées, des vibrations et des variations de température. Les matériaux traditionnels peuvent se fatiguer avec le temps, développant des microfissures qui finissent par compromettre leur intégrité. Un pont en acier ou une pièce mécanique en aluminium, par exemple, peut voir sa durée de vie réduite à cause de ce phénomène **[7].**
- **Cout élevé de maintenance :**Tous ces inconvénients entraînent des coûts supplémentaires. Il faut régulièrement repeindre, réparer, ou remplacer des pièces usées. Cela représente non seulement un coût financier, mais aussi une perte de temps et des interruptions dans la production.

1.6. Propriétés physiques des matériaux

1.6.1. Résistance mécanique des matériaux composites

Les matériaux composites se démarquent principalement par leur excellente résistance mécanique, ce qui les rend très attractifs pour de nombreuses applications industrielles.

- **Résistance à la traction :** La traction est la capacité d'un matériau à résister à une force qui l'étire. Les fibres de carbone et de verre utilisées dans les composites ont une résistance à la traction bien supérieure à celle de l'acier, tout en étant beaucoup plus légères. Cela signifie qu'elles peuvent supporter des charges importantes sans risque de rupture.
- **Résistance à la compression :**Contrairement à certains métaux qui peuvent se plier ou se déformer sous pression, les composites offrent une grande résistance à la compression, surtout lorsqu'ils sont associés à une matrice polymère ou céramique qui renforce leur structure interne.
- **Résistance à la flexion :**Lorsqu'un matériau est soumis à des forces qui le courbent (comme une poutre sous charge), il doit être capable de supporter ces contraintes sans casser. Les composites, grâce à leur structure fibreuse, peuvent absorber ces forces tout en restant solides, ce qui les rend idéaux pour les ponts, les ailes d'avion et les équipements soumis à des chocs répétés.

1.6.2. Élasticité et rigidité

La combinaison d'élasticité et de rigidité est essentielle pour garantir la solidité et la durabilité des matériaux composites.

- **Élasticité contrôlée :** Contrairement aux matériaux trop rigides qui cassent sous l'impact, certains composites sont capables de se déformer légèrement et de retrouver leur forme initiale. Cela est particulièrement utile dans les structures soumises à des vibrations ou à des variations de température.
- **Rigidité adaptée aux besoins :** Un matériau trop souple risque de se plier et de perdre sa forme, tandis qu'un matériau trop rigide peut être fragile. Les composites permettent de trouver un équilibre entre ces deux extrêmes en ajustant la nature et l'orientation des fibres de renfort.

1.6.3. Durabilité dans les environnements industriels

Les matériaux composites sont conçus pour résister aux conditions les plus extrêmes, ce qui leur confère une longévité supérieure aux matériaux classiques.

- **Résistance aux agents chimiques :** Les composites ne réagissent pas avec de nombreux produits chimiques agressifs, ce qui les rend idéaux pour des applications dans des environnements corrosifs comme les usines chimiques ou les plateformes pétrolières.
- **Résistance à la chaleur :** Certains composites peuvent supporter des températures très élevées sans se dégrader, contrairement aux polymères classiques qui fondent ou aux métaux qui se dilatent et perdent leurs propriétés mécaniques.
- **Résistance à l'usure :** Grâce à leur structure renforcée, les composites s'usent moins rapidement que les métaux ou les plastiques standards. Ils résistent mieux aux frottements, aux chocs et aux variations de température, ce qui leur confère une durée de vie plus longue grâce à toutes ces propriétés, les matériaux composites présentent de nombreux avantages pour la maintenance industrielle **[7] :**

  ✓ **Moins de réparations et d'entretien**

Leur résistance à la corrosion et à l'usure réduit la nécessité d'interventions fréquentes, ce qui permet d'économiser du temps et de l'argent.

✓ **Augmentation de la durée de vie des équipements**

Les structures en composites durent plus longtemps que celles en acier ou en aluminium, ce qui évite les remplacements prématurés et améliore la rentabilité des

installations.

- ✓ **Réduction du poids et des coûts de transport**

Un pont ou une structure en composite est bien plus léger qu'un équivalent en métal ou en béton, ce qui facilite le transport, l'installation et réduit la consommation d'énergie dans les applications mobiles (avions, voitures, trains).

- ✓ **Adaptabilité aux besoins industriels**

Il est possible de concevoir des composites sur mesure avec des propriétés spécifiques (rigidité, flexibilité, résistance thermique) en fonction des exigences de chaque secteur. Cela les rend particulièrement précieux pour l'aéronautique, l'automobile, la construction et l'industrie chimique.

Conclusion

les matériaux composites représentent une solution d'avenir pour faire face aux exigences modernes en matière de maintenance industrielle. Leur légèreté, leur résistance mécanique et leur durabilité en font des matériaux performants, adaptés aux environnements sévères.

Malgré un coût initial plus élevé, leur longue durée de vie et la réduction des besoins en entretien justifient leur adoption croissante. Ce chapitre met en lumière non seulement leurs propriétés techniques, mais aussi leur potentiel stratégique dans l'optimisation , des coûts et des performances industrielles. Il ouvre la voie à une étude approfondie de leur comportement réel et de leur intégration dans des systèmes complexes **[8].**

Chapitre II : Applications des Matériaux Composites dans la maintenance

Introduction

Le développement rapide des industries modernes a engendré de nouveaux défis en matière de maintenance des équipements et infrastructures. Afin d'assurer la durabilité, l'efficacité et la fiabilité des installations industrielles, l'intégration de matériaux avancés s'est imposée comme une nécessité. Parmi ces matériaux, les composites jouent un rôle de plus en plus stratégique.

Dans ce chapitre, nous allons explorer les différentes applications des matériaux composites dans le domaine de la maintenance industrielle. Nous présenterons tout d'abord les concepts fondamentaux de la maintenance préventive et corrective, avant d'analyser l'impact des composites sur l'amélioration des performances de ces pratiques. Ensuite, nous étudierons l'intégration des composites dans les systèmes de maintenance automatisée, en mettant en lumière leurs avantages techniques et économiques. Enfin, nous évoquerons les limites actuelles et les perspectives d'évolution dans ce domaine.

2.1. Maintenance industrielle et rôle des matériaux composites

La maintenance industrielle regroupe différents types d'interventions destinées à assurer le bon fonctionnement des équipements. Selon les objectifs visés et le moment de l'intervention, on distingue principalement deux approches complémentaires :
La maintenance préventive, qui anticipe les pannes, et la maintenance corrective, qui intervient après leur apparition.

Ces deux stratégies jouent un rôle essentiel dans la gestion des installations industrielles et peuvent être optimisées par l'utilisation de matériaux composites, reconnus pour leur résistance et leur légèreté.

2.1.1. La maintenance préventive

2.1.1.1. Définition

La maintenance préventive consiste à planifier et à réaliser des interventions régulières dans le but de prévenir l'apparition de défaillances sur les équipements industriels **[9].** En assurant une surveillance systématique de l'état des machines, elle permet d'identifier et de corriger les anomalies avant qu'elles n'entraînent des arrêts de production **[10].** Cette stratégie vise ainsi à améliorer la fiabilité, à accroître la disponibilité et à prolonger la durée

2.1.1.2. Types d'interventions en maintenance préventive

Dans le cadre de la maintenance préventive, plusieurs types d'interventions planifiées sont mises en œuvre pour garantir le fonctionnement optimal des équipements et prévenir les défaillances potentielles. Ces interventions régulières visent à prolonger la durée de vie des installations et à maintenir leur performance à un niveau élevé **[11].**

- **Inspections régulières:** Les inspections impliquent un examen visuel ou assisté par instrumentation pour détecter toute anomalie, signe d'usure ou défaut potentiel. Cette étape permet d'anticiper les dégradations susceptibles d'engendrer des pannes majeures **[12].**
- **Lubrifications:** La lubrification périodique des pièces mécaniques critiques (roulements, engrenages, chaînes) est essentielle pour réduire le frottement, limiter l'usure, prévenir la surchauffe et optimiser l'efficacité énergétique des équipements **[13].**
- **Remplacements préventifs:** Certains composants consommables (filtres, joints, courroies, batteries) sont remplacés systématiquement après une certaine durée d'utilisation, même sans signe apparent de défaillance, afin d'éviter toute panne inopinée **[14].**
- **Mises à jour et calibrages:** Pour les systèmes automatisés et numériques, des mises à jour logicielles ainsi que des calibrations régulières sont nécessaires pour maintenir la précision et la fiabilité du fonctionnement **[15].**

2.1.1.3. Objectifs de la maintenance préventive

Les objectifs principaux de la maintenance préventive sont :

- **Prévenir les pannes:** Grâce aux interventions anticipées, la maintenance préventive réduit significativement les risques d'arrêts de production imprévus, minimisant ainsi les coûts financiers et organisationnels associés **[16].**
- **Allonger la durée de vie des équipements :** Un entretien systématique limite l'usure prématurée des machines et de leurs composants, prolongeant ainsi leur durée de vie utile et optimisant le retour sur Avantages de la maintenance préventive.

2.1.1.4. Avantage de la maintenance préventive

La maintenance préventive présente plusieurs avantages, on peut citer :

- **Diminution du risque de pannes :** En intervenant avant l'apparition des

défaillances, la maintenance préventive réduit considérablement les arrêts imprévus de production.

- **Allongement de la durée de vie des équipements :** Un entretien régulier permet de conserver les équipements en bon état de fonctionnement sur une période prolongée.
- **Amélioration de la sécurité :** Le contrôle systématique des installations limite les risques d'accidents liés à des défaillances techniques.
- **Maîtrise des coûts :** Grâce à la planification des opérations, les dépenses liées à la maintenance deviennent plus prévisibles et mieux réparties dans le temps. investissement **[17].**

2.1.1.5. Limites de la maintenance préventive

Malgré de nombreux avantage , cette approche présente certain limites à savoir :

- **Coût initial élevé :** La mise en œuvre d'un programme de maintenance préventive nécessite des ressources financières et humaines importantes.
- **Interventions parfois superflues :** Des actions d'entretien peuvent être réalisées sur des équipements encore fonctionnels, générant des coûts additionnels sans gain immédiat

2.1.1.6. Applications spécifiques en maintenance préventive

- **Renforcement des structures :** Les matériaux composites sont utilisés pour renforcer les structures vieillissantes ou fragilisées. Grâce à leur légèreté et leur résistance, ils permettent de restaurer la solidité des composants sans ajouter un poids excessif, contribuant ainsi à prolonger la durée de vie des équipements **[18].**

- **Remplacement des pièces sensibles à l'usure :** Les matériaux composites sont souvent utilisés pour remplacer les pièces qui s'usent rapidement, comme les joints ou les composants exposés à des environnements agressifs. Ces matériaux offrent une excellente résistance à l'usure, ce qui permet de réduire la fréquence des réparations et des remplacements tout en assurant un fonctionnement optimal des équipements **[19].**

2.1.2. La maintenance corrective

2.1.2.1. Définition

La maintenance corrective est la catégorie de tâches de maintenance qui sont effectuées pour rectifier et réparer les systèmes et les équipements défectueux. L'objectif de la

maintenance corrective est de rétablir les systèmes qui sont tombés en panne. La maintenance corrective peut être synonyme de panne ou de maintenance réactive.

Cette définition peut être mieux comprise à travers une description des interventions typiques de la maintenance corrective.

2.1.2.2. Types d'interventions en maintenance corrective

La maintenance préventive regroupe un ensemble d'actions planifiées visant à réduire les risques de défaillance des équipements. Elle se décline en plusieurs types d'interventions selon la nature des machines, leur criticité et les objectifs de performance. Parmi ces interventions, on distingue :

- **La réparation :** Remplacement ou remise en état des pièces défectueuses pour rétablir le fonctionnement normal des équipements.
- **Le réglage :** Ajustement des paramètres de fonctionnement afin de corriger les écarts par rapport aux conditions normales.
- **La remise en service:** Vérification de la conformité et redémarrage sécurisé des installations après réparation La nature des interventions dépend du type de défaillance, de son impact sur le processus de production, et des ressources disponibles .

2.1.2.3. Avantages de la maintenance corrective

La maintenance corrective, qui consiste à intervenir après la survenue d'une panne, est souvent perçue comme une solution d'urgence. Pourtant, dans certains contextes, elle présente plusieurs avantages. Elle permet notamment :

- **Optimisation des coûts à court terme :**Les interventions ne sont réalisées qu'en cas de nécessité, ce qui peut réduire les dépenses immédiates.
- **Simplicité organisationnelle :** L'absence de planification complexe rend la gestion de la maintenance corrective plus souple, notamment dans certains contextes industriels

2.1.2.4. Limites de la maintenance corrective

Bien que cette méthode puisse sembler économique a court terme , cette approche présentes plusieurs limites :

- **Coûts élevés :** Les interventions en urgence sont souvent plus coûteuses (heures supplémentaires, pièces en urgence, transport rapide). Les défaillances graves peuvent entraîner des réparations majeures ou même le remplacement

complet de l'équipement.

- **Temps d'arrêt imprévisible :**Les pannes non planifiées entraînent des arrêts de production non anticipés, causant des pertes économiques importantes

2.1.2.5. Applications spécifiques en maintenance corrective

Dans le cadre de la maintenance corrective, les matériaux composites offrent des solutions innovantes pour la réparation et le renforcement des structures endommagées, lorsque des solutions classiques seraient plus lourdes ou plus longues à mettre en place. Ils sont notamment utilisés pour :

- **Réparation rapide des fissures et des pièces endommagées** : Les matériaux composites sont fréquemment utilisés pour réparer rapidement les fissures et les éléments endommagés. Cette méthode permet de restaurer rapidement la fonctionnalité des composants sans avoir recours à des procédures complexes, ce qui est crucial pour limiter les arrêts de production **[20].**
- **Utilisation des composites pour la remise en service, temporaire ou définitive :** En cas de défaillance d'équipements, les matériaux composites peuvent être appliqués pour permettre une remise en service temporaire, voire permanente, des installations. Cela offre une solution robuste et durable qui garantit une reprise fonctionnelle des équipements tout en laissant la possibilité de procéder à des réparations plus.

2.2. Intégration des matériaux composites dans les systèmes de maintenance automatisée

L'intégration des matériaux composites dans les systèmes de maintenance automatisée représente une avancée majeure dans les industries de pointe. Dans le cadre de la maintenance automatisée, leur utilisation est facilitée par des technologies comme la robotique, l'intelligence artificielle et l'Internet des objets, qui optimisent la surveillance, l'inspection et la réparation des composants composites. Cependant, des défis subsistent, notamment les coûts initiaux élevés, la complexité des procédés de fabrication et la nécessité de technologies avancées pour détecter les défauts spécifiques aux composites, rendant leur intégration dépendante d'une planification rigoureuse et de ressources adaptées.

2.2.1. Définition d'un système automatise de maintenance (AMS)

Un Système Automatisé de Maintenance (AMS) désigne un ensemble intégré de technologies, de logiciels et de processus visant à automatiser et à optimiser les opérations

de maintenance des équipements et infrastructures, tout en minimisant l'intervention humaine

2.2.1.1. Les composantes principales d'un AMS

- **Collecte automatisée des données:** recours à des capteurs, des dispositifs IoT (Internet des Objets) et d'autres technologies pour enregistrer en temps réel des informations sur l'état et les performances des équipements.
- **Surveillance continue et diagnostic:** analyse automatique des données recueillies pour détecter toute anomalie, tendance inhabituelle ou signe précurseur de défaillance.
- **Planification et ordonnancement intelligents** : utilisation d'outils de gestion de maintenance (GMAO/CMMS) pour programmer et planifier automatiquement les interventions préventives selon les données collectées ou des plannings établis.
- **Génération automatique des ordres de travail** : création d'ordres de travail en réponse aux alertes, aux dépassements de seuils critiques ou aux échéances planifiées.
- **Exécution automatique de certaines opérations** : dans les systèmes les plus évolués, certaines tâches simples, comme la lubrification, peuvent être réalisées par des robots ou des dispositifs embarqués.
- **Analyse et reporting** : production automatique de rapports sur l'état des équipements, l'historique des interventions, la performance des actifs et les principaux indicateurs de performance (KPI), afin d'améliorer la prise de décision **[21].**

2.2.1.2. Les objectifs d'un AMS

L'Approche de Maintenance Systématique (AMS) vise à améliorer la fiabilité et la performance des équipements en planifiant des interventions régulières, indépendamment de l'état réel des machines. Ses principaux objectifs sont :

- Limiter l'intervention humaine dans les tâches répétitives de maintenance ;
- Accroître l'efficacité et la productivité des services de maintenance ;
- Optimiser la planification des interventions en se basant sur l'état réel des équipements ;
- Anticiper les pannes grâce à la maintenance prédictive ;
- Réduire les arrêts non planifiés et améliorer la disponibilité des équipements ;

- Réaliser des économies en minimisant les réparations majeures et en optimisant les ressources ;
- Renforcer la sécurité en réduisant l'exposition des opérateurs à des environnements dangereux ;
- Centraliser et faciliter la gestion des données liées à la maintenance.

2.2.2. Présentation des Technologies : Robots, Drones et Capteurs

Les robots, les drones et les capteurs représentent des technologies innovantes au cœur de la transition vers l'industrie intelligente. Ces dispositifs sont conçus pour automatiser certaines tâches, surveiller les environnements, collecter des données en temps réel et améliorer la prise de décision. Le robot, en tant que système électromécanique programmable, peut exécuter des opérations complexes avec précision, tandis que le drone, appareil aérien sans pilote, permet l'inspection et la surveillance de zones difficilement accessibles. Les capteurs, quant à eux, mesurent différentes grandeurs physiques ou chimiques et transmettent les informations nécessaires aux systèmes de contrôle ou de supervision.

Dans un contexte industriel comme celui d'une usine de fabrication de câbles électriques, l'intégration de ces technologies contribue significativement à l'optimisation des activités de maintenance et à la sécurisation des installations techniques. Les capteurs permettent d'anticiper les défaillances à travers la détection précoce d'anomalies, facilitant ainsi la maintenance préventive. Les drones sont utilisés pour inspecter des structures à risque sans exposer le personnel, et les robots interviennent dans des zones dangereuses pour effectuer des tâches de surveillance ou de réparation.

L'utilisation combinée de ces technologies favorise non seulement la réduction des interruptions de production, mais aussi une meilleure gestion des risques industriels, ce qui constitue un enjeu majeur dans le cadre de la modernisation des systèmes de production.



Figure 2.1: Robot Industriel ABB



Figure 2.2: Drone Agricole DJI AGRAS T25

2.2.2.1. Robots

Les robots sont des machines électromécaniques capables d'exécuter automatiquement des tâches spécifiques. Alliant mécanique, électronique et informatique, ils peuventfonctionner de manière autonome ou être assistés par l'homme. Grâce à leurs capteurs embarqués, les robots interagissent avec leur environnement, s'adaptent aux imprévus et assurent des opérations de haute précision **[22].**

- **Applications principales** :

  ✓ **Industrie** : Automatisation du soudage, de l'assemblage, du conditionnement et de la peinture.



Figure 2.3:*Robot industriel en action sur une ligne de production. Source : Unsplash –Photoby Remy Gieling*

✓ **Logistique** : Tri et transport automatisés via des véhicules autonome



Figure 2.4: Robot logistique autonome utilisé pour le tri et le transport dans un entrepôt moderne

- ✓ **Médical** : chirurgie assistée par robot pour accroître la précision et réduire les risques

2.2.2.2. Drones

Les drones, ou véhicules aériens sans pilote (UAV), sont des dispositifs volants télécommandés ou autonomes. Dotés de capteurs sophistiqués et de systèmes de navigation intelligents, ils permettent de réaliser des opérations de surveillance, d'inspection et de collecte de données dans des zones difficilement accessibles **[23].**



Figure 2.5: Système chirurgical robotisé Da vinci utilisé en salle d'opération pour des interventions de haute précision

- **Applications principales** :

  - ✓ **Inspection d'infrastructures** : surveillance des lignes électriques, ponts, éoliennes et pipelines

Figure 2.6: Inspection d'un bâtiment à l'aide d'un drone pour évaluer l'intégrité structurelle et prévenir les risques.

  - ✓ **Agriculture de précision** : cartographie des cultures, détection des maladies, pulvérisation ciblée.



Figure 2.7: Utilisation de drones pour la pulvérisation ciblée et la surveillance des cultures dans le cadre de l'agriculture de précision

- ✓ **Intervention d'urgence** : recherche de victimes et évaluation des dégâts après catastrophes.



Figure 2.8: Utilisation d'un drone pour localiser des victimes et évaluer les dégâts après une catastrophe naturelle

2.2.2.3. Capteurs

Les capteurs sont des dispositifs destinés à détecter et mesurer des paramètres physiques ou chimiques, et à transmettre ces informations sous forme de signaux exploitables par des systèmes automatisés . Ils jouent un rôle clé dans la surveillance, la maintenance et l'optimisation des procédés industriels **[24].**

- **Automatisation industrielle** : contrôle en temps réel de la température, de la



pression, du débit, etc.

Figure 2.9: Système de contrôle en temps réel supervisant la température, la pression et le débit dans un processus industriel automatise.

- **Maintenance prédictive** : anticipation des défaillances mécaniques par l'analyse des vibrations ou températures anormales



Figure 2.10:Surveillance en temps réel des vibrations et de la température à l'aide d'un capteur connecté pour anticiper les défaillances mécaniques

- **Sécurité des sites** : détection des gaz dangereux, incendies, ou fuites.



Figure 2.11: Utilisation d'un détecteur de gaz portable pour surveiller en temps réel les fuites de gaz dangereux dans un environnement industrie

2.2.3. Exemple d'application

L'utilisation des matériaux composites dans les drones constitue un exemple concret et particulièrement révélateur de leur contribution à l'amélioration des systèmes automatisés.

En effet, comme le soulignent Callister (2013) et Mallick (2007), la fabrication de drones à partir de matériaux composites, tels que les fibres de carbone, permet de réduire considérablement leur poids tout en augmentant leur robustesse mécanique. Cette combinaison essentielle leur confère une autonomie de vol prolongée, ce qui les rend indispensables pour des applications industrielles telles que l'inspection de pipelines ou d'éoliennes.

Dans ce contexte, les drones sont capables de survoler des infrastructures complexes sur de longues distances avec une consommation énergétique minimale, tout en transportant des charges utiles comme des capteurs d'imagerie thermique, des caméras HD ou des systèmes de détection ultrasonique (Daniel & Ishai, 2006).

L'intégration des drones composites dans les processus industriels est d'autant plus optimisée grâce à leur interaction étroite avec les systèmes intelligents. En effet, ils sont équipés de capteurs avancés et pilotés par des algorithmes d'intelligence artificielle (IA), permettant une analyse en temps réel des données collectées (Mallick, 2007).

Cette synergie entre matériaux composites, capteurs intelligents et IA assure une surveillance prédictive des infrastructures, permettant ainsi de détecter précocement les anomalies et d'intervenir de manière ciblée, ce qui renforce la fiabilité des opérations tout en réduisant les coûts de maintenance.

Ainsi, l'utilisation de drones en matériaux composites illustre parfaitement comment

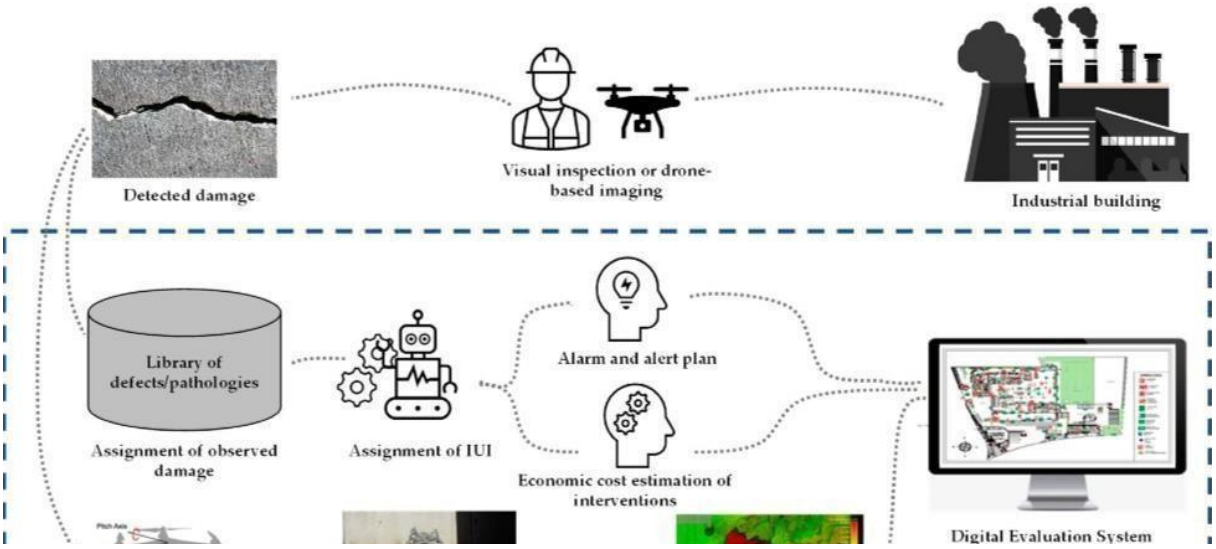


Figure 2.12: Schéma d'intégration des drones en matériaux composites dans les systèmes d'inspection intelligente

l'innovation matérielle, combinée aux technologies intelligentes, transforme les méthodes de maintenance industrielle, en rendant les inspections plus rapides, plus sûres et économiquement plus avantageuses.

Description du schéma

Ce schéma représente le processus d'inspection industrielle assistée par drone, mettant en évidence les éléments suivants :

- **Drone en matériaux composites** : Léger et robuste, il est équipé de capteurs avancés pour collecter des données précises.
- **Systèmes de capteurs :** Caméras haute résolution, capteurs thermiques et autres dispositifs pour une collecte de données exhaustive**.**
- **Intelligence Artificielle (IA) :** Analyse en temps réel des données collectées pour détecter les anomalies et optimiser les opérations.
- **Système d'évaluation numérique :** Intégration des résultats dans un système centralisé pour une prise de décision éclairée.

2.3. Limites et défis liés à l'utilisation des matériaux composites en maintenance.

2.3.1. Contraintes de coût

L'un des obstacles majeurs à l'adoption des matériaux composites en maintenance industrielle réside dans leur coût élevé. Ces matériaux requièrent l'utilisation de fibres spécifiques, telles que le carbone ou le verre, combinées à des matrices polymères avancées, ce qui augmente considérablement leur prix par rapport aux matériaux convventionnels comme l'acier ou l'aluminium

En outre, la fabrication de pièces en composites implique des procédés complexes – tels que le moulage sous vide ou le traitement en autoclave – nécessitant des installations spécialisées et du personnel hautement qualifié. Ces exigences technologiques entraînent des coûts additionnels, aussi bien en termes de production que de maintenance.

Par ailleurs, les activités d'inspection, de contrôle de qualité et de formation continue du personnel pour la manipulation correcte de ces matériaux représentent des dépenses supplémentaires non négligeables. Ainsi, le facteur économique constitue un frein important, notamment pour les industries sensibles aux coûts, obligeant à évaluer minutieusement la

rentabilité avant toute mise en œuvre.

2.3.2. Contraintes techniques (dégradation thermique, vieillissement)

Bien que les matériaux composites offrent d'excellentes performances mécaniques, leur utilisation en maintenance industrielle est limitée par plusieurs contraintes techniques. Parmi celles-ci, la dégradation thermique constitue un problème majeur : une exposition prolongée à des températures élevées peut altérer la résistance, la rigidité et la stabilité des composites, réduisant ainsi leur durée de vie opérationnelle.

En outre, les composites ne sont pas exempts du phénomène de vieillissement. Les agressions environnementales telles que l'humidité, les rayons ultraviolets et les variations thermiques peuvent progressivement détériorer leur structure interne. Ce processus de dégradation se manifeste souvent par l'apparition de microfissures, une perte d'adhésion entre fibres et matrice, et une diminution globale des performances mécaniques.

Face à ces défis, il est indispensable d'adapter le choix des matériaux composites aux conditions spécifiques d'utilisation, afin de garantir leur efficacité et leur longévité.

2.3.3. Problèmes d'assemblage et de réparation des composites

L'utilisation des matériaux composites en maintenance est également limitée par des difficultés spécifiques liées à leur assemblage et à leur réparation. Contrairement aux matériaux métalliques, les composites ne permettent pas l'application directe de techniques conventionnelles telles que le soudage ou le vissage classique, en raison de leur structure complexe et de leur comportement anisotrope L'assemblage nécessite souvent des procédés adaptés, comme le collage avec des adhésifs spécialisés, ce qui demande un contrôle précis des conditions d'application pour garantir la fiabilité de la jonction.

Quant à la réparation, elle est d'autant plus délicate : une intervention incorrecte peut introduire des défauts locaux, modifier la répartition des contraintes et compromettre la performance globale du composant réparé. De plus, certaines opérations de réparation requièrent des compétences techniques avancées et des équipements coûteux.

Ces contraintes rendent indispensable la formation du personnel ainsi que le développement de techniques spécifiques pour assurer une maintenance efficace des structures composites.

2.4. Perspectives d'avenir

Parmi les orientations prometteuses pour les années à venir, l'accent est mis sur l'innovation continue dans le domaine des matériaux composites. L'une des voies les plus

explorées concerne le développement de composites dits « intelligents », capables de s'adapter à leur environnement ou de signaler leur état en temps réel.

2.4.1. Développement de nouveaux composites plus intelligents

Pour répondre aux besoins évolutifs de la maintenance industrielle, les chercheurs s'orientent vers la conception de matériaux composites dits « intelligents ». Ces matériaux intègrent des fonctionnalités avancées telles que l'auto-détection de dommages, l'auto-réparation, ou encore l'adaptation aux conditions ambiantes.

Certains composites modernes sont équipés de capteurs microscopiques intégrés, capables d'identifier des anomalies structurelles — comme des microfissures ou des déformations — bien avant qu'elles n'atteignent un niveau critique. D'autres types de composites sont développés pour posséder des propriétés auto-cicatrisantes, leur permettant de restaurer partiellement ou totalement leurs performances après une détérioration.

Ces avancées promettent d'améliorer considérablement les stratégies de maintenance en rendant les interventions plus précises, en limitant les interruptions de production, et en optimisant la durée de vie des installations industrielles.

2.4.2. Rôle de l'intelligence artificielle dans la maintenance prédictive des composites

L'émergence de l'intelligence artificielle transforme profondément les pratiques de maintenance prédictive appliquées aux matériaux composites. En exploitant les données collectées par des capteurs intégrés et en analysant les historiques d'utilisation, l'IA permet de prédire avec précision l'apparition de défauts ou de signes de vieillissement

À travers des techniques d'apprentissage automatique, l'IA est capable de détecter des variations anormales dans le comportement des matériaux bien avant qu'une défaillance n'affecte leur performance. Cette approche proactive optimise la planification des interventions, minimise les arrêts imprévus et réduit les coûts de maintenance corrective

De plus, l'intelligence artificielle contribue au perfectionnement des composites euxmêmes, en fournissant des analyses prédictives permettant d'ajuster leur composition et leurs processus de fabrication pour une meilleure résistance à long terme.

2.4.3. Exemples de recherches récentes et innovations futures

Les progrès récents dans le domaine des matériaux composites ouvrent la voie à des solutions de maintenance de plus en plus performantes et innovantes. Parmi les avancées notables, on trouve le développement de composites capables d'autoréparation, intégrant des capsules microscopiques libérant des agents réparateurs en cas de dommage

structurel D'autres recherches se concentrent sur l'intégration de capteurs intelligents, notamment à base de fibres optiques, directement au sein des matériaux composites. Ces capteurs permettent une surveillance en continu de l'état de la structure, rendant possible une détection précoce des anomalies et facilitant ainsi la maintenance prédictive.

En outre, des projets novateurs s'inspirent des structures biologiques pour créer des composites bio-mimétiques, combinant légèreté, résistance et adaptabilité. Ces innovations laissent entrevoir un futur où la maintenance industrielle sera non seulement plus efficace, mais également plus durable et optimisée.

Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence le rôle central que jouent aujourd'hui les matériaux composites dans l'optimisation des pratiques de maintenance industrielle. Après avoir introduit les notions de maintenance préventive et corrective, nous avons analysé les apports spécifiques des composites en termes de fiabilité, de durabilité et de réduction des coûts d'exploitation.

L'essor des composites dans l'industrie moderne souligne leur importance stratégique face aux exigences croissantes de performance et de compétitivité. Leur intégration requiert toutefois une adaptation permanente des méthodes de maintenance, afin de tirer pleinement parti des innovations technologiques émergentes.

Ainsi, l'avenir de la maintenance industrielle repose sur une approche proactive et évolutive, combinant matériaux avancés et outils intelligents, pour garantir la pérennité et l'efficacité des infrastructures industrielles.

Chapitre III: Modélisation et Simulations du Comportements des Composites

3.1. Modélisation du comportement des composites.

La mise au point d'un nouveau composite ou d'une structure composite par la seule expérimentation physique représente un coût considérable, tant en termes de ressources financières que de temps. De plus, certains scénarios de chargement sont difficiles, voire impossibles, à reproduire en laboratoire (chocs extrêmes, vieillissement accéléré, conditions multi-physiques combinées).

La simulation numérique permet de contourner ces limitations. Elle donne la possibilité de :

- Prédire le comportement mécanique des pièces composites avant leur fabrication,
- Identifier les zones critiques exposées à des contraintes importantes,
- Représente des scénarios variés (traction, compression, fatigue, impact...),
- Optimiser la géométrie, les empilements de couches, l'orientation des fibres,
- Réduire les itérations de prototypage.

Ainsi, la modélisation devient un outil stratégique pour la prise de décision et l'amélioration continue dans le développement des structures composites.

3.1.1. Les méthodes de modélisation

La complexité des matériaux composites rend indispensable l'usage de méthodes numériques pour modéliser leur comportement. Ces approches permettent de représenter et d'analyser les phénomènes mécaniques internes que l'expérimentation seule ne peut pas toujours observer. Parmi elles, la méthode des éléments finis (MEF) est la plus répandue.

3.1.1.1. La méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis (MEF) est la technique la plus utilisée pour la modélisation des matériaux composites. Elle repose sur la division de la structure étudiée en petits éléments finis, appelés "mailles". À chacun de ces éléments, on applique les équations de la mécanique des milieux continus (MMC) afin de résoudre les champs de déplacement, de contrainte et de déformation.

- ✓ **La MEF permet de modélise :**

- Le comportement linéaire et non linéaire des matériaux
- La propagation des fissures,
- L'initiation et la progression de la rupture,

- Les phénomènes couplés (thermo-mécanique, hygro-mécanique...),
- Le comportement dynamique sous chocs ou vibrations.

Grâce à cette méthode, l'ingénieur peut visualiser les zones à risque, affiner son design, et optimiser le matériau ou la structure en amont de la fabrication.

3.1.1.2. Méthode des éléments de frontière (BEM - Boundary Element Method)

La méthode des éléments de frontière est une technique numérique qui, contrairement à la MEF, nécessite uniquement la discrétisation de la frontière du domaine étudié, réduisant ainsi la dimension du problème (par exemple, d'un volume **3D** à une surface **2D**).
Elle est particulièrement avantageuse pour les milieux infinis ou semi-infinis, les structures minces, et les problèmes de fissuration ou de contact.

3.1.1.3. Méthode des volumes finis (FVM - Finite Volume Method)

La méthode des volumes finis est largement utilisée dans les domaines de la mécanique des fluides et des transferts thermiques.elle consiste à diviser le domaine en volumes de contrôle dans lesquels les lois de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie) sont appliquées sousforme intégrale pour les composites, elle est particulièrement adaptée dans les cas de couplage fluide-structure, par exemple dans les composites à matrice fluide, les structures poreuses perméables ou les environnements soumis à convection.

3.1.1.4. Méthode des différences finies (FDM - Finite Difference Method)

La méthode des différences finies repose sur l'approximation des dérivées partielles à l'aide de différences entre les valeurs des fonctions sur une grille régulière**[25].** C'est l'une des méthodes numériques les plus anciennes et les plus simples à mettre en œuvre. dans le contexte des composites, elle est moins utilisée pour les géométries complexes, car elle est mieux adaptée aux domaines réguliers (rectangles, Cubes). Cependant, elle reste utile pour l'analyse thermique, la modélisation de phénomènes transitoires ou l'étude de structures composites à géométrie simplifiée. grâce à sa clarté conceptuelle, elle est souvent utilisée à des fins pédagogiques ou dans les phases de prototypage de modèles physiques

3.1.1.5. Méthode des éléments spectraux (SEM - Spectral Element Method)

La méthode des éléments spectraux combine la haute précision des méthodes spectrales (utilisation de fonctions de base globales, comme les polynômes de Chebyshev ou de Legendre) avec la flexibilité de la méthode des éléments finis (maillage local). Elle est particulièrement efficace pour les problèmes exigeant une très grande précision, comme les vibrations, l'acoustique ou les écoulements laminaires dans les composites. Dans les matériaux composites, elle permet une modélisation précise des zones de transition entre différentes phases ou couches, notamment dans les stratifiés multicouches. Elle est cependant plus coûteuse en termes de calculs et de mise en œuvre, et

est donc réservée à des applications spécifiques ou à des études très pointues **[26].**

3.1.1.6. Méthode de l'homogénéisation numérique

L'homogénéisation numérique consiste à déterminer les propriétés effectives D'un matériau composite à partir d'une représentation numérique de sa Microstructure réelle ou virtuelle. Contrairement à l'homogénéisation analytique, cette méthode s'appuie sur des calculs numériques (souvent par éléments finis) pour résoudre les équations de l'élasticité, de la diffusion ou de la conduction thermique à l'échelle microscopique **[27].**

3.1.1.7. Méthode des champs moyens (Mean Field Homogenization)

La méthode des champs moyens est une approche analytique permettant de calculer les propriétés effectives d'un matériau composite à partir des propriétés individuelles des constituants et de leur distribution géométrique. Elle repose sur l'hypothèse que chaque inclusion est soumise à un champ moyen (de contrainte ou de déformation) représentatif de l'ensemble du matériau**x [28].**

3.1.2. Les niveaux de modélisation

Les niveaux de modélisation désignent les différents degrés de représentation utilisés pour simuler le comportement d'un matériau ou d'un système physique dans un environnement numérique. Chaque niveau correspond à une échelle d'observation particulière, allant d'une vue globale et simplifiée à une analyse très détaillée des structures internes. Cette hiérarchisation permet d'adapter la modélisation en fonction des objectifs visés soit pour obtenir des résultats rapides et globaux, soit pour explorer des phénomènes plus fins et localisés. En choisissant un niveau de modélisation approprié, les ingénieurs et chercheurs peuvent ainsi équilibrer précision, coût de calcul et complexité, tout en tenant compte des caractéristiques propres au matériau étudié.

La modélisation des matériaux composites repose sur une approche multi-échelle, qui permet de relier la microstructure à la réponse macroscopique. Trois niveaux principaux sont identifiés dans la littérature scientifique, chacun avec ses objectifs, avantages, limites et outils associés **[29].**

3.1.2.1. Modélisation macroscopique (ou homogénéisée)

À cette échelle, le matériau composite est assimilé à un milieu continu homogène et anisotrope, dont les propriétés mécaniques (module d'Young, coefficient de Poisson, résistance...) sont considérées comme des grandeurs effectives, résultant d'un comportement moyen du système fibre-matrice.

- **Avantages :** Très efficace pour la simulation de grandes structures ou composants industriels complexes, avec des temps de calcul réduits.
- **Limites :** Incapacité à capturer les effets locaux tels que les concentrations de contraintes, les délaminations ou les endommagements initiés à l'échelle microscopique.
- **Exemple :** Modélisation d'un longeron d'aile d'avion en composite carboneépoxy **[30].**

3.1.2.2. Modélisation microscopique (ou microstructurale)

Cette approche prend en compte explicitement la géométrie, l'orientation, la distribution spatiale et l'interaction entre les fibres et la matrice. Elle repose souvent sur des modèles de type Représentative Volume Element (RVE) couplés à des simulations par éléments finis.

- **Avantages** : Fournit des résultats très précis concernant les contraintes locales, la rupture interfaciale, ou les mécanismes d'endommagement.
- **Limites** : Coût computationnel très élevé, peu compatible avec la modélisation de grandes structures.
- **Exemple** : Simulation de la propagation d'une fissure autour d'un paquet de fibres dans un RVE de composite **[31].**

3.1.2.3. Modélisation multi-échelle

Méthode hybride qui consiste à coupler les deux approches précédentes : la microstructure est simulée ou mesurée à petite échelle, et les propriétés extraites sont ensuite injectées dans le modèle macroscopique. Cette méthode peut utiliser des techniques comme le bridging model, la FE^2 method (Finite Element squared), ou la méthode d'homogénéisation numérique.

- **Avantages :** Compromis optimal entre précision physique et efficacité numérique. Permet aussi la rétroaction des endommagements locaux vers le modèle global.
- **Limites :** Complexité de mise en œuvre, nécessité de données précises à plusieurs échelles.
- **Exemple :** Conception de prothèses biomécaniques en composite à fibres orientées, où les résultats d'essais microscopiques sont intégrés dans un modèle FEM complet du membre.

3.2. Outils de simulation

La modélisation des matériaux composites exige des outils de simulation puissants

capables de représenter la nature anisotrope, hétérogène et multicouche de ces matériaux. Plusieur logiciels sont couramment utilisés pour analyser leur comportement mécanique, thermique ou multiphysique. Chaque outil offre des fonctionnalités spécifiques et s'adapte à des contextes différents, qu'il s'agisse de recherche, de conception industrielle ou d'enseignement. Voici une présentation détaillée des logiciels les plus employés dans ce domaine, accompagnée de leurs principales applications.

- **ANSYS**

ANSYS est un logiciel de simulation par éléments finis (FEM) largement reconnu dans l'industrie et les universités pour ses capacités d'analyse structurelle, thermique et multiphysique. Il permet de concevoir, tester et optimiser virtuellement des structures complexes.

Dans le domaine des composites, ANSYS est particulièrement apprécié grâce à son module Composite PrepPost, qui permet de modéliser les empilements de couches, de définir l'orientation des fibres et de simuler les sollicitations thermomécaniques. Il est utilisé pour analyser les contraintes interlaminaires et prédire les ruptures à l'aide de critères comme Hashin, Tsai-Wu ou Maximum Stress. Ce logiciel est aussi capable de produire des visualisations 3D détaillées des déformations et des zones critiques dans une structure composite. En Algérie, ANSYS est très utilisé dans les projets de fin d'études et les travaux de recherche, notamment dans les secteurs aéronautique, ferroviaire et énergétique.

- **ABAQUS**

ABAQUS est un logiciel de simulation avancée, spécialisé dans les analyses non linéaires. Il est capable de simuler des phénomènes complexes tels que le contact, les grandes déformations, la rupture progressive et les comportements multiphysiques.

Pour les composites, ABAQUS excelle dans la modélisation des phénomènes de fissuration, de délamination et d'impact, notamment grâce à ses outils de modélisation cohésive et à la possibilité d'utiliser des sous-programmes personnalisés (UMAT). Ces fonctions permettent d'implémenter des lois de comportement spécifiques pour simuler le comportement réel de matériaux innovants ou expérimentaux. ABAQUS est donc un outil incontournable pour les ingénieurs travaillant sur la résistance à la fatigue, la tolérance aux dommages et la sécurité des structures composites soumises à des chargements extrêmes, comme dans l'aéronautique, l'automobile de compétition ou les énergies renouvelables.

- **SolidWorks Simulation**

SolidWorks Simulation est un module intégré au logiciel de conception 3D SolidWorks. Il permet de réaliser des analyses mécaniques simples à l'aide de la méthode des éléments finis dans un environnement convivial.

Dans le contexte des composites, SolidWorks Simulation est principalement utilisé à des fins pédagogiques ou pour des études de conception préliminaire. Il offre des fonctionnalités basiques permettant de simuler les contraintes et les déformations dans des structures multicouches relativement simples. Il est souvent utilisé dans les écoles d'ingénieurs pour initier les étudiants à la simulation numérique, ou dans les petites entreprises pour effectuer des vérifications rapides de la tenue mécanique de composants en composite. Bien qu'il ne permette pas l'étude de phénomènes complexes comme la délamination ou les non-linéarités, il reste utile pour explorer les effets de la variation de l'orientation des fibres ou de la géométrie des couches.

- **MATLAB / Simulink**

MATLAB est un environnement de calcul numérique très utilisé dans le monde scientifique, tandis que Simulink est une plateforme de simulation graphique permettant de modéliser des systèmes dynamiques. Ensemble, ils permettent une approche analytique et personnalisée de la modélisation.

Pour les composites, MATLAB est utilisé pour développer des modèles analytiques, calculer les propriétés effectives des matériaux, ou encore simuler des lois de comportement personnalisées. Il est particulièrement utile pour établir des relations mathématiques entre les paramètres du matériau (telles que les orientations des fibres, les modules d'élasticité, les coefficients thermiques) et leur réponse mécanique globale. MATLAB permet aussi d'interfacer les données issues d'essais expérimentaux avec des modèles numériques, facilitant ainsi la validation croisée des résultats. Il est donc largement utilisé dans les laboratoires universitaires et les centres de recherche pour le développement de nouveaux composites ou l'optimisation de configurations multicouches.

- **COMSOL Multiphasiques**

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis, spécialement conçu pour modéliser des phénomènes physiques couplés. Il se distingue par sa flexibilité et son interface graphique intuitive.

Dans la simulation des matériaux composites, COMSOL est utilisé pour étudier les interactions complexes entre les phénomènes thermiques, mécaniques, électriques ou encore

acoustiques. Il est particulièrement adapté aux composites multifonctionnels, comme ceux utilisés dans les capteurs embarqués, les dispositifs thermo-structuraux ou les structures intelligentes. Par exemple, il permet de modéliser l'effet de la température sur la conductivité électrique d'un composite ou l'influence d'un champ magnétique sur sa réponse mécanique. Grâce à ses modules spécialisés et à sa visualisation en temps réel, COMSOL facilite la compréhension des couplages physiques dans des composites à haute performance, souvent utilisés dans l'aérospatial, les micro technologies et les systèmes embarqués.

3.3. Analyse de la résistance des composites

3.3.1. Résistance mécanique : *traction, compression, impact*

3.3.1.1. Résistance à la traction

La résistance à la traction est une propriété essentielle des matériaux composites, particulièrement dans les applications aéronautiques, automobiles et sportives, où les structures doivent supporter de fortes charges sans se déformer. Cette résistance dépend principalement du type de fibres utilisées (carbone, verre, aramide, naturelles), de leur orientation, de leur pourcentage volumique, ainsi que de la qualité de l'interface fibre-matrice.

Par exemple, une étude de Boumediri et al. (2021) sur des composites polyester renforcés de fibres de lin et de chanvre a montré que la résistance à la traction augmentait proportionnellement à la fraction volumique de fibres végétales, atteignant plus de 120 MPa pour un taux de renfort de 40 % **[39]**.

Dans les composites à fibres de verre, les propriétés de traction sont souvent plus stables. Une recherche de Merabti et al. (2020) a révélé que les composites verre/polyester présentaient une résistance à la traction de 250 MPa dans la direction des fibres, mais cette valeur chutait à 80 MPa dans la direction transverse, illustrant l'anisotropie mécanique caractéristique des composites unidirectionnels **[40]**.

Une interface faible entre les fibres et la matrice peut entraîner un décohésionnement prématuré, ce qui est particulièrement problématique en présence de charges cycliques ou de fatigue. Pour y remédier, des traitements de surface (silane, plasma, greffage chimique) sont appliqués pour améliorer l'adhésion interfaciale.

3.3.1.2. Résistance à la compression

Les matériaux composites offrent une résistance à la compression souvent inférieure à

leur résistance à la traction. Cela est dû aux mécanismes de flambement des fibres, d'instabilités locales, et de fissuration de la matrice sous charges compressives.

Des essais menés par Chamis (NASA) ont montré que des composites carbone/époxy à orientation unidirectionnelle pouvaient atteindre des résistances en compression de 200 à 300 MPa dans le sens longitudinal, mais que cette valeur diminuait drastiquement à cause de la microflambée des fibres **[41].**

Des recherches plus récentes ont mis en évidence l'influence des défauts de fabrication (fissures, porosité, mauvaise imprégnation) sur la perte de performance. L'utilisation de modèles éléments finis tenant compte de la microstructure (inclusion des fibres, orientation locale, contraintes résiduelles) permet aujourd'hui de simuler précisément le comportement en compression de pièces industrielles **[42]**.

3.3.1.3. Résistance aux impacts

La résistance aux impacts est cruciale dans de nombreuses applications : capots automobiles, casques, blindages, etc. Les composites doivent être capables d'absorber l'énergie cinétique sans rupture catastrophique. Contrairement aux métaux qui se déforment plastiquement, les composites dissipent l'énergie par délaminage, rupture de fibres, fissuration de la matrice et friction interlaminaire.

Une étude de Cantwell et Morton (1991) a classé les modes d'endommagement selon la vitesse d'impact : à basse vitesse, on observe principalement des délaminages ; à haute vitesse, les fibres peuvent être brisées brutalement **[43].**

Des tissages spécifiques (sergé, satin) ou des architectures multicouches (3D woven, sandwich) améliorent significativement la résistance à l'impact. Par exemple, les composites tissés 3D peuvent absorber jusqu'à 35 % d'énergie en plus qu'un stratifié classique **[42].**

3.3.2. Influence de l'environnement industriel

Dans un contexte industriel, les performances des matériaux, notamment les composites, sont fortement influencées par l'environnement ambiant. Plusieurs facteurs externes peuvent altérer leur comportement mécanique, thermique ou chimique. Parmi les plus critiques, on distingue :

3.3.2.1. Chaleur et humidité

Les environnements industriels incluent souvent des variations thermiques importantes, notamment dans les moteurs, turbines ou structures exposées au soleil. La chaleur peut modifier la structure de la matrice polymère, provoquant une plastification ou une perte de cohésion à long terme.

Une étude de Khay et al. (2018) a montré que l'exposition prolongée à 70 °C et 90 %

d'humidité réduit de moitié la durée de vie en fatigue des composites carbone/époxy. L'humidité favorise l'absorption dans la matrice, provoquant un gonflement et une perte d'adhésion à l'interface **[44].**

Pour contrer ces effets, les ingénieurs utilisent des matrices thermostables (polyimides, cyanate-esters), des barrières étanches (films PET, couches céramiques) ou des résines hydrophobes.

3.3.2.2. Vibrations et chargements cycliques

Dans des environnements soumis à des vibrations mécaniques (machines tournantes, trains, aéronefs), les composites peuvent subir des endommagements progressifs. Les cycles répétés peuvent engendrer des microfissures, un délaminage, voire une rupture progressive des fibres.

Les recherches de Mouritz (2001) ont mis en évidence que des composites soumis à des charges cycliques de flexion ou de traction subissent une perte progressive de rigidité dès 10 000 cycles, particulièrement si l'interface fibre-matrice est faible **[45].**

L'intégration de capteurs d'émission acoustique ou de réseaux de fibres optiques permet aujourd'hui de suivre en temps réel les dommages internes (SHM : Structural Health Monitoring), ce qui est crucial dans l'aéronautique et les éoliennes.

3.3.2.3. Agents chimiques

Les composites exposés à des milieux corrosifs (industries chimiques, traitement des eaux, environnement marin) doivent résister à l'intrusion de solvants, huiles ou acides. Les agents chimiques peuvent pénétrer la matrice et provoquer une hydrolyse, une perte d'adhérence ou une dégradation du polymère.

Dans une étude récente, Gassan et Bledzki (2001) ont montré que les composites à base de fibres naturelles absorbent plus facilement l'eau et les solvants, ce qui réduit leur tenue mécanique de 20 à 40 %. Ce phénomène peut être réduit par imprégnation des fibres avec des agents hydrophobes comme l'anhydride maléique ou l'acétate de vinyle **[46].**

Les composites destinés aux milieux chimiques sont souvent renforcés par des fibres inertes (carbone, aramide) et des matrices résistantes aux solvants (vinylesters, polyester iso). Des revêtements (gelcoat, polyuréthane) peuvent aussi prolonger la durée de vie.

3.3.3. Validation expérimentale

Toute simulation reste une prédiction numérique. Pour garantir sa fiabilité, il est impératif de confronter les résultats à des données expérimentales. Cette étape de validation permet d'ajuster les paramètres du modèle, de vérifier sa pertinence, et de mieux comprendre les

écarts potentiels.

- **Les principales techniques de validation sont** :Essais mécaniques : traction, compression, flexion, cisaillement, fatigue cyclique.
- **Analyse thermique**: DMA (analyse dynamique mécanique), TGA (analyse thermogravimétrique), DSC.
- **Microscopie**: optique ou électronique à balayage (MEB) pour observer la morphologie, la distribution des fibres et les zones de délamination.
- **Tomographie**: permet d'observer l'intérieur du composite de manière non destructive, détecter les défauts internes (bulles, porosités, fissures).

3.4. Applications et perspectives :

Il y a des divers applications en perspectives en cité :

- **Avionique** : Les composites sont largement utilisés dans les structures d'ailes, les carénages, et les trappes d'accès. La simulation permet d'anticiper les efforts cycliques, les vibrations, et le comportement en cas d'impact.
- **Automobile** : Les pièces comme les bras de suspension, les capots, ou les éléments de carrosserie sont optimisées pour la légèreté et la performance. La simulation joue un rôle clé dans la modélisation des crash-tests.
- **Énergie** : Les pales d'éoliennes en matériaux composites sont soumises à des vents extrêmes. Les outils de simulation permettent d'analyser leur résistance dynamique et leur durabilité.
- **Biomédical** : Les implants osseux en composite fibreux sont conçus pour imiter le comportement mécanique des os. La simulation aide à ajuster la rigidité et à prévoir l'intégration biologique.

3.5. Perspectives et innovations

L'avenir de la simulation des composites est en pleine mutation. Les dernières avancées incluent :

- **L'intelligence artificielle : c**apable de prédire des propriétés mécaniques à partir d'une base de données de simulations.
- **Les jumeaux numériques** : un double virtuel qui évolue en temps réel avec la structure physique pour anticiper l'usure ou la rupture.
- **L'apprentissage automatique** : utilisé pour automatiser l'ajustement des

paramètres de modèles.

- **La fabrication additive** : ouvre la voie à la création de structures composites aux architectures complexes, optimisées par simulation.

Ces innovations vont profondément modifier la manière de concevoir, simuler et produire les composites dans les décennies à venir.

Conclusion

La modélisation et la simulation constituent deux piliers fondamentaux de l'ingénierie des matériaux composites, chacun jouant un rôle distinct mais interdépendant dans le processus de compréhension, de prédiction et d'optimisation du comportement des structures composites.

D'une part, la modélisation vise à formaliser les phénomènes physiques et mécaniques à l'aide de lois constitutives, d'hypothèses simplificatrices et de formulations mathématiques rigoureuses. Elle permet de représenter, avec un certain niveau d'abstraction, les interactions complexes entre les constituants d'un matériau composite (fibres, matrice, interface) ainsi que leur réponse globale aux sollicitations. La modélisation constitue donc une étape épistémologique essentielle, car elle définit les hypothèses structurantes du système étudié et les paramètres pertinents à prendre en compte.

D'autre part, la simulation correspond à la transposition numérique de ces modèles dans un environnement virtuel, généralement à l'aide de méthodes de calcul avancées telles que la méthode des éléments finis (MEF). Elle permet d'explorer, de manière dynamique et itérative, le comportement du système modélisé sous diverses conditions (charges, températures, humidité, dégradations, etc.), souvent inaccessibles expérimentalement. La simulation offre ainsi une puissance prédictive considérable, en particulier lorsqu'il s'agit d'optimiser des structures composites complexes ou de valider des choix de conception.

La relation entre modélisation et simulation est donc profondément synergique : une simulation n'a de sens que si le modèle sous-jacent est fidèle à la réalité physique, tandis qu'une modélisation, aussi élégante soit-elle, ne trouve toute sa valeur qu'à travers une mise en œuvre numérique capable de tester ses limites et de valider ses prédictions. Là où la modélisation pose le cadre théorique, la simulation permet d'en explorer les conséquences pratiques, de quantifier les incertitudes, et d'ajuster les modèles à la lumière des résultats obtenus.

En définitive, cette complémentarité méthodologique entre modélisation (conception intellectuelle du système) et simulation (expérimentation virtuelle du comportement) constitue un levier stratégique majeur pour relever les défis liés à la conception, la durabilité et la maintenance des structures composites dans l'ingénierie moderne.

Chapitre IV : Etude de Cas et Applications Industrielles

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'intégration potentielle des matériaux composites dans les opérations de maintenance de l'usine GiSB. En s'inspirant d'expériences industrielles réussies dans les secteurs comme l'aéronautique, l'automobile et la pétrochimie, nous étudierons la faisabilité celle approche dans un environnement local. L'objectif est d'identifier les zones critiques où ces matériaux pourraient apporter des gains en termes de performance **[48].**

4.1. Présentation du câblerie Sidi Bendehiba (GISB) :

La câblerie Sidi Bendehiba filiale du GISB (Groupe Industriel Sidi Bendehiba) est implanté dans la zone d'activités de Mesra Wilaya de Mostaganem. GISB opère dans le domaine de l'énergie depuis 2009.

Afin de répondre aux besoins du marché national et international, GISB fabrique et commercialise des fils machine ainsi que des fils et des câbles électriques (basse, moyenne et haute tension) de haute qualité **[2].**

4.1.1. Situation géographique :

GISB (groupe Industriel Sidi Bendehiba) est un groupe industriel diversifié implanté dans la zone d'activité de Mesra, wilaya de Mostaganem, GISB a eu profiter d'avantages géographique ; une implantation dans une ville portuaire.



Figure 4.1: Vue géographique de l'entreprise

4.1.2. Fonctionnement

La câblerie algérienne est une société industrielle spécialisée dans la fabrication de différentes sortes de câbles tell

- Câbles domestiques
- Câbles industriels
- Câbles moyennes tension
- Câbles basse tension
- Câbles moyenne tension
- Câbles haute tension
- Conducteurs nus

Les Différents types matières premières utilisées :

- **Cuivre** : Le cuivre est le métal le plus utilisé pour faire des fils et câbles électriques, car il a une excellente conductivité électrique. Les cuivres industriels non alliés peuvent, en général, être classés en trois grandes catégories qui sont, d'après la nomenclature française, Cu-a, Cu-b et Cu-c.
- **L'aluminium** : On utilise aujourd'hui des conducteurs d'aluminium pour les lignes aériennes, car le gain de poids ainsi obtenu compense largement la perte de conductivité par rapport au cuivre.
- **Bronze** : Le bronze est un matériau polyvalent et précieux qui trouve son application dans une multitude de domaines.Sa robustesse, sa résistance à la corrosion et sa malléabilité en font un choix privilégié pour l'industrie.
- **Almelec** : Dans le but d'obtenir des câbles très résistants mécaniquement pour les zones fortement givrées ou les lignes de montagne, des câbles almélec.

4.2. Besoins en maintenance et problématique identifiée

Dans le cadre des activités industrielles de l'usine GiSB, plusieurs équipements essentiels – tels que les réducteurs de vitesse, tréfileuses, fours de fusion et machines de câblage – sont fortement sollicités. Cette sollicitation constante, combinée à un environnement industriel exigeant (chaleur, humidité, vibrations, poussières métalliques), engendre des pannes récurrentes et une dégradation progressive des composants mécaniques.

Afin de mieux cerner les enjeux liés à la maintenance au sein de l'usine GiSB, il est essentiel d'identifier les types de défaillances techniques les plus couramment rencontrées. Ces défaillances permettent non seulement de comprendre les causes profondes des

interruptions de production, mais également de cibler les composants les plus vulnérables. Cela constitue une étape clé dans l'élaboration d'une stratégie de maintenance optimisée, notamment dans la perspective d'intégrer des matériaux Composites plus résistants.

4.2.1. Types de défaillances les plus fréquentes :

- **Usure des roulements** dans les réducteurs, souvent due à une chaleur excessive ou à une lubrification inadéquate.
- **Corrosion des structures métalliques**, causée par une exposition prolongée à l'humidité, à la chaleur ou à des produits chimiques.
- **Fissures et détérioration des supports** métalliques soumises à des vibrations continues ou à des charges répétées.
- **Desserrage progressif** des fixations en raison des vibrations mécaniques
- **Déformation mécanique** de certains composants sous contrainte ou surchauffe.

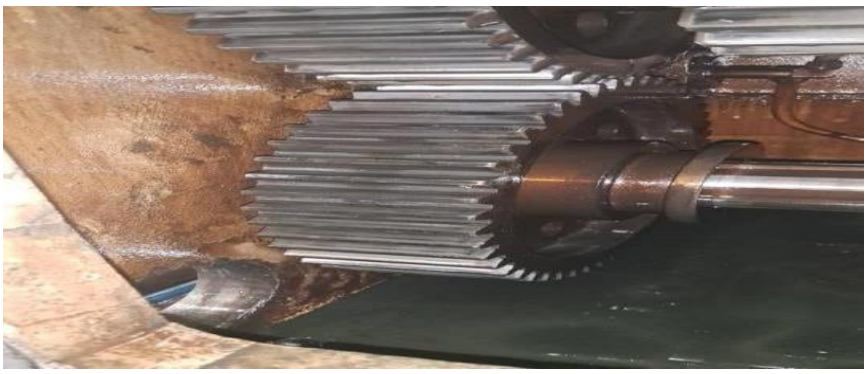


Figure 4.2: Exemple de corrosion avancée sur une pièce métallique

4.2.2. Conséquences sur la production

- **Arrêts de ligne prolongés** pour démontage et remplacement des pièces endommagées.
- **Ralentissement de la production** dû à l'indisponibilité des machines critiques.
- **Coût élevé** en pièces de rechange importées ou sur commande spéciale.
- **Risque de défauts de qualité** si les réparations sont retardées ou temporaires.

4.3. Limites des méthodes actuelles de maintenance :

- La maintenance corrective utilisée est souvent réactive (intervention uniquement après la panne), ce qui augmente les pertes de production.
- Le remplacement total des composants endommagés, même pour de petites

fissures ou zones localisées, est coûteux et lent.

- L'absence de technologies avancées comme les réparations par matériaux composites limite les solutions à des approches mécaniques classiques.
- Le manque de personnel formé pour des réparations plus ciblées et innovantes limite l'efficacité de la maintenance préventive.

4.4. intégration des matériaux composites au sein de l'usine GiSB

Face à ces problématiques, l'introduction de matériaux composites pour la réparation ou la protection des équipements s'avère être une alternative pertinente et une solution innovante pour faire face aux défaillances récurrentes constatées.. Ces matériaux offrent :

- **Une grande résistance** à la corrosion, à la chaleur et aux vibrations,
- **Une légèreté** qui facilite leur mise en œuvre sur site,
- **Une durabilité accrue** qui prolonge la vie des composants,
- **Et une application rapide et ciblée**, réduisant les temps d'arrêt.

Cette section propose des pistes concrètes d'intégration des composites, en identifiant les équipements critiques et en suggérant des applications ciblées.

4.4.1. Équipements ou zones concernées

À travers les observations faites durant le stage, plusieurs zones et équipements se prêtent particulièrement à l'intégration des matériaux composites :

- **Carters métalliques et supports de machines** : souvent sujets à des fissures et déformations.
- **Carters métalliques et supports de machines** : souvent sujets à des fissures et déformations.
- **Réducteurs de vitesse** : exposés à l'usure mécanique, aux vibrations et à la



Figure 4.3:Réducteur de vitesse encrassé avec fuite d'huile

chaleur.



Figure 4.4: Fissure observée sur un support métallique d'équipement

- **Structures externes exposées à l'humidité et aux produits chimiques, capots de protection** : zones vulnérables à la corrosion.
- **Enceintes de protection ou gaines de câbles** : dégradées par les hautes températures et les dépôts métalliques.

4.4.2. Application des matériaux composites :

Les matériaux composites peuvent être appliqués de plusieurs manières selon le type de cas

- **dégradation constatée :**

Renforcement localisé des structures fissurées : utilisation de tissus en fibre de verre/carbone imprégnés de résine pour colmater et solidifier les zones endommagées.
Revêtement anticorrosion des surfaces métalliques : application de bandes ou de films composites résistants aux produits chimiques et à l'humidité.

- **Protection thermique** :

Intégration de matériaux composites isolants autour des équipements soumis à des températures élevées.

- **Réparation rapide sur site** :

Emploi de kits de réparation composite pour intervenir sans démontage complet des pièces, réduisant ainsi le temps d'arrêt.

4.4.3. Matériaux composites envisageables .

Selon les contraintes mécaniques, thermiques et chimiques observées dans l'usine,

plusieurs types de matériaux composites peuvent être recommandés :

- **Fibre de verre** : Economique, bonne résistance chimique, idéale pour la protection anticorrosion **[48].**
- **Fibre de carbone** : Plus coûteuse mais très résistante mécaniquement, utilisée pour les zones soumises à de fortes contraintes ou vibrations.
- **Fibre d'aramide (Kevlar)** : Résistance exceptionnelle aux chocs et à la chaleur, utilisée dans des applications spécifiques **[49].**

4.4.4. Avantages attendus

- Réduction significative des coûts de maintenance par limitation des remplacements complets.
- Diminution des arrêts de production grâce à des interventions rapides.
- Allongement de la durée de vie des composants sensibles.
- Amélioration de la sécurité et de la fiabilité des installations.

4.4.5. Processus d'intégration des matériaux composites

Afin de garantir une intégration efficace et durable des matériaux composites dans la maintenance des équipements chez GiSB, une méthodologie en plusieurs étapes est nécessaire. Cette démarche structurée permet de passer d'une idée théorique à une application concrète sur le terrain, tout en assurant la fiabilité, la conformité technique et l'optimisation des performances. Ce qui suit présente les principales étapes à suivre pour remplacer progressivement les carters métalliques par des capots composites en GFRP.

- **Analyse des dimensions actuelles des carters métalliques**
  - ✓ Relevé précis des côtes et formes des capots existants
  - ✓ Identification des contraintes mécaniques, thermiques et environnementales spécifiques à chaque poste.
  - ✓ Recensement des fréquences d'intervention sur ces éléments pour adapter le design aux besoins de maintenance
- **Conception des moules en collaboration avec le bureau d'études**
  - ✓ Modélisation 3D des futurs carters en tenant compte des tolérances industrielles.
  - ✓ Choix du type de moule (simple ou double peau) selon la géométrie et le niveau de finition souhaité.
  - ✓ Intégration d'éléments facilitant le montage/démontage (charnières,

poignées, zones d'accès…)

- **Fabrication de prototypes en GFRP (fibres de verre + résine polyester**)
  - ✓ Préparation des couches de fibres et imprégnation à la résine dans un environnement contrôlé.
  - ✓ Polymérisation à température ambiante ou en four selon les spécifications techniques.
  - ✓ Finition manuelle (ponçage, perçage, ajustement) pour valider les tolérances.

4.4.6. Besoins en formation du personnel

Pour garantir le succès de cette intégration, il est indispensable de former les techniciens et agents de maintenance aux techniques de mise en œuvre des composites :

- Connaissance des types de matériaux composites et de leurs propriétés.
- Méthodes d'application : préparation de surface, imprégnation, mise en place, durcissement.
- Respect des procédures de sécurité lors de la manipulation des résines et des solvants.
- Maintenance préventive avec composites (inspection régulière des zones renforcées)Une formation initiale de 2 à 3 jours suffirait pour initier le personnel aux réparations de base avec composites **[5].**

4.4.7. Conditions de réussite de l'intégration chez GiSB

L'introduction des composites chez GiSB est faisable, mais elle dépend de plusieurs facteurs clés :

- **Disponibilité du matériau :**
  - ✓ Accès local ou via fournisseurs spécialisés aux résines époxy, polyuréthane, et aux fibres de verre, carbone ou kevlar.
  - ✓ Stock minimal à entretenir pour répondre rapidement aux besoins urgents de réparation.
- **Compétence du personnel :**
  - ✓ Formation des agents de maintenance aux techniques de préparation de surface, application de la résine, pose de la fibre et séchage.
  - ✓ Développement d'un protocole interne standardisé pour les réparations

composites.

- **Environnement de travail adapté** *:*
  - ✓ Zone propre, bien ventilée, pour l'application des composites.
  - ✓ Respect des températures de durcissement pour garantir une solidité optimale.
  - ✓ Respect des normes de sécurité (gants, masques, etc.

- **Suivi et retour d'expérience interne :**
  - ✓ Documenter chaque intervention composite (avant/après, durée de vie, performance).
  - ✓ Ajuster les techniques selon les résultats observés.

4.4.8. Exemple d'application au sein du site de GiSB

Afin d'illustrer de manière pratique le potentiel des matériaux composites dans la maintenance industrielle, nous présentons ci-dessous deux exemples concrets d'application réalisés dans le contexte de l'usine GiSB.

Ces cas permettent de mieux comprendre comment l'intégration de ces matériaux peut répondre à des problématiques spécifiques, tout en améliorant à la fois la sécurité des opérateurs et l'efficacité des interventions de maintenance et en réduisant les coûts d'exploitation.

4.4.8.1. Exemple 1

Dans la ligne d'extrusion utilisée pour la fabrication des câbles électriques au sein de l'usine GiSB, on retrouve des carters de protection métalliques (généralement en acier ou en aluminium) installés pour :

- Protéger les opérateurs contre les pièces en mouvement ou les zones chaudes.
- Protéger les équipements contre la poussière et les projections.

Cependant, ces carters présentent plusieurs inconvénients :

- Poids élevé rendant les opérations de démontage/montage longues et pénibles.
- Risque de corrosion, surtout en environnement humide ou chargé en poussière.
- Bords coupants, présentant un danger lors des interventions de maintenance.
- Coût de remplacement élevé, notamment en cas de déformation ou d'usure.

Nous proposons le remplacement progressif des carters métalliques par des carters en

composite à base de fibre de verre (GFRP : Glass Fiber Reinforced Plastic), présentant les avantages suivants :

- Matériau léger et résistant mécaniquement.
- Inoxydable, donc parfait pour un usage industriel prolongé. Isolant thermique et électrique.
- Facilement moulable, donc adaptable aux formes existantes.

Analyse technique comparative :

Critère	Métal	Composite
Coût de fabrication unitaire	~100 €	~130
Coût d'entretien annuel	Élevé	Réduit (moins d'interventions)
Temps moyen de démontage/remontage	25 – 30 min	10 – 12 min
Durée de retour sur investissement	--	~6 mois

Tableau 4.1 : Analyse technique comparative

Analyse économique comparative :

Critère	Métal	GFRP (Composite)
Coût horaire main d'œuvre	20 €/h	20 €/h
Nombre d'interventions / an	4	4
Temps par intervention	0.5 h	0.2 h
Coût par intervention	10 €	4 €
Coût fabrication initial	100 €	130 €
Coût interventions sur 3 ans	10 € × 4 × 3 = 120 €	4 € × 4 × 3 = 48 €
Coût total sur 3 ans	220 €	178 €
Durée de vie	3 ans max	5–6 ans

Tableau 4.2 : Évaluation des coûts et de la durabilité : Métal vs GFRP

4.4.8.2. Exemple 2

Nous proposons ici une deuxième application concrète au sein de l'usine GiSB, l'optimisation de la vis sans fin, un élément central dans le processus de transport des matières premières (granulés, poudres, etc.) entre différentes étapes de production. Cette

pièce, soumise à des conditions de fonctionnement exigeantes (frottement, humidité, charge mécanique), montre plusieurs limitations lorsqu'elle est entièrement fabriquée en acier :

- Usure rapide des pales due au frottement abrasif et à l'humidité ambiante.
- Poids élevé de la vis, rendant les opérations de démontage/remontage complexes.
- Arrêts fréquents des lignes dus à la dégradation mécanique des pales.
- Niveau sonore élevé pendant le fonctionnement, affectant le confort des opérateurs.

Afin d'améliorer la fiabilité et la facilité de maintenance, il est proposé d'introduire les matériaux composites dans certaines parties de la vis sans fin, tout en conservant la structure porteuse métallique. Composants à remplacer :

- **Pales hélicoïdales** : remplacement par un composite à base de fibre de verre et de résine polyester :
  - ✓ Réduction de poids jusqu'à 40 %.
  - ✓ Résistance élevée à l'usure.
  - ✓ Réduction des vibrations et du bruit
- **Capots de protection autour de la vis** : fabrication en composite sandwich léger pour faciliter l'accès lors des interventions tout en maintenant une bonne protection

Analyse technique comparative

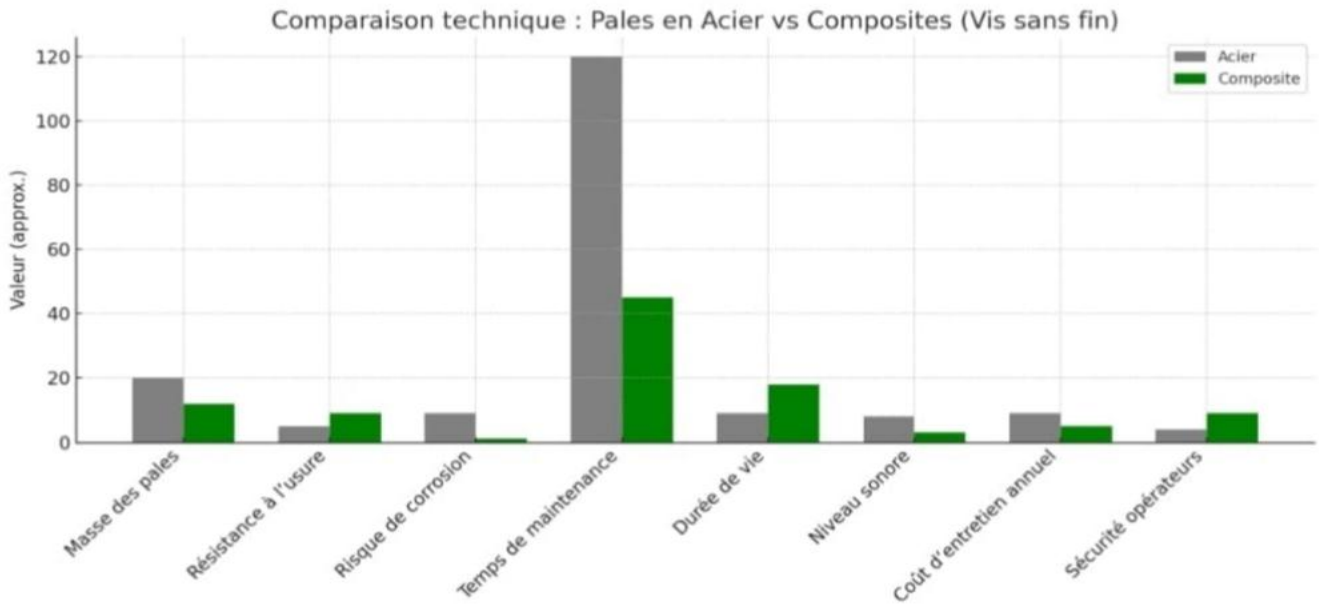


Figure 4.5: Diagramme comparative pales en acier vs composites

Tableau 4.3 : Résultats comparatif avec valeurs approximatives

Critère	**Acier (Gris)**	**Composites (Vert)**
Masse des pales	20	10
Résistance à l'usure	6	12
Risque de corrosion	8	2
Temps de maintenance	120	45
Durée de vie	10	20
Niveau sonore	6	10
Coût d'entretien annuel	8	4
Sécurité des opérateurs	2	6

Les pales fabriquées en matériau composite (fibre de verre + résine) présentent plusieurs avantages techniques par rapport à celles en acier :

- Poids réduit : Les pales composites sont beaucoup plus légères.
- Meilleure résistance à l'usure.
- Faible risque de corrosion, contrairement à l'acier.
- Temps de maintenance considérablement réduit.
- Durée de vie plus longue.
- Réduction du niveau sonore (moins de bruit).
- Coût d'entretien annuel plus faible.
- Sécurité accrue pour les opérateurs.

4.4. Étude de cas – Utilisation de capots composites sur une machine à câbler – Usine GiSB.

Introduction

Dans le cadre du projet d'amélioration continue à l'usine GiSB, une démarche innovante a été lancée visant à remplacer les capots métalliques des machines par des capots en composite GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer). Cette substitution vise à répondre aux besoins de légèreté, de résistance thermique, et de réduction de la maintenance. Afin de valider ce choix, une simulation numérique sous MATLAB a été réalisée pour comparer le comportement mécanique des deux matériaux sous différentes conditions de charge.

4.5.1. Objectifs de la simulation

L'objectif de cette simulation est d'analyser et comparer deux critères essentiels pour le choix d'un capot :

- La contrainte moyenne subie par le matériau.
- Le déplacement maximal de la structure.

Ces critères ont été étudiés en fonction de trois niveaux croissants de sollicitation (force, température et fréquence), représentant des conditions normales, modérées et extrêmes d'utilisation.

4.5.2. Méthodologie de simulation

La simulation repose sur une modélisation simplifiée réalisée sous MATLAB. Trois cas ont été simulés pour chaque matériau (métallique et composite) :

Tableau 4.4 : Les données d'entrées

Cas	Force (N)	Température (°C)	Fréquence (Hz)
Cas1 (normal)	1000	45	60
Cas2 (moyenne)	2000	90	120
Cas3 (élevé)	3000	135	180

- **Code Matlab**

```
% Paramètres d'entrée pour le capot métallique
F = 1000;           % Force d'impact en N
A = 500e-6;         % Surface d'impact en m²
L = 0.3;            % Longueur du capot en m
b = 0.2;            % Largeur du capot en m
e = 5e-3;           % Épaisseur du capot en m
E = 210e9;          % Module d'élasticité du métal (acier) en Pa
rho = 7850;         % Masse volumique du métal en kg/m³
fv = 60;            % Fréquence ambiante (Hz)
T = 45;             % Température ambiante en °C (non utilisée ici)

% Calcul de la contrainte moyenne
sigma = F / A;      % Contrainte en Pa

% Calcul de la flexion (déplacement maximal)
I = (b * e^3) / 12;
delta_max = (F * L^3) / (48 * E * I);

% Masse du capot
m = rho * L * b * e;

% Calcul de la fréquence propre approximative
f_nat = (1/(2*pi)) * sqrt((3 * E * I) / (m * L^3));

% Affichage des résultats
fprintf('--- Résultats pour le capot métallique ---\n');
fprintf('Contrainte moyenne : %.2f MPa\n', sigma / 1e6);
fprintf('Déplacement maximal : %.3f mm\n', delta_max * 1e3);
fprintf('Fréquence propre : %.1f Hz\n', f_nat);
fprintf('Fréquence ambiante : %.1f Hz\n', fv);
```

```
>> % Paramètres d'entrée
F = 2000;                   % Force d'impact en N
A = 500e-6;                 % Surface d'impact en m² (500 mm²)
e = 5e-3;                   % Épaisseur du capot en m (5 mm)
E = 44.6e9;                 % Module d'élasticité du GFRP en Pa (44.6 GPa)
rho = 2000;                 % Masse volumique en kg/m³
T = 90;                     % Température ambiante en °C (non utilisé ici)
fv = 120;                    % Fréquence de vibration en Hz (non utilisé ici)

% Calcul de la contrainte moyenne (approximation)
sigma = F / A;              % Contrainte en Pa

% Calcul de la flexion (déplacement vertical) approximative : δ = F * L³ / (48 * E * I)
L = 0.3;                    % Longueur du capot simulé en m
b = 0.2;                    % Largeur du capot en m
I = (b * e^3) / 12;         % Moment d'inertie pour une plaque rectangulaire

delta_max = (F * L^3) / (48 * E * I);  % Déplacement maximal en m

% Affichage des résultats
fprintf('--- Résultats de simulation ---\n');
fprintf('Contrainte moyenne : %.2f MPa\n', sigma / 1e6);
fprintf('Déplacement maximal : %.3f mm\n', delta_max * 1e3);
--- Résultats de simulation ---
Contrainte moyenne : 4.00 MPa
Déplacement maximal : 12.108 mm
```

```
% Paramètres d'entrée pour le capot métallique
F = 3000;           % Force d'impact en N
A = 500e-6;         % Surface d'impact en m²
L = 0.3;            % Longueur du capot en m
b = 0.2;            % Largeur du capot en m
e = 5e-3;           % Épaisseur du capot en m
E = 210e9;          % Module d'élasticité du métal (acier) en Pa
rho = 7850;         % Masse volumique du métal en kg/m³
fv = 180;            % Fréquence ambiante (Hz)
T = 135;             % Température ambiante en °C (non utilisée ici)

% Calcul de la contrainte moyenne
sigma = F / A;      % Contrainte en Pa

% Calcul de la flexion (déplacement maximal)
I = (b * e^3) / 12;
delta_max = (F * L^3) / (48 * E * I);

% Masse du capot
m = rho * L * b * e;

% Calcul de la fréquence propre approximative
f_nat = (1/(2*pi)) * sqrt((3 * E * I) / (m * L^3));

% Affichage des résultats
fprintf('--- Résultats pour le capot métallique ---\n');
fprintf('Contrainte moyenne : %.2f MPa\n', sigma / 1e6);
fprintf('Déplacement maximal : %.3f mm\n', delta_max * 1e3);
fprintf('Fréquence propre : %.1f Hz\n', f_nat);
fprintf('Fréquence ambiante : %.1f Hz\n', fv);
```

4.5.3. Résultats et Interprétations

À partir du tableau récapitulatif des trois cas de simulation, nous pouvons représenter graphiquement l'évolution des contraintes moyennes et des déplacements maximaux en fonction de l'augmentation progressive des paramètres d'entrée (force, température et fréquence). Ces diagrammes permettent de visualiser clairement la tendance linéaire du comportement mécanique des capots en matériaux composites face à différentes sollicitations.

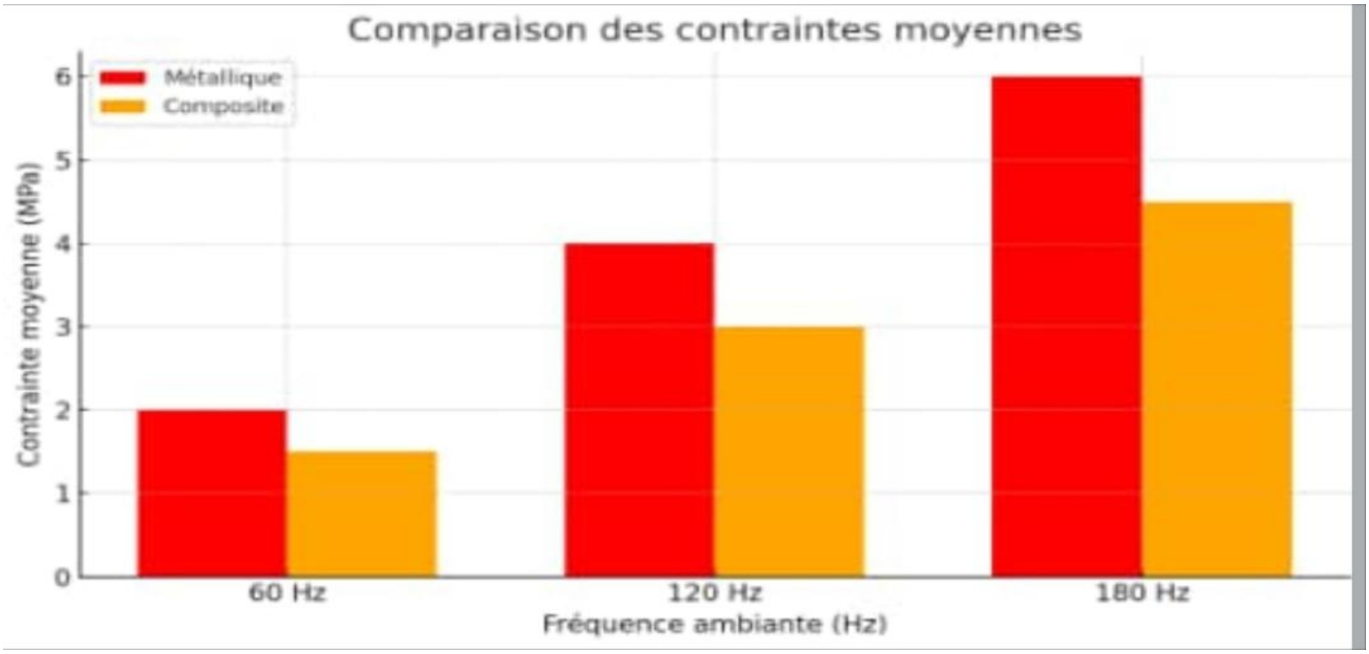


Figure 7.6: Diagramme comparative des contraintes moyennes

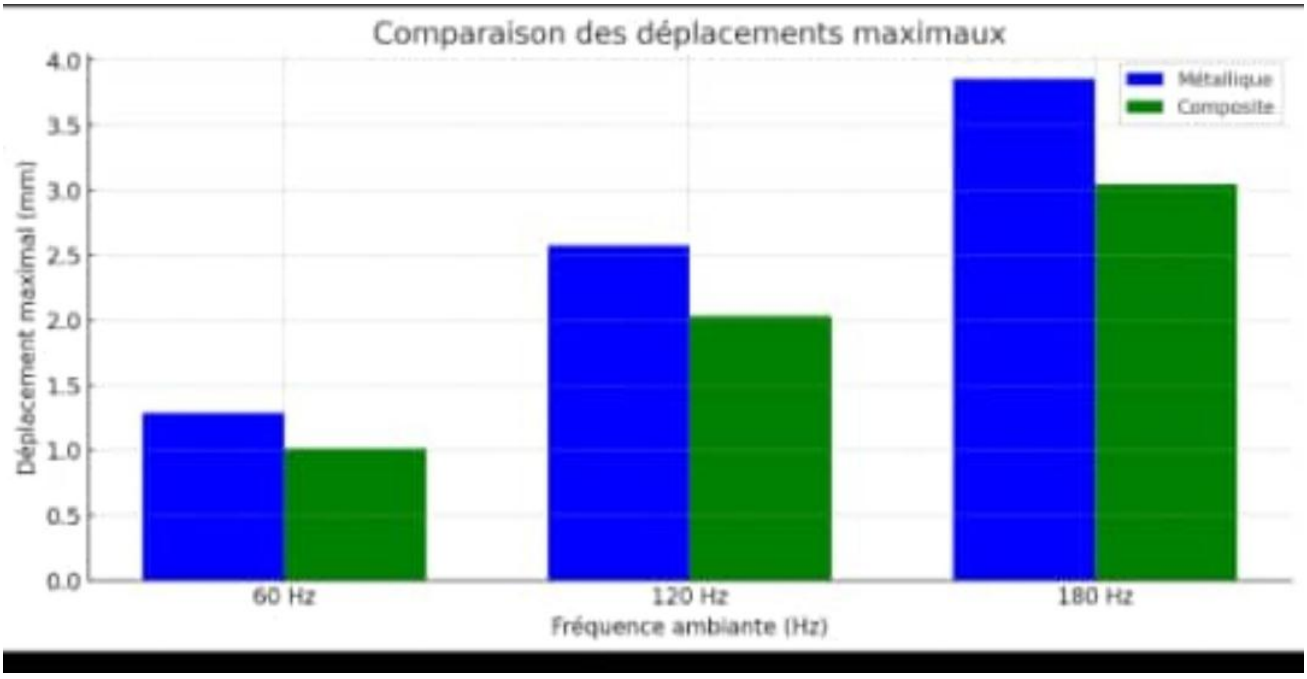


Figure 4.7:Diagramme comparative des déplacements maximum

4.5.3.1. Résultats :

- ✓ *Résulta composite GFRB*

Cas	Contrainte (MBA)	Déplacement (mm)
1	1.42	0.15
2	2.85	0.28
3	4.27	0.42

- ✓ *Résulta métallique*

Cas	Contrainte(MBA)	Déplacement (mm)
1	1.61	0.05
2	3.20	0.09
3	4.90	0.14

Tableaux 4.5 : Résultats obtenu par le logiciel Matlab

4.5.3.2. Interprétations

L'introduction de trois cas de charge progressifs (normal, moyen et extrême) dans cette simulation a permis d'analyser avec précision l'évolution du comportement mécanique des capots métalliques et composites (GFRP) face à des sollicitations croissantes.

Lorsque l'on augmente les paramètres d'entrée à savoir :

- La force appliquée (Cas 1 : 1000 N, Cas 2 : 2000N, et Cas 3 : 3000 N),
- La température ambiante (Cas 1 : 45 °C, Cas 2 :90°C, Cas 3 : 135 °C),
- La fréquence vibratoire (Cas 1 : 60 Hz, Cas 2 : 120 Hz, et Cas 3 : 180 Hz),

On observe systématiquement une augmentation linéaire ou quasi-linéaire des grandeurs de sortie, à savoir:

- Contrainte moyenne (MPa)
- Déplacement maximal (mm)

Cette tendance est parfaitement cohérente avec les lois fondamentales de la mécanique des matériaux :

- ✓ selon Loi de Hooke **($\sigma = E \times \varepsilon$)**, la contrainte σ est proportionnelle à la déformation ε tant que le matériau reste dans sa zone élastique, ce qui justifie l'augmentation linéaire observée. Plus la force appliquée est élevée, plus le matériau est sollicité. Cela signifie que les fibres internes du matériau sont davantage tendues.et donc le matériau doit résister à une charge mécanique supérieure.
- ✓ la formule du déplacement δ dans une structure montre que ce

déplacement est également proportionnel à la force appliquée, à géométrie et rigidité constantes, donc il est lie à la flexibilité et est donnée par la formule :

$$\boldsymbol{\delta = \frac{F.L^3}{3EI}}$$

où :

- F est la force appliquée,
- L est la longueur (ou la distance concernée),
- E est le module d'élasticité du matériau,
- I est le moment d'inertie de la section transversale.

En parallèle, l'élévation de la température diminue la rigidité des matériaux, devient plus souple tandis qu'une fréquence plus élevée induit des charges dynamiques plus intenses, ce qui accentue encore les déplacements.

Conclusion

L'ensemble des simulations réalisées dans cette étude a permis une analyse approfondie du comportement mécanique des capots en matériau composite GFRP, en comparaison avec leurs équivalents métalliques actuellement utilisés dans l'usine GiSB. Grâce à une approche numérique rigoureuse sous MATLAB, intégrant la variation progressive des conditions de charge (force, température, fréquence), les résultats obtenus montrent une réponse globalement stable, linéaire et prévisible du composite, conformément aux lois fondamentales de la mécanique des matériaux telles que la loi de Hooke.

L'analyse comparative des diagrammes a révélé plusieurs éléments clés :

- Les déplacements et les contraintes sont systématiquement plus élevés dans les capots métalliques, indiquant une rigidité et une stabilité moindres par rapport au composite GFRP.
- La réponse du composite reste dans la plage élastique, même sous sollicitations vibratoires croissantes, ce qui traduit une bonne absorption des charges et une meilleure adaptation aux environnements dynamiques.
- La sensibilité des deux matériaux à l'augmentation de la fréquence met en évidence l'importance d'un choix optimisé du matériau selon les conditions vibratoires réelles.

Cette approche numérique offre des avantages majeurs :

- Évaluation fiable sans essais destructifs,
- Réduction du poids, des coûts et du temps de maintenance,

- Amélioration de la sécurité et de l'ergonomie pour les opérateurs,
- Base technique robuste pour le prototypage et l'industrialisation.

En définitive, les simulations confirment la supériorité du matériau composite GFRP dans ce type d'application. Malgré sa flexibilité, il présente une meilleure stabilité structurelle, une bonne résistance aux contraintes, et une durabilité accrue. Ces résultats fournissent une base solide pour orienter le choix des matériaux en fonction des exigences industrielles, en conciliant performance, sécurité et pérennité.

4.5. Intégration des matériaux composites dans les machines industrielles : exemples issus de la littérature

Il convient de souligner que la démarche entreprise dans cette étude de cas, visant à remplacer les capots métalliques d'une machine de torsion de câblage par des capots en matériau composite, s'inscrit dans une tendance largement documentée dans la littérature scientifique et technique. Plusieurs travaux similaires ont été menés dans des domaines variés tels que l'automobile, l'aéronautique, le maritime et les machines industrielles. À titre d'exemple, des études ont démontré avec succès le remplacement de capots moteurs métalliques dans les moteurs marins par des composites thermoplastiques renforcés, offrant ainsi une réduction significative du poids et des coûts, tout en maintenant de bonnes performances mécaniques **[50].** D'autres recherches ont porté sur des structures composites soumises à la torsion (arbres d'entraînement ou coques cylindriques), mettant en évidence leur capacité à résister à des charges dynamiques tout en assurant un bon comportement vibratoire **[51].** De plus, certaines études ont porté sur l'optimisation de capots de protection et d'éléments de structure non porteurs à travers l'utilisation de composites à matrice polymère ou chargés en fibres de verre **[52].** Ces références confirment la faisabilité technique, économique et fonctionnelle de la solution proposée dans cette étude, et confortent l'idée que l'utilisation des matériaux composites représente une alternative fiable et performante dans les applications industrielles exigeant légèreté, résistance et durabilité.

Conclusion Générale

L'essor des matériaux composites marque une avancée décisive dans le domaine de la maintenance industrielle. Grâce à leurs propriétés remarquables, notamment leur légèreté, leur résistance mécanique élevée, leur bonne tenue à la corrosion et leur adaptabilité à des conditions spécifiques, les matériaux composites offrent des solutions innovantes pour répondre aux défis croissants de performance, de fiabilité et de durabilité auxquels font face les installations industrielles modernes. Leur intégration progressive dans les pratiques de maintenance témoigne d'un changement de paradigme, où la technicité des matériaux devient un levier stratégique pour la compétitivité industrielle.

Sur le plan opérationnel, l'utilisation des composites dans la maintenance industrielle permet une amélioration significative de la fiabilité des équipements. En limitant les phénomènes de corrosion, d'usure, de fatigue ou de rupture prématurée, ces matériaux contribuent à prolonger la durée de vie des composants et à réduire les pannes imprévues. Leur résistance aux environnements agressifs (humidité, produits chimiques, températures extrêmes) en fait des alliés de choix pour les secteurs exposés à des conditions sévères. De plus, leur légèreté réduit la charge structurelle globale des équipements, ce qui entraîne une diminution des contraintes mécaniques sur l'ensemble du système et, par conséquent, une baisse des besoins en maintenance.

Ce potentiel technologique s'appuie également sur des retours d'expérience positifs issus d'industries exigeantes. Dans l'aéronautique, les patchs composites permettent des réparations rapides sur des structures métalliques, réduisant ainsi les temps d'immobilisation des appareils. En pétrochimie, les composites sont utilisés pour le revêtement de tuyauteries corrodées, prolongeant leur durée de vie tout en renforçant leur intégrité. Dans le secteur de l'énergie, notamment éolien, ils servent au renforcement des pales ou d'isolateurs exposés à des contraintes sévères. L'automobile, enfin, intègre les composites dans des éléments soumis aux chocs et vibrations, tels que les supports de moteur. Ces exemples démontrent la faisabilité, la robustesse et la pertinence du recours aux composites dans des contextes variés et contraignants.

En parallèle, les coûts de maintenance connaissent une réduction notable. Si l'investissement initial peut être plus élevé que celui requis pour des matériaux traditionnels, les économies générées à moyen et long terme sont substantielles. Cela résulte d'une diminution du nombre d'interventions, d'une facilité de manipulation et d'installation, d'une réduction des arrêts de production, et d'une maintenance moins fréquente mais plus ciblée. Ainsi, la stratégie de maintenance évolue vers des approches plus intelligentes, prédictives et

moins coûteuses. Dans une logique de cycle de vie, l'emploi des composites participe à l'allongement de la durée de vie des équipements tout en assurant une meilleure stabilité des performances.

Cette transition vers une maintenance enrichie par les composites ouvre de nombreuses perspectives de recherche. D'une part, le développement de composites multifonctionnels constitue une piste prometteuse : intégration de capteurs dans la matrice pour surveiller en temps réel l'état de santé des structures (SHM – Structural Health Monitoring), systèmes d'auto-cicatrisation en cas de microfissures, ou encore matériaux adaptatifs capables de modifier leur comportement sous l'effet de stimuli externes. D'autre part, l'optimisation des procédés de fabrication, notamment grâce à l'impression 3D ou à la robotique, permettrait de réduire les coûts de production et d'augmenter la précision dans les applications industrielles spécifiques. Par ailleurs, la modélisation numérique et la simulation des comportements mécaniques et thermiques des composites doivent continuer à être perfectionnées pour anticiper avec davantage de fiabilité leur performance en service.

En dehors du champ strictement industriel, les applications potentielles des composites ne cessent de s'étendre. Dans l'aéronautique et l'automobile, les composites sont déjà massivement utilisés pour alléger les structures et réduire la consommation d'énergie. Mais d'autres secteurs, comme le ferroviaire, la construction (bâtiments intelligents, renforcement de structures), les énergies renouvelables (pales d'éoliennes, composants de batteries), ou encore les domaines médical et militaire, bénéficient également de leurs caractéristiques. Ce transfert technologique entre secteurs accélère l'innovation et permet une synergie entre les exigences de maintenance, de durabilité et d'écoresponsabilité.

Cependant, malgré ces avancées, l'adoption généralisée des matériaux composites se heurte à plusieurs limites et défis. Le premier obstacle concerne leur coût de fabrication, encore élevé pour certaines applications. La complexité de mise en œuvre – nécessitant une main-d'œuvre spécialisée, des outils spécifiques et un contrôle qualité rigoureux – constitue un frein dans certaines industries peu capitalisées ou insuffisamment formées. De plus, la recyclabilité des composites, notamment thermodurcissables, demeure un enjeu environnemental majeur. Leur valorisation en fin de vie, leur séparation des composants, et leur traitement nécessitent des solutions industrielles encore peu matures. Enfin, le comportement à long terme de ces matériaux, en particulier sous des charges variables, en environnement humide ou face à la fatigue cyclique, doit faire l'objet d'investigations complémentaires pour garantir leur fiabilité sur plusieurs décennies.

En conclusion, les matériaux composites représentent aujourd'hui une réponse technologique pertinente aux exigences croissantes de la maintenance industrielle moderne. Leur capacité à améliorer les performances des équipements, à réduire les coûts et à allonger leur durée de vie en fait un atout stratégique pour les entreprises industrielles cherchant à concilier productivité et durabilité. Pour pleinement exploiter ce potentiel, il est essentiel de poursuivre les efforts de recherche, de formation, de normalisation et d'intégration systémique. Les années à venir verront sans doute l'émergence de solutions composites toujours plus intelligentes, plus durables et plus économiques, consolidant leur rôle central dans l'industrie du futur.

Référence et bibliographiques

[1] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). *Materials science and engineering: An introduction* (9e éd.). Wiley.

[2] Daniel, I. M., & Ishai, O. (2006). *Engineering mechanics of composite materials* (2e éd.). Oxford University Press.

[3] Gibson, R. F. (2010). A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures. *Composite Structures, 92*(12), 2793–2810. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.05.003

[4] International Organization for Standardization (ISO). (2005). *ISO 1268-1:2005 – Composites renforcés – Méthodes de fabrication des éprouvettes d'essai*. https://www.iso.org/standard/35489.html

[5] Jawaid, M., & Khalil, H. P. S. A. (2011). Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate Polymers, 86*(1), 1–18. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.02.047

[6] Mallick, P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design* (3e éd.). CRC Press.

[7] Airbus. (2018). *Composite material report for structural applications*. Airbus Group.

[8] Benamara, N. (2020). *Étude comparative entre composites et alliages pour des structures aéronautiques* [Mémoire de master, Université de Béjaïa]. https://www.iso.org/standard/35489.html

[9] Jahromi, M. N., & Ravandi, M. (2024). Composite material design for optimized fracture toughness using machine learning. *arXiv Preprint*, arXiv:2406.16166.

[10]Hasan, M. R., Khan, M. A., & Wuest, T. (2024). Towards Industry 5.0: A systematic literature review on sustainable and green composite materials supply chains. *arXiv Preprint*, arXiv:2402.06100.

[11]Alaghemandi, M., & Alamandi, M. (2025). Heat transfer in composite materials: Mechanisms and applications. *arXiv Preprint*, arXiv:2501.15231.

[12]Mengesha Aznaw, G. (2025). Advances in composite structures: A systematic review of design, performance, and sustainability trends. *ResearchGate*.

[13]StartUs Insights. (2025). *Top 10 trends in composite materials*. StartUs Insights.

[14]Research and Markets. (2024). *Bio-based composite material market report 2024: Market revenue data from 2023, estimates for 2024, forecast for 2028 and projected CAGRs through 2029*. GlobeNewswire.

[15]Technavio. (2023). *Composite materials market analysis, growth & forecast 2023–2028*. Technavio.

[16]*Journal of Composite Materials*. (2024). Recent advances in mechanics of composite materials. *Taylor & Francis Online*.

[17]MDPI. (2025). Feature papers in *Journal of Composites Science* in 2024. *MDPI*.

[18]Alsyouf, I., & Taisch, M. (2020). A framework for preventive maintenance planning considering reliability and costs. *Journal of Manufacturing Systems, 54*, 44–56.

[19]Khawaja, T., Doulgerakis, G., & Milioudis, A. (2019). Predictive and preventive maintenance based on condition monitoring data: A review. *Procedia Manufacturing, 38*, 1745–1752.

[20]Rastegari, A., & Mobin, M. (2022). Preventive maintenance strategies in industrial systems: A review. *Journal of Manufacturing Systems*.

[21]Gharbi, A., & Kenne, J. P. (2023). Condition-based inspections in preventive maintenance: Techniques and challenges. *Computers & Industrial Engineering*.

[22]Alabdulkarim, L., & Ball, P. D. (2022). Optimizing lubrication management for predictive maintenance. *Procedia CIRP*.

[23]Wu, S., & Liu, J. (2024). Preventive replacement strategies for critical components. *Reliability Engineering and System Safety*.

[24]Fernandez, J. E., & Gonzalez-Prida, V. (2023). Calibration and software updates in smart manufacturing maintenance. *IFAC-PapersOnLine*.

[25]Zonta, T., et al. (2023). Predictive maintenance benefits in reducing downtime and costs. *Sensors*.

[26]Nunes, J. P., & Marques, A. T. (2021). A review on composite materials for industrial maintenance applications. *Composite Structures, 273*, 114291.

[27]Zhao, Y., et al. (2020). Long-term durability of composite materials under harsh environmental conditions: A critical review. *Composite Structures, 238*, 111911.

[28]Teboul, A., et al. (2021). Composite materials for strengthening and repairing industrial structures. *Journal of Composites Science, 5*(6), 158.

[29]Ferreira, A., et al. (2021). Advances in the use of composites for maintenance and repair operations: An industrial perspective. *Polymers, 13*(9), 1486.

[30]Guedes, R. M. (2021). Applications of composite materials for repair and reinforcement of industrial equipment: Recent advances and perspectives. *Composite Structures, 268*, 113919.

[31]Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2020). Industrial artificial intelligence for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters, 24*, 59–62.

[32]Nguyen, H., Kim, S., & Kim, J. (2021). Emerging technologies for digital transformation: Robots, drones, and sensors in Industry 4.0. *Journal of Industrial Information Integration, 23*, 100215.

[33]Siciliano, B., & Khatib, O. (2022). *Springer handbook of robotics* (2nd ed.). Springer.

[34]Austin, R. (2021). *Unmanned aircraft systems: UAVs design, development and deployment* (2nd ed.). Wiley.

[35]Frank, R., & Powell, M. (2020). *Understanding smart sensors* (3rd ed.). Artech House.

[36]Boumediri, A., et al. (2021). Étude du comportement mécanique de composites polyester/fibres végétales. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.

[37]Merabti, M., et al. (2020). Mechanical behavior of glass-fiber reinforced polyester composites. *Materials Today: Proceedings*.

[38]Chamis, C. C. (2000). Simplified composite micromechanics equations for strength, fracture toughness, impact resistance. *Composite Structures*.

[39]Zhou, G., et al. (2023). Impact behavior of 3D woven composites. *Composite Structures*.

[40]Khay, M., et al. (2018). Durabilité des composites sous environnement humide et chaud. *Polymers*.

[41]Cantwell, W., & Morton, J. (1991). Impact behavior of carbon fiber composites. *Composites*.

[42]Mouritz, A. P. (2001). Fatigue behavior of polymer composites under cyclic loading. *Composites Part A*.

[43]Gassan, J., & Bledzki, A. K. (2001). Moisture absorption and strength degradation in natural fibre composites. *Polymer Composites*.

[44]Techniques de l'Ingénieur. (2019). Les composites dans l'industrie automobile – Avantages des matériaux composites. *Techniques de l'Ingénieur*. https://www.techniques-ingenieur.fr

[45]Auteur anonyme. (2020). Développement industriel et logistique portuaire en Algérie : Cas de la région de Mostaganem. *Revue des Sciences Sociales et Humaines, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem*.

[46]Nguyen, T., & Garon, A. (2019). *Maintenance industrielle : Diagnostic, fiabilité et solutions innovantes*. Éditions Techniques de l'Ingénieur.

[47] Unknown. (2020). *Thermoplastic materials for the metal replacement of non-structural components in marine engines*.

[48] Unknown. (2021). *Research on torsional capacity of composite drive shaft under clockwise and counter-clockwise torque*. & Unknown. (2019). *Experimental and numerical analysis of a composite thin-walled cylindrical structures with different variants of stiffeners, subjected to torsion*.

[49] Unknown. (2020). *New design of composite structures used in automotive engineering*.

[50] . Unknown. (2020). Thermoplastic materials for the metal replacement of non-structural components in marine engines.

[51] . Unknown. (2021). Research on torsional capacity of composite drive shaft under clockwise and counter-clockwise torque. & Unknown. (2019). Experimental and numerical analysis of a composite thin-walled cylindrical structures with different variants of stiffeners, subjected to torsion.

[52] . Unknown. (2020). New design of composite structures used in automotive engineering.