

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU**

**FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION**



**Mémoire de fin d'études**

**En vue de l'obtention du diplôme de master en génie mécanique**

**Option : génie des matériaux**

**Thème**

**Analyse comparative des méthodes d'optimisation pour la  
détection d'endommagements dans des poutres composites.**

**Proposé et dirigé par :**

**-Mr. TIACHACHT Samir**

**Réalisé par :**

**-ZERROUKI Kenza**

**-MEHDI Kenza**

**Mémoire soutenu le 08 Juillet 2025 devant le jury composé de :**

**Président : M OULD OUALI Mohend**

**Examinatrice : Mme MANSOURI Lila**

**Promotion : 2024 /2025**

## Remerciements

Ce mémoire de fin d'études représente l'aboutissement d'un travail rigoureux, mené avec engagement et persévérance. À travers ces remerciements, nous souhaitons exprimer notre reconnaissance envers celles et ceux qui nous ont soutenus, guidés et accompagnés tout au long de ce parcours.

Nous tenons à adresser nos plus sincères remerciements à **Tiachacht Samir**, notre encadrant, pour son accompagnement attentif, ses conseils éclairés et la qualité de ses retours tout au long de cette recherche. Son exigence, sa disponibilité et son regard critique ont grandement contribué à la solidité de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury, **Ould Ouali Mohend** et **Mansouri Lila**, pour l'intérêt porté à notre travail, ainsi que pour le temps consacré à l'évaluation de ce mémoire. Leurs remarques et observations constituent pour nous un prolongement essentiel de cette réflexion.

Nous remercions l'ensemble du corps enseignant de l'**UMMTO** pour la richesse des enseignements dispensés durant notre formation. Les connaissances transmises, tout comme les exigences pédagogiques rencontrées, ont constitué un socle déterminant dans la réalisation de ce mémoire.

Nous souhaitons également remercier les personnes qui ont contribué à notre étude, que ce soit par leur témoignage, leur temps ou leurs réponses. Leur participation a apporté une valeur concrète et précieuse à notre travail de recherche.

Enfin, nous adressons notre gratitude à nos proches – familles et amis – pour leur soutien indéfectible, leur compréhension et leur patience tout au long de cette période exigeante. Leur présence a été un véritable appui.

La collaboration en binôme a été, tout au long de ce projet, fondée sur une répartition équilibrée des responsabilités, une confiance mutuelle et une réelle complémentarité. Cette dynamique a donné naissance à un travail que nous sommes fiers de porter à deux voix.

## Dédicaces

*Je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers.*

*À mes chers parents, Aucune dédicace ne saurait exprimer l'immensité de mon respect, de mon amour éternel et de ma gratitude pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et mon bien-être. Merci pour tout le soutien et l'amour que vous m'avez toujours portés. J'espère que votre bénédiction m'accompagnera tout au long de ma vie. Mama, repose ton cœur... Ton rêve est enfin devenu réalité. Ta petite fille est aujourd'hui diplômée, comme tu l'as tant imaginé et désiré.*

*À mes merveilleux frères, **Ouamar et Massinissa**, À mes chères sœurs, **Khalida et Thiziri**, Merci pour votre soutien moral et vos précieux conseils tout au long de mes études. Votre amour sans limite a été une force inestimable qui m'a porté chaque jour.*

*À mes petits anges, **Aylan, Rabah et Djohar**, dont la joie de vivre et l'énergie m'inspirent au quotidien et me rappellent l'importance de donner le meilleur de soi-même.*

*Je dédie ce mémoire à la mémoire de ma tante **Tasadit**, dont la sagesse et le soutien ont marqué mon parcours. Bien qu'elle ne soit plus parmi nous, son influence reste présente à chaque étape.*

*À ma chère binôme **Kenza**, Pour son entente, sa sympathie et sa compréhension tout au long de ce projet.*

*À toute ma famille, À tous mes amis, À tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment,*

*Recevez l'expression de ma profonde reconnaissance.*

**ZERROUKI Kenza**

## ***Dédicaces***

*Avant tout, je remercie **Allah**, qui m'a accordé la patience et la force nécessaires pour mener à bien ce travail.*

*À ma mère, Ma force et mon refuge. Merci pour ton amour sans limites, ton courage silencieux et ton soutien indéfectible. Chaque ligne de ce mémoire porte la trace de tes sacrifices et de ta présence. Je te le dédie du plus profond de mon cœur, avec une gratitude éternelle.*

*À l'âme de mon père et à la mémoire de mes grands-parents, Je vous porte dans mon cœur à chaque instant. Votre présence m'accompagne autrement, mais intensément. J'espère que vous êtes fiers de moi, là où vous êtes.*

*À ma sœur **Fariza** et à mon frère **Ghezali**, Merci d'avoir été là, toujours, dans les moments simples comme dans les plus durs. Vos mots, vos gestes et votre présence ont souvent suffi à me redonner confiance. Votre amour fraternel m'a accompagnée plus que vous ne l'imaginez. Je suis fière de vous avoir à mes côtés.*

*À ma famille et à mes amis, Merci pour votre amour, votre présence et vos encouragements tout au long de ce parcours.*

*À mon binôme et meilleure amie **Kenza**, Merci d'avoir partagé cette aventure avec cœur, sérieux et complicité. Ton soutien, ta présence constante et ta confiance ont été essentiels tout au long de ce travail. Réaliser ce mémoire à tes côtés a été une véritable force.*

**MEHDI Kenza**

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Figure I-1</b> : Matériau composites.....	4
<b>Figure I-2</b> : Différents types de matrices organiques et minérales. ....	6
<b>Figure I-3</b> : Différents types de renforts dans les composites .....	8
<b>Figure I-4</b> : Différents architectures du renfort : (a) unidirectionnelle, (b) multidirectionnelle aléatoire, (c) bidirectionnelle(tissus) et (d) tridimensionnelle.....	9
<b>Figure I-5</b> : Fibres de verre E.....	10
<b>Figure I-6</b> : Fibres de carbone.....	10
<b>Figure I-7</b> : Fibres aramide .....	11
<b>Figure I-8</b> : Fibres céramique.....	11
<b>Figure I-9</b> : Interphase .....	12
<b>Figure I-10</b> : Principe du moulage au contact.....	13
<b>Figure I-11</b> : Moulage sous vide .....	13
<b>Figure I-12</b> : Principe du moulage par projection simultanée.....	14
<b>Figure I-13</b> : Constitution d'un stratifié.....	16
<b>Figure I-14</b> : Stratifié croisé : (02 /902) S unidirectionnel : (0) <sup>8</sup> .....	17
<b>Figure I-15</b> : Stratifié .....	17
<b>Figure I-16</b> : Stratifié quasi-isotrope : (02/452/902/-452) .....	17
<b>Figure I-17</b> : Stratifié sandwich.....	17

### Chapitre II

<b>Figure II-1</b> : Les différents types de maintenance.....	20
<b>Figure II-2</b> : Principales méthodes de détection d'endommagement.....	24
<b>Figure II-3</b> : Déformation d'une poutre (théorie de Timochenko) .....	25
<b>Figure II-4</b> : Représentation des couches de la poutre .....	27
<b>Figure II-5</b> : Élément fini SI8.....	28
<b>Figure II-6</b> : Fonction de forme de l'élément fini SI12.....	29
<b>Figure II-7</b> : Élément fini SI12 .....	32

### Chapitre III

<b>Figure III-1</b> : numérotation des éléments d'une poutre composite en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) ( a : une poutre encastée encastée ; b : une poutre encastée libre) .....	40
---	----

<b>Figure III-2</b> : (a) Poutre endommagés encastree-encastree (Cas3 Cas4) ; (b) Poutre endommagés encastree-libre (Cas1 Cas2) en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°).....	41
<b>Figure III-3</b> : (a) Détections d'endommagement ; (b) Localisations et quantifications des éléments endommagés de Cas1 en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°).....	42
<b>Figure III-4</b> : (a) Détections d'endommagement ; (b) Localisations et quantifications des éléments endommagés de Cas2 en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°).....	43
<b>Figure III-5</b> : Déplacements de poutre encastree libre en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°)....	43
<b>Figure III-6</b> : (a) Détections d'endommagement ; (b) Localisations et quantifications des éléments endommagés de Cas3 en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°).....	44
<b>Figure III-7</b> : (a) Détections d'endommagement ; (b) Localisations et quantifications des éléments endommagés de Cas4 en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°).....	45
<b>Figure III-8</b> : Déplacements de poutre encastree-encastree en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°). .....	45

## Chapitre IV

<b>Figure IV-1</b> : Comportements correctifs de base entre les individus dans un essaim de nuages. .....	52
<b>Figure IV-2</b> : Comportement d'un essaim dans un espace bidimensionnel .....	53
<b>Figure IV-3</b> : Pseudo-code de l'algorithme CDO .....	54
<b>Figure IV-4</b> : Poutre encastree-libre en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 1 - 10% d'endommagement dans l'élément 10 - Test N° 1 – 100 itération et variation population.....	61
<b>Figure IV-5</b> : Poutre encastree-libre en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 1 - 10% d'endommagement dans l'élément 10 - Test N°2 – 50 population et variation itération.....	62
<b>Figure IV-6</b> : Poutre encastree-libre en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 1 - 10% d'endommagement dans l'élément 10 - Test N° 3 – 50 population et variation itération.....	63
<b>Figure IV-7</b> : Poutre encastree-libre en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 1 - 10% d'endommagement dans l'élément 10 - Test N° 4 -50 population et variation itération .....	64
<b>Figure IV-8</b> : poutre encastree-libre en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 2 10% d'endommagement dans l'élément 8 et l'élément 13 avec 20% - Test N° 1 – 100 itération et variation population. ....	65
<b>Figure IV-9</b> : Poutre encastree-libre en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 2 10% d'endommagement dans l'élément 8 et l'élément 13 avec 20% - Test N° 2.....	67
<b>Figure IV-10</b> : Poutre encastree-libre en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 2 10% d'endommagement dans l'élément 8 et l'élément 13 avec 20% - Test N° 3.....	68
<b>Figure IV-11</b> : Poutre encastree-libre en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 2 10% d'endommagement dans l'élément 8 et l'élément 13 avec 20% - Test N° 4.....	69
<b>Figure IV-12</b> : Poutre encastree-encastree en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 3 15% d'endommagement dans l'élément 6 - Test N° 1 – 100 itération et variation population. ....	70

<b>Figure IV-13</b> : Poutre encastrée-encastrée en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 3 15% d'endommagement dans l'élément 6 - Test N° 2 –50 population et variation itération.....	71
<b>Figure IV-14</b> : Poutre encastrée-encastrée en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 3 15% d'endommagement dans l'élément 6 - Test N° 3 –50 population et variation itération.....	72
<b>Figure IV-15</b> : Poutre encastrée-encastrée en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 3 15% d'endommagement dans l'élément 6 - Test N° 4 –50 population et variation itération.....	73
<b>Figure IV-16</b> : Poutre encastrée-encastrée en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 4 10% d'endommagement dans l'élément 10 et l'élément 16 avec 20% - Test N° 1 –100 itération et variation population. ....	74
<b>Figure IV-17</b> : Poutre encastrée-encastrée en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 4 10% d'endommagement dans l'élément 10 et l'élément 16 avec 20% - Test N° 2 –50 population et variation itération.....	75
<b>Figure IV-18</b> : Poutre encastrée-encastrée en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 4 10% d'endommagement dans l'élément 10 et l'élément 16 avec 20% - Test N° 3 –50 population et variation itération.....	76
<b>Figure IV-19</b> : Poutre encastrée-encastrée en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°) - cas 4 10% d'endommagement dans l'élément 10 et l'élément 16 avec 20% - Test N° 4 –50 population et variation itération.....	77

### Liste des tableaux

<b>Tableau I-1</b> : Type de composites.....	5
<b>Tableau.II-1</b> . Potentialités et limites des méthodes CND0-1 .....	23

## Liste des notations

<b>Symbole</b>	<b>Signification</b>
U	Énergie de déformation
$\varepsilon$	Déformation
$\sigma$	Contrainte
D	Matrice de rigidité
L	Matrice de liaison contrainte-déplacement
N	Matrice des fonctions de forme (élément fini)
$\delta$	Est une amplitude de perturbation adaptative
w	Flèche ou déplacement transversal
K	Facteur de correction de cisaillement
$\rho$	Masse volumique
B	Largeur d'une couche ou dimension géométrique
E	Module d'élasticité
$\theta$	Angle d'orientation des couches dans un stratifié
$V_f$	Taux de fibres (fraction volumique de fibres)
$\varphi$	Est une variable aléatoire (typiquement où).
A, B	sont des coefficients aléatoires ou déterministes
$X_i(j)$	la position actuelle du nuage iii dans la dimension j
t, Tt	Temps courant et temps total dans les algorithmes d'optimisation
$\mu$	Poids dynamique dans les algorithmes (nuages ou BOA)
w	Est le poids dynamique du nuage
i,j	Indices des nœuds ou des éléments

## Sommaire

<b>Introduction générale .....</b>	<b>2</b>
<b>Chapitre I: Généralités sur les matériaux composites.....</b>	<b>3</b>
<i>I.1. Introduction.....</i>	<i>4</i>
<i>I.2. Définition du matériau composite.....</i>	<i>4</i>
<i>I.3. Différents types de composites.....</i>	<i>4</i>
<i>I.4. Constitution des matériaux composite .....</i>	<i>5</i>
<i>I.5. L'interphase.....</i>	<i>11</i>
<i>I.6. Fabrication des stratifiés composites.....</i>	<i>12</i>
<i>I.7. Propriétés mécaniques des composites .....</i>	<i>14</i>
<i>I.8. Architectures d'un matériau composite.....</i>	<i>15</i>
<i>Conclusion.....</i>	<i>17</i>
<b>Chapitre II : Maintenance et modélisation des poutres stratifiées.....</b>	<b>19</b>
<i>II.1. Introduction.....</i>	<i>19</i>
<i>II.2. La maintenance.....</i>	<i>19</i>
<i>II.3. Méthodes de maintenance.....</i>	<i>20</i>
<i>II.4. Méthodes de contrôle non destructif.....</i>	<i>21</i>
<i>II.5. Potentialités et limites des CND.....</i>	<i>23</i>
<i>II.6. Modélisation par éléments finis de poutres stratifiées.....</i>	<i>24</i>
<i>II.8. Conclusion.....</i>	<i>34</i>
<b>Chapitre III : Localisation d'endommagement basé sur les courbures modales.....</b>	<b>35</b>
<i>III.1. Introduction.....</i>	<i>36</i>
<i>III.2. Méthode de détection d'endommagement basée sur les courbures modales.....</i>	<i>36</i>
<i>III.3. Application et résultats.....</i>	<i>40</i>
<i>III.4. Conclusion .....</i>	<i>46</i>
<b>Chapitre IV : Localisât et quantification d'endommagement basée sur courbure modale couplé avec les algorithmes d'optimisation .....</b>	<b>47</b>
<i>IV.1. Introduction.....</i>	<i>48</i>
<i>IV.2. Optimisation de la Dérive des Nuages (CDO).....</i>	<i>48</i>
<i>IV.3. Optimisation de L'algorithme BOA (Backstabbing Optimization Algorithm).....</i>	<i>55</i>
<i>IV.4. Perturbations aléatoires.....</i>	<i>59</i>
<i>IV.5. Fonction objectif.....</i>	<i>60</i>
<i>IV.6. Résultat .....</i>	<i>60</i>
<i>IV.5. Conclusion.....</i>	<i>77</i>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>79</b>
<b>Référence bibliographiques .....</b>	<b>81</b>

# **Introduction générale**

L'utilisation croissante des poutres en matériaux composites dans des secteurs de pointe tels que l'aéronautique, l'aérospatiale, l'automobile ou encore le sport de haut niveau s'explique par leurs excellentes propriétés mécaniques. En effet, leur légèreté, leur rigidité spécifique, ainsi que leur résistance à la corrosion offrent des avantages significatifs par rapport aux matériaux traditionnels. Ces propriétés permettent également une conception plus optimisée des structures, répondant aux exigences spécifiques de chaque application.

Cependant, malgré leurs performances remarquables, les matériaux composites ne sont pas exempts de défauts, que ce soit lors de leur fabrication ou durant leur utilisation. Ces défauts, souvent internes ou difficilement détectables, peuvent engendrer des concentrations de contraintes, menant à des défaillances potentiellement graves. D'où l'importance d'un contrôle régulier et rigoureux de l'intégrité des structures afin de garantir leur fiabilité et sécurité.

Dans ce contexte, les méthodes de contrôle non destructif (CND) jouent un rôle fondamental. Ces techniques permettent d'évaluer l'état des structures sans avoir à les détériorer. Parmi elles, l'analyse vibratoire s'est imposée comme une méthode efficace pour détecter des endommagements internes, notamment grâce à la sensibilité des paramètres vibratoires (fréquences propres, modes de vibration, courbures modales...) aux changements des propriétés mécaniques des structures.

Malgré leurs atouts, les méthodes vibratoires présentent une limite importante : elles détectent les défauts mais peinent à les quantifier précisément. Pour répondre à cette problématique, ce mémoire propose une démarche innovante combinant l'analyse vibratoire avec des méthodes d'optimisation, afin de mieux localiser et quantifier les endommagements dans les poutres en matériaux composites.

Notre objectif est de développer une approche intégrée pour le diagnostic, la surveillance et la maintenance préventive de structures composites, en particulier dans le cadre du contrôle de poutres sollicitées en service. Ce travail s'inscrit dans une logique d'amélioration continue des performances structurelles et de réduction des risques d'avarie.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres, suivis d'une conclusion générale.

- **Chapitre 1** : Généralités sur les matériaux composites

Ce chapitre présente les bases théoriques des matériaux composites, notamment leurs propriétés, les différentes configurations des fibres, ainsi que les avantages qu'ils offrent dans le domaine de l'ingénierie structurale. Une attention particulière est portée aux poutres composites stratifiées et à leur comportement mécanique.

- **Chapitre 2** : Méthodes numériques, éléments finis (SI12) et surveillance des structures

Ce chapitre introduit la méthode des éléments finis à travers l'étude de cas SI12, un outil puissant pour la modélisation du comportement mécanique des structures. Il traite également des stratégies de maintenance préventive, et des techniques de contrôle non destructif, avec un focus sur leur importance pour la fiabilité à long terme des structures composites.

- **Chapitre 3** : Méthodes de détection d'endommagement

Ce chapitre est consacré à l'étude des différentes approches de détection d'endommagement basées sur déplacement. Nous avons étudié deux structures poutre encastree-libre et encastree-encastree de 1D en matériaux composite stratifiée en  $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$ , nous utiliserons SI12. Leurs avantages, limites, et domaines d'application sont discutés.

- **Chapitre 4** : Méthodes d'optimisation

Ce chapitre présente les méthodes d'optimisation utilisées pour la quantification des endommagements dans les poutres composites. L'accent est mis sur les algorithmes d'optimisation (comme CDO et BOA), leur principe de fonctionnement, ainsi que leur efficacité à renforcer la précision des diagnostic vibratoire. Des simulations numériques sont réalisées pour valider les performances des algorithmes proposés et comparés leurs résultats.

**Chapitre I. Généralités sur les matériaux  
composites.**

## I.1 Introduction

Les matériaux composites jouent un rôle crucial dans de nombreux secteurs industriels en raison de leurs performances supérieures et de leur légèreté. Leur développement, bien que progressif, a permis des avancées révolutionnaires, attirant des industries telles que l'aéronautique, l'automobile, la construction et les infrastructures. Ces matériaux se distinguent par leur capacité à combiner les avantages de plusieurs constituants, leur conférant une rigidité, une résistance mécanique et chimique, une ténacité élevée, ainsi qu'une grande légèreté. Ces caractéristiques les rendent particulièrement résistants face aux phénomènes environnementaux. En particulier, les composites à matrice thermoplastique renforcés par des fibres naturelles gagnent en popularité grâce à leurs applications dans des secteurs variés, notamment l'aéronautique, la construction automobile, le bâtiment, et l'industrie chimique et pétrochimique. L'utilisation croissante de ces matériaux résulte de leurs propriétés fonctionnelles exceptionnelles, associées à une maintenance réduite et une grande liberté de conception.

## I.2 Définition du matériau composite

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage d'au moins de deux composants seuls non miscibles. Le résultat possède des propriétés avantageuses que les composants seuls ne possèdent pas. Il permet d'améliorer la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité, etc.) et la croissante des matériaux composites dans différents secteurs industriels. Le matériau composite est constitué d'un renfort, qui contribue aux propriétés mécaniques de la pièce, et d'un liant, appelé matrice (**figure I-1**). Le rôle de la matrice est d'assurer la cohésion entre les éléments du renfort, mais aussi de transférer les flux d'efforts entre les plis, de garantir la tenue à l'environnement (corrosion, vieillissement humide) et la tenue en température.

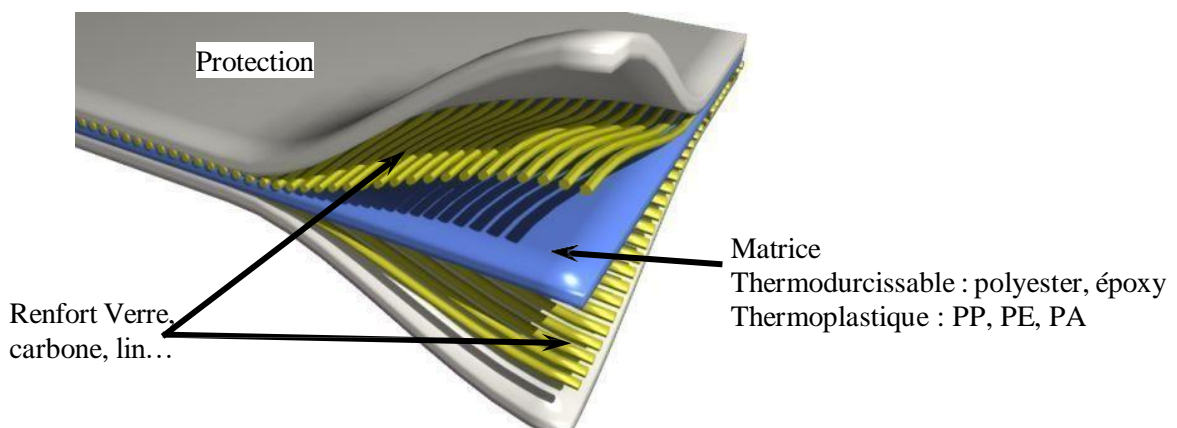


Figure I-1: Matériau composites.

## I.3 Différents types de composites

Il existe plusieurs types de matériaux composites dont les principaux sont résumés dans le Tableau I.1 suivant :

Tableau I-1. Type de composites.

Type de composite	Constituants	Domaines d'application
<b>Composites à matrice organique :</b> <b>Papier, carton</b> <b>Panneaux de particules</b> <b>Panneaux de fibres</b> <b>Toiles enduites</b> <b>Matériaux d'étanchéité</b> <b>Pneumatiques</b> <b>Stratifiés</b> <b>Plastiques renforcés</b>	Résine/charges/fibres Cellulosiques Résine/copeaux de bois Résine/fibres de bois Résines souples/tissus Elastomères/bitume/textiles Caoutchouc/toile/acier Résine/charges/fibres de verre, de carbone, etc. Résines/microsphères	Imprimerie, emballage, etc. Menuiserie Bâtiment Sports, bâtiment Toiture, terrasse, etc. Automobile Domaines multiples
<b>Composites à matrice minérale</b> <b>Béton</b> <b>Composite carbone carbone</b> <b>Composite céramique</b>	Ciment/sable/granulats Carbone/fibres de carbone Céramique/fibres céramiques	Génie civil Aviation, espace, sports, biomédecine, etc. Pièces thermomécaniques
<b>Composites à matrice métallique</b>	Aluminium/fibres de bore Aluminium/fibres de carbone	Espace
<b>Sandwiches Peaux Ames</b>	Métaux, stratifiés, etc. Mousses, nids d'abeilles, balsa, plastiques renforcés, etc.	Domaines multiples

## I.4 Constitution des matériaux composite

### I.4.1 La matrice

Les matrices jouent un rôle essentiel dans les matériaux composites, en liant les fibres de renforcement et en transférant les charges. Elles offrent également une protection chimique aux fibres et définissent la forme désirée du produit final. La classification des types de matrice que l'on rencontre fréquemment est présentée dans (la figure I-2).

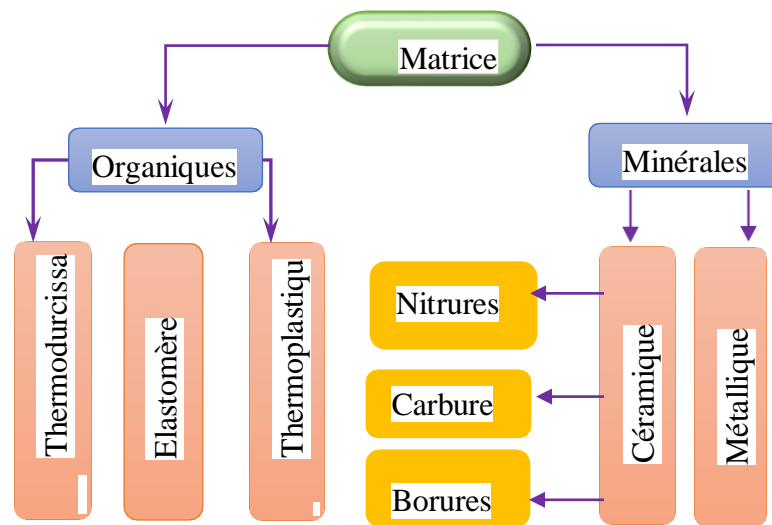


Figure I-2: Différents types de matrices organiques et minérales.

Il existe plusieurs types de résines classées en deux grandes familles : les thermoplastiques et les thermodurcissables pouvant servir de matrice aux matériaux composites.

#### I.4.1.1 Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables sont des polymères qui durcissent irréversiblement à la chaleur, imprégnant facilement les fibres grâce à leur consistance liquide. Les principaux types sont :

**Époxy** : Grande adhérence et résistance mécanique, chimique, électrique et aux intempéries.  
**Polyester** : Faible coût, bonne résistance à l'eau et aux produits chimiques.

**Phénoliques** : Elles sont issues de la polycondensation du phénol et du formol et se caractérisent par une bonne tenue au feu, sans fumée. Elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre.

**Vinylesters** : On peut la considérer comme une variante des polyesters produite à partir d'acides acryliques. Elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeure combustible.

**Polyuréthanes et polyurées** : Dans la fabrication de pièces composites, on utilise surtout des formules élastomériques dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule. Les constituants sont livrés à l'état de prépolymères liquides :

Polyols + polyisocyanates = polyuréthanes ;

Polyéthers + polyamines = polyurées

### I.4.1.2 Résines thermoplastiques

L'utilisation de polymères thermoplastiques renforcés par des fibres courtes (et parfois longues) est en forte croissance. Ces matériaux, de structure linéaire, sont mis en forme par chauffage, ce qui permet aux chaînes de polymères de se plier. Le refroidissement fige ensuite ces chaînes, assurant la rigidité de la pièce. Ce processus de transformation est réversible.

Les résines thermoplastiques employées dans la fabrication de matériaux composites comprennent différents types de polymères :

Les polymères de grande diffusion, comme le polypropylène, sont largement utilisés.

Les polymères techniques, tels que le polycarbonate (PC), le polyéthylène téréphtalate (PET), le polyamide (PA) et le polyoxyméthylène (POM), offrent des caractéristiques techniques spécifiques.

Les polymères à hautes performances, tels que le polyphénylène éther (PPE), le polyamide-imide (PAI) et le polysulfone (PSU), sont souvent assimilés aux matériaux thermostables en raison de leurs propriétés exceptionnelles.

### I.4.2 Renforts

Les renforts dans les matériaux composites jouent un rôle crucial en assurant leurs propriétés mécaniques : résistance à la rupture et la dureté, la rigidité...etc. Il y a un grand nombre de fibres disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Son rôle est d'améliorer la solidité du matériau composite.

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur (la figure I-3).

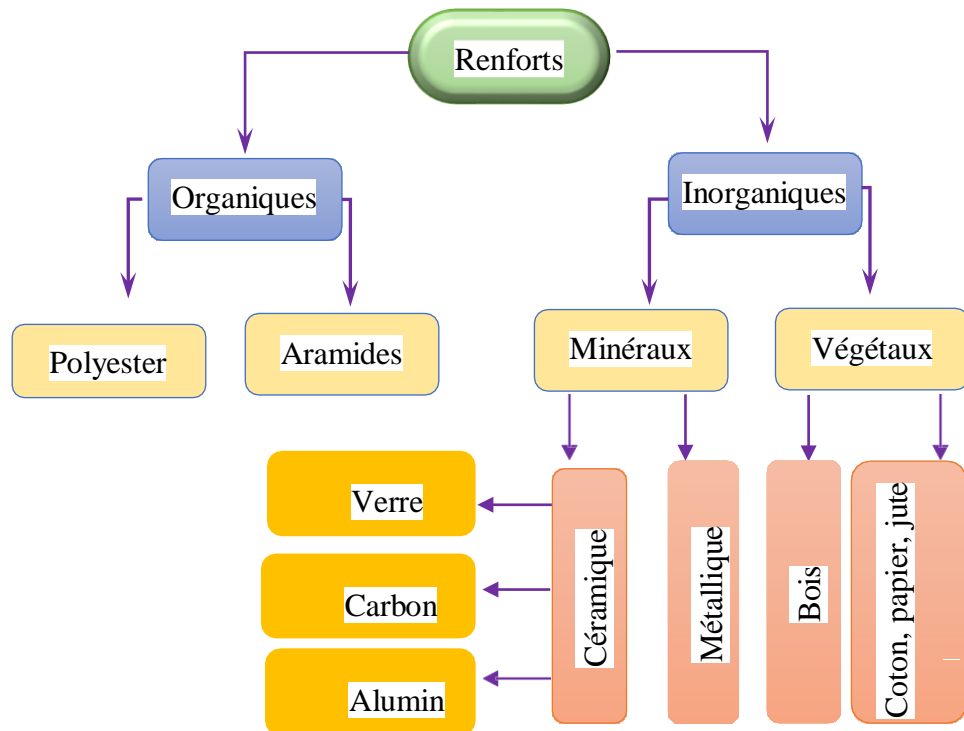


Figure I-3: Différents types de renforts dans les composites.

Il existe plusieurs architectures de renforts pour apporter une bonne résistance adaptée aux contraintes mécaniques (figure I-3)

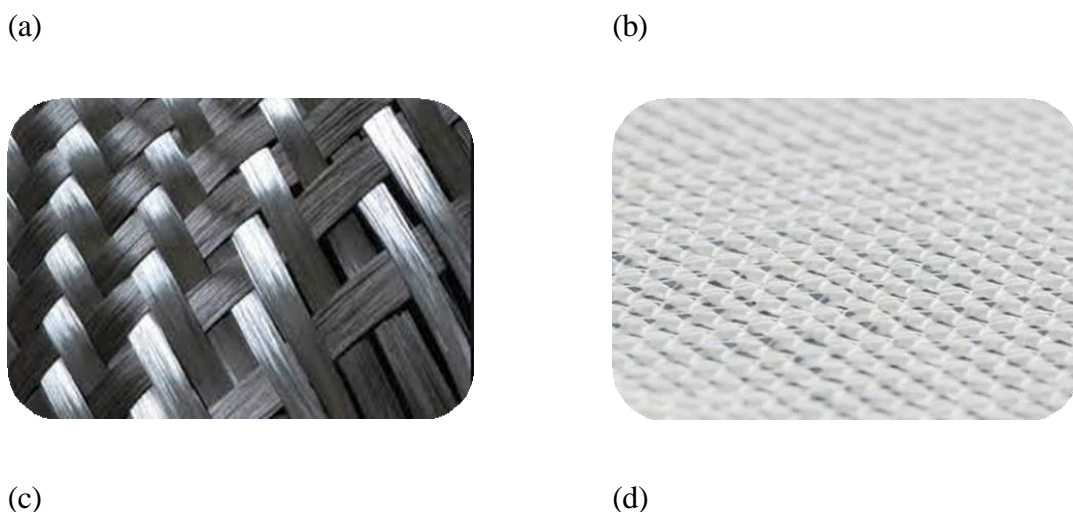
**Les renforts unidirectionnels** : les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand. Ex : fibres de verres

**Les renforts multidirectionnels aléatoire** : les fibres sont coupées et broyées, mats. Ex : mat du verre

**Les renforts tridimensionnels** : sont des fibres orientées suivant trois ou plusieurs directions.

**Les renforts texturés** : sont des tissus ou complexes 2D.





*Figure I-4: Différentes architectures du renfort : (a) unidirectionnelle, (b) multidirectionnelle aléatoire, (c) bidirectionnelle (tissus) et (d) tridimensionnelle.*

➤ Les différents renforts disponibles :

Les principales fibres utilisées sont :

Les fibres de verre ;

Les fibres de carbone ;

Les fibres d'aramides « Kevlar » ;

Les fibres de bore ;

Les fibres de silice (ou de quartz) ;

Les fibres de polyéthylène de haut module.

#### **I.4.2.1 Fibres de verre :**

La fibre de verre est un matériau composite composé de filaments de verre fins renforçant une matrice polymère, souvent une résine thermodurcissable comme le polyester ou l'époxy. Ce matériau se distingue par sa haute résistance mécanique, légèreté, résistance à la corrosion, et bonnes propriétés d'isolation thermique et électrique.

Il existe différents types de fibres de verre adaptées à diverses applications : la fibre E pour les composites généraux, la fibre R ou S pour des performances élevées dans les secteurs aéronautique et militaire, et la fibre D pour les circuits imprimés grâce à ses propriétés isolantes.

Les applications de la fibre de verre sont multiples : construction (panneaux, toitures), industrie automobile et aéronautique (pièces légères et résistantes), secteur maritime (coques de

bateaux), équipements sportifs (planches de surf, skis), énergies renouvelables (pales d'éoliennes) et infrastructures industrielles.



*Figure I-5: Fibres de verre E.*

#### **I.4.2.2 Fibres de carbone :**

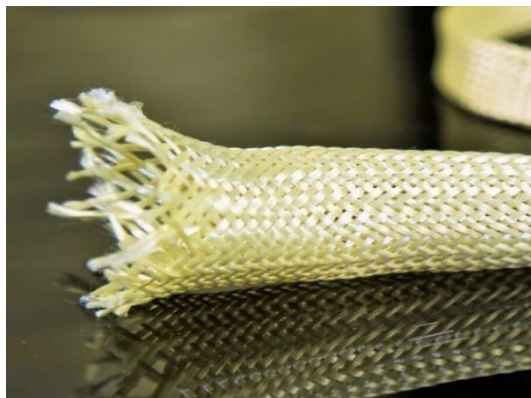
La fibre de carbone est un matériau composite de haute performance, largement utilisé dans des domaines variés en raison de ses propriétés mécaniques exceptionnelles. Elle est constituée principalement d'atomes de carbone alignés dans une structure cristalline, ce qui lui confère une résistance et une rigidité élevées tout en restant incroyablement légère. Deux avantages principaux de ces fibres sont leur fabrication plus adaptée à la production à grande échelle que d'autres fibres hautes performances et leurs de très fortes propriétés mécaniques. Leur prix reste toutefois très cher pour grand public.



*Figure I-6 : Fibres de carbone*

#### **I.4.2.3 Fibres aramide :**

Les fibres aramides telles que le Kevlar et le Nomex sont des fibres synthétiques connues pour leur résistance exceptionnelle à la chaleur, aux produits chimiques et à la traction et possèdent une faible masse volumique. Leurs inconvénients incluent à un mauvais comportement en compression, une usinabilité délicate due à leur résistance au cisaillement, une reprise d'humidité importante, une sensibilité aux rayons ultraviolets et un coût élevé.



*Figure I-7: Fibres aramide.*

#### **I.4.2.4 Fibres céramique :**

Les fibres céramiques sont des matériaux artificiels utilisés principalement pour l'isolation thermique à haute température entre 500°C et 2000°C ; ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes.



*Figure I-8: Fibres céramique.*

### **I.5 L'interphase**

L'interphase dans les composites correspond à la zone de contact (interface) entre la fibre et la matrice, ainsi qu'à une région de volume fini s'étendant dans la matrice. Elle peut être considérée comme un constituant distinct du composite, car elle présente des propriétés chimiques, physiques et mécaniques différentes de celles de la fibre et de la matrice. L'interphase joue un rôle crucial en assurant la liaison entre la fibre et la matrice, permettant ainsi le transfert des contraintes de l'une à l'autre sans déplacement relatif. Cependant, pour simplifier l'analyse micromécanique des composites, il est souvent supposé que l'interphase n'a pas d'épaisseur.

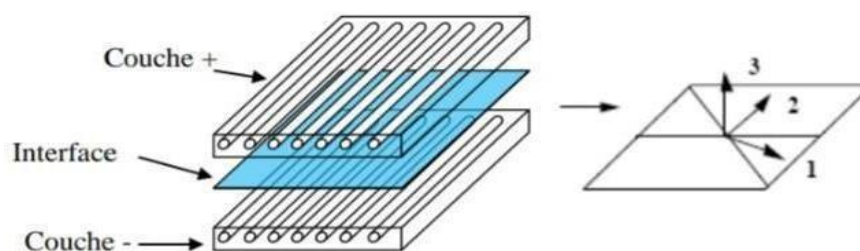


Figure I-9 : Interphase.

## I.6 Fabrication des stratifiés composites

La fabrication des stratifiés composites implique deux principales phases :

Drapage manuel des plis : Superposition précise de couches de matériaux pré-impregnés selon un plan spécifique.

Réticulation en autoclave : Durcissement de la résine dans un environnement contrôlé pour obtenir un composite avec des taux optimaux de fibres et de matrice.

Le but final est d'obtenir un composite constitué d'un taux volumique de fibres ( $V_f$ ) et un taux de matrice ( $V_m$ ).

### I.6.1 Moulage au contact

Le moulage au contact, aussi appelé stratification au contact, est un procédé manuel de mise en forme de plastiques renforcés, réalisé à température ambiante et sans pression. C'est la plus ancienne méthode de mise en œuvre des matériaux composites.

Avant de commencer le moulage, le moule est préparé en appliquant un agent de démoulage, suivi d'une fine couche de résine de surface, souvent colorée, appelée « gel-coat ».

Le processus de moulage (figure I.10) se déroule ensuite selon les étapes suivantes :

- Préparation du moule : Application d'un agent de démoulage et d'une couche de gel-coat coloré.
- Moulage :
  - Enduction du moule avec de la résine catalysée.
  - Pose et superposition des renforts (mat, tissu, etc.).
  - Imprégnation des renforts avec la résine et débullage au rouleau cannelé
  - Ajout de couches supplémentaires et intégration d'inserts (vis, tubes, etc.).
- Démoulage : Réalisé après environ 10 heures, selon la résine et la température.
- Polymérisation : Durée de plusieurs semaines à température ambiante, pouvant être accélérée par étuvage (5 à 10 heures à 80 °C).
- Finition : Ébarbage, ponçage et éventuellement peinture de la pièce.

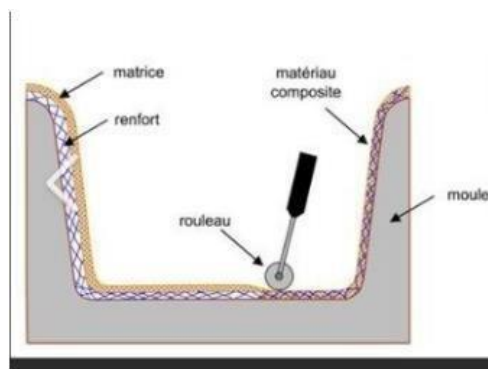


Figure I-10 :Principe du moulage au contact

### I.6.2 Moulage sous vide

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique (figure I.11). Après application d'un gel-coat, on place le renfort sur un moule rigide, puis on ajoute la matrice. Un contre-moule avec une membrane étanche est ensuite assemblé. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, étalant et éliminant les bulles de la résine. Parfois, seule une membrane étanche est utilisée comme contre-moule.

Ce procédé est adapté à la fabrication de pièces en petites et moyennes séries, offrant de bonnes qualités mécaniques grâce à une proportion uniforme de résine et une diminution des inclusions d'air. Avec un contre-moule rigide, les deux faces de la pièce ont un bel aspect de surface. Cependant, la production est assez lente.

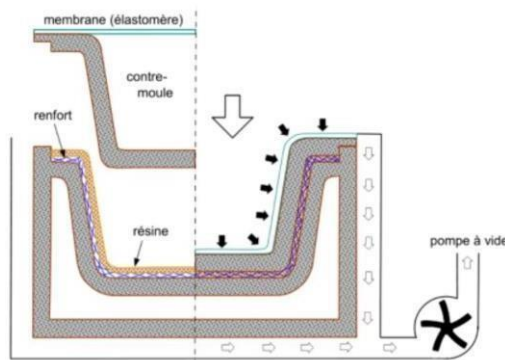


Figure I-11 :Moulage sous vide

### I.6.3 Moulage par projection simultanée :

Le moulage par projection consiste à projeter simultanément des fibres coupées et de la résine catalysée sur un moule à l'aide d'un pistolet spécialisé (figure I.12). La machine à co-stratifier et le pistolet fonctionnent en mode comprimé pour assurer une répartition homogène. Une fois la couche de fibres imprégnées de résine déposée, elle est compactée et débarrassée des bulles d'air à l'aide d'un rouleau cannelé. Ce procédé permet une fabrication rapide et efficace de pièces composites.

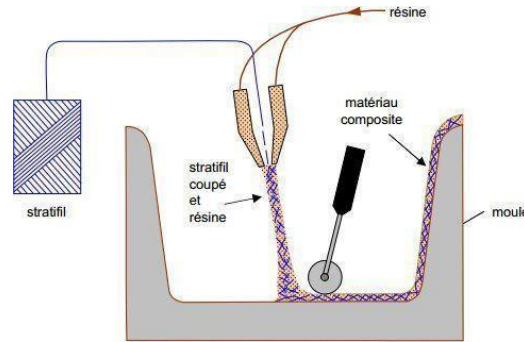


Figure I-12 : Principe du moulage par projection simultanée.

## I.7 Propriétés mécaniques des composites

### I.7.1 Déformation élastique

Contrairement à l'acier, les matériaux composites ne montrent pas une déformation plastique, et leur rupture est fragile. En ce qui concerne le béton, il est généralement inacceptable qu'il subisse une déformation plastique.

### I.7.2 Relation contraintes-déformations

Les propriétés mécaniques des barres de renforcement, peuvent être obtenues à partir des propriétés des constituants, à l'aide de la loi des mélanges, qui considère que chaque constituant contribue selon sa proportion en volume dans le composite. Soit  $V_f$  la fraction volumique des fibres. En première approximation, le module d'élasticité du composite est donné par l'expression suivante :

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$$

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m (1 - V_f), \quad \text{avec } V_f + V_m = 1$$

$$E_c = (E_f - E_m)V_f + E_m$$

Avec :

$E_c$ : module d'élasticité du composite ;

$E_f$ : module d'élasticité des fibres ;

$E_m$ : module d'élasticité de la matrice ;

$V_f$ : fraction volumique des fibres ;

$V_m$  : fraction volumique des matrices.

### I.7.3 Comportement en traction

Les matériaux composites présentent une résistance en traction bien plus élevée et variable que celle de l'acier. Cette résistance dépend de plusieurs facteurs : le type de fibres, leur

configuration, les liants utilisés et les dimensions de l'échantillon. Des essais ont permis de caractériser les barres de renforcement en fonction des fibres utilisées :

**Fibres de carbone :** taux de fibres  $V_f = 47$  à 70% ; résistance en traction : 1100 à 2200MPa ; module d'élasticité : 100 à 150GPa.

**Fibres de verre :** taux de fibres  $V_f = 50$  à 60% ; résistance en traction : 900 à 1100MPa ; module d'élasticité : 45GPa.

**Fibres d'aramide :** taux de fibres  $V_f = 43$  à 70% ; résistance en traction : 1350 à 1650MPa ; module d'élasticité : 60GPa.

#### I.7.4 Comportement en compression et cisaillement

Les matériaux composites sont généralement utilisés comme des renforcements de traction. Les résistances en compression et en cisaillement sont généralement très faibles. On n'utilise donc généralement pas les matériaux composites comme renforcement en compression et en cisaillement.

### I.8 Architectures d'un matériau composite

#### I.8.1 Stratifié

Un stratifié est un matériau composite constitué de plusieurs couches superposées (monocouches), chacune ayant une orientation spécifique par rapport à un référentiel commun. (Figure I.13).

L'arrangement et l'orientation de ces couches permettent d'obtenir des propriétés mécaniques adaptées aux besoins. On distingue plusieurs types de stratifiés :

1. Stratifié équilibré : Contient un nombre égal de couches orientées dans des directions opposées (par exemple, autant de couches à  $+\theta^\circ$  que de couches à  $-\theta^\circ$ ).
2. Stratifié symétrique : Les couches sont disposées symétriquement par rapport à un plan médian (mi-épaisseur), ce qui évite le couplage traction-flexion.
3. Stratifié antisymétrique : Les couches sont disposées de manière asymétrique par rapport au plan moyen, induisant des couplages mécaniques particuliers.
4. Stratifié croisé : Composé d'un nombre égal de couches orientées à  $0^\circ$  et à  $90^\circ$  (par exemple, alternance de couches dans les deux directions orthogonales).
5. Stratifié hybride : Les couches successives sont constituées de différents types de fibres (exemple : mélange de fibres de carbone et de verre), combinant ainsi les propriétés de plusieurs matériaux.

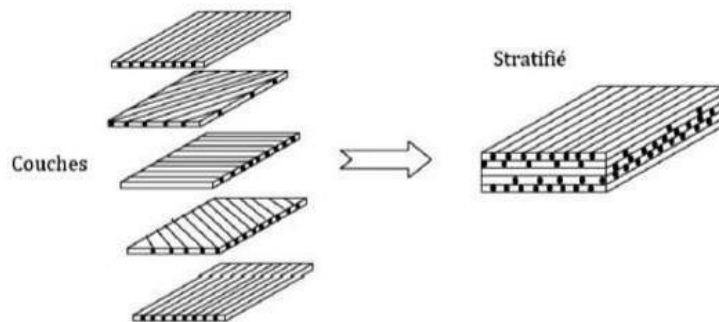


Figure I-13 : Constitution d'un stratifié.

### I.8.2 Composites sandwichs

Un composite sandwich est un matériau léger et rigide composé de trois éléments principaux :

Deux peaux (semelles) :

Matériaux minces et résistants (ex : fibres ou tissus unidirectionnels).

Excellentes caractéristiques en traction.

Une âme (cœur) :

Matériau épais et léger (ex : mousse, nid d'abeille).

Bonne résistance en compression et faible densité.

Les figures ci-dessus montrent quelques types de structures stratifiées usuelles à base fibres ou tissus unidirectionnels et leurs codes de désignation ainsi que la structure d'un sandwich.

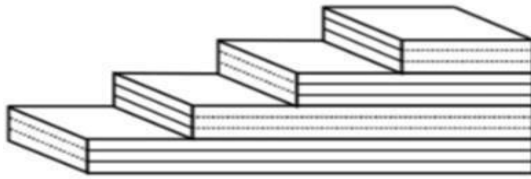


Figure I-14 :Stratifié croisé : (02 /902) S  
unidirectionnel :(0)8

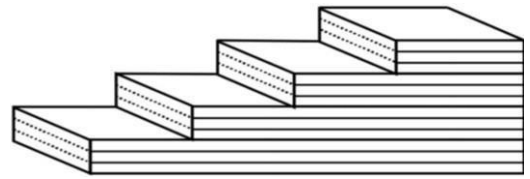
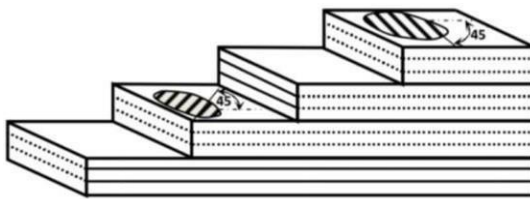


Figure I-15 :Stratifié.



FigureI-16:Stratifiéquasi-isotrope :  
(02/452/902/-452)

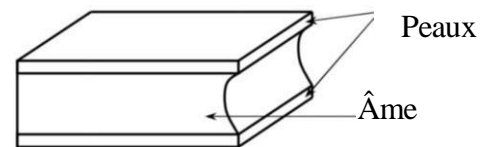


Figure I-17 :Stratifié sandwich.

## I.9 Conclusion

L'industrie des composites vise à détrôner les métaux en offrant des performances supérieures. Grâce à la grande variété de matériaux composites et à leur capacité d'être personnalisés pour répondre à des besoins précis, cet objectif est réaliste et est poursuivi activement par l'innovation.

Dans le prochain chapitre, nous aborderons les divers types de maintenance et la modélisation par éléments finis de poutres.

**Chapitre II. Maintenance et modélisation des  
poutres stratifiées.**

## II.1 Introduction

Avant et après la mise en service d'une structure, il est courant de procéder à une vérification de son intégrité. Le contrôle non destructif (CND) s'impose comme la méthode la plus répandue, en raison de son caractère non invasif qui permet de préserver la structure intacte. Par ailleurs, l'objectif du CND a évolué : il ne s'agit plus uniquement de détecter un défaut, mais également de le caractériser et de le dimensionner avec précision. Le domaine tend ainsi à se rapprocher de celui de l'instrumentation, en intégrant des techniques capables de révéler des hétérogénéités physiques complexes ou des irrégularités dans les propriétés des matériaux.

## II.2 La maintenance

Avec le développement de l'industrie, les solutions de maintenir le bon fonctionnement des équipements mécanique sont aussi devenues indispensables, car le rendement de ces derniers est passé par leur bon maintien durant l'exploitation. La maintenance vise à maintenir ou à rétablir un bien dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé [8]. Il existe plusieurs types de maintenance, comme nous indique La figure (II.1), la maintenance corrective et la maintenance préventive. La maintenance préventive conditionnelle est basée sur les tests et les contrôles des équipements comme CND. On a aussi la maintenance à échelle majeure (maintenance d'amélioration et les travaux neufs).

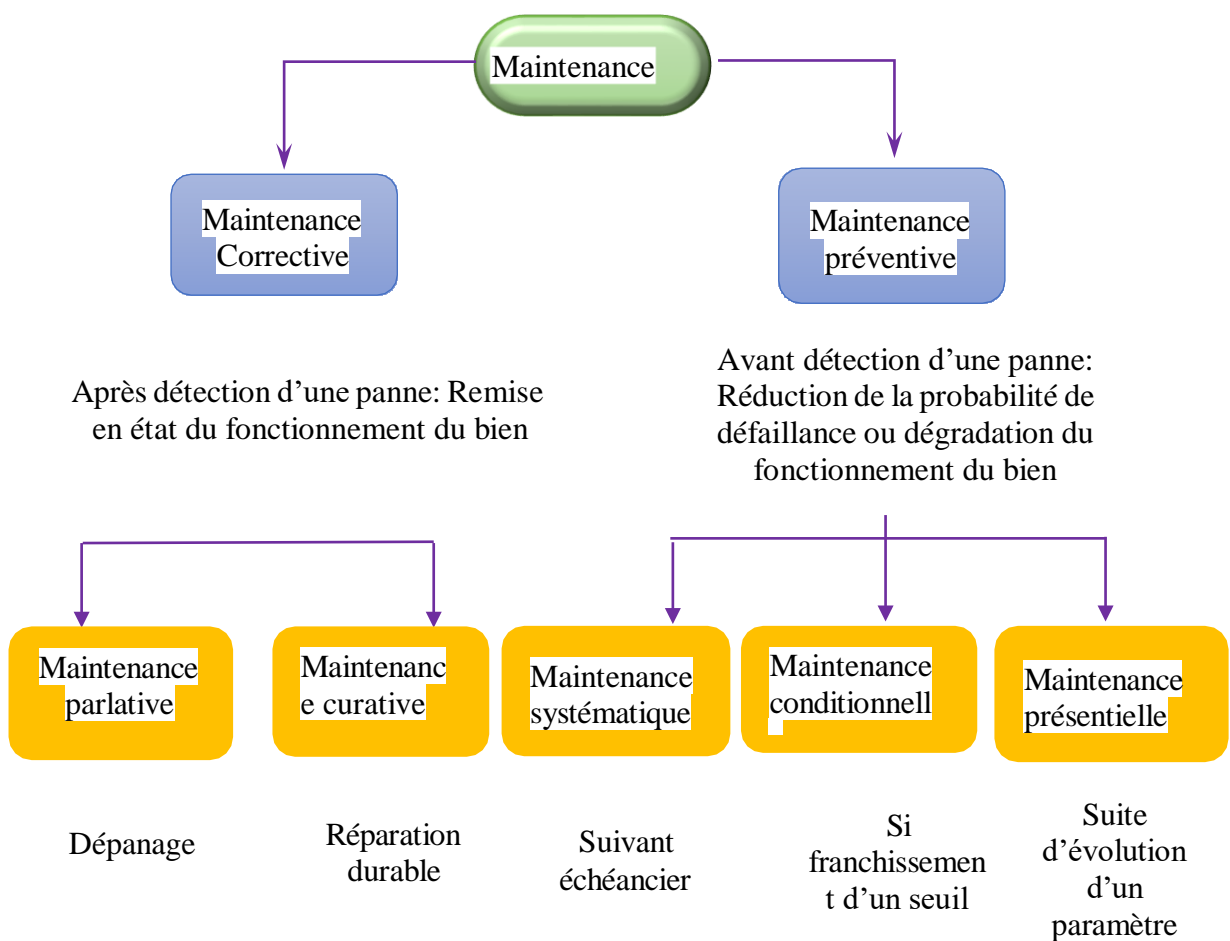


Figure II-1 : Les différents types de maintenance.

### II.2.1 Définition de maintenance par la norme NF X60-010

La maintenance regroupe l'ensemble des actions visant à maintenir ou à remettre un équipement dans un état défini, afin qu'il puisse assurer sa fonction attendue dans des conditions de sécurité et de fiabilité données. [1]

### II.3 Méthodes de maintenance

Le choix des méthodes de maintenance s'inscrit dans la stratégie globale de maintenance et doit être validé par la direction de l'entreprise. Pour effectuer ce choix, il est essentiel de connaître les objectifs fixés par la direction, les orientations stratégiques en matière de maintenance, ainsi que le fonctionnement, les caractéristiques et le comportement des équipements en service. Il faut également prendre en compte les conditions d'application de chaque méthode, les coûts associés à la maintenance, ainsi que les pertes économiques liées aux arrêts de production.

#### II.3.1 Maintenance corrective

La maintenance corrective regroupe toutes les interventions réalisées après qu'un bien a subi une défaillance ou une altération de ses performances, afin de lui permettre de remplir à nouveau sa fonction, même de manière temporaire. Ces interventions incluent la détection de la panne, son diagnostic, ainsi que la remise en état de fonctionnement, avec ou sans modification de l'équipement.

La maintenance corrective se divise en deux types :

##### 1. Maintenance palliative

Aussi appelée dépannage, elle consiste en des actions temporaires destinées à permettre à un équipement de continuer à assurer, provisoirement, tout ou partie de sa fonction. Ces interventions, de nature transitoire, doivent être suivies d'une réparation complète pour rétablir l'état normal du bien.

##### 2. Maintenance curative

Elle regroupe les actions correctives visant à restaurer un équipement dans son état initial ou à lui permettre de retrouver sa pleine fonctionnalité de manière durable. Ces interventions incluent des réparations ou des modifications destinées à éliminer définitivement la défaillance.

#### II.3.2 Maintenance préventive:

La maintenance préventive regroupe les actions menées sur un équipement avant l'apparition d'une défaillance, dans le but de prévenir les pannes et de garantir le bon fonctionnement du matériel.

Elle se divise en trois catégories principales :

### II.3.2.1 Maintenance préventive systématique

Il s'agit d'interventions planifiées de manière régulière, soit en fonction d'un calendrier prédéfini, soit selon une fréquence liée à l'usage de l'équipement (ex. : nombre d'heures de fonctionnement, cycles, etc.).

Avantages :

- Réduction des coûts de maintenance jusqu'à 30 % par rapport à la maintenance curative.
- Meilleure planification des interventions et gestion optimisée des ressources humaines et matérielles.
- Maîtrise des stocks de pièces de rechange grâce à une gestion anticipée.

Inconvénients :

- Risque d'interventions inutiles, car la maintenance est réalisée indépendamment de l'état réel de l'équipement.
- Remplacement prématuré de pièces encore en bon état.
- Possibilité d'introduire de nouveaux défauts lors du remontage si les procédures ne sont pas correctement suivies ou mal maîtrisées.

### II.3.3 Maintenance préventive conditionnelle

Elle repose sur des contrôles et des mesures effectuées en temps réel (capteurs, autodiagnostic, inspections visuelles, etc.), permettant d'évaluer l'état de dégradation de l'équipement. Les interventions sont déclenchées uniquement lorsque certains seuils critiques sont atteints.

### II.3.4 Maintenance préventive prévisionnelle

Cette approche s'appuie sur l'analyse continue de l'évolution de paramètres représentatifs de l'usure ou du vieillissement du bien. Elle permet d'anticiper les pannes à venir et de planifier les opérations de maintenance au moment le plus opportun, prolongeant ainsi la durée de vie des équipements tout en optimisant les coûts.

## II.4 Méthodes de contrôle non destructif

Les techniques de contrôle non destructif (CND) les plus utilisés dans l'industrie sont :

- Contrôle visuel ;
- Contrôle par ressuage ;
- Contrôle par radiographie ;
- Contrôle par thermographie et infrarouge ;

- Contrôle par courant de Foucault...

#### **II.4.1 Contrôle visuel**

Ce test consiste à examiner une structure à l'œil ou à l'aide d'une loupe de poche. Cette méthode permet de mettre en évidence les défauts superficiels et les défauts internes en cas de structures transparentes.

#### **II.4.2 Contrôle par ressuage**

Le ressuage est un terme qui désigne l'extraction d'un fluide d'une discontinuité dans laquelle il s'était préalablement accumulé au cours d'une opération d'imprégnation. Le contrôle par ressuage est utilisé pour détecter les défauts qui débouchent à la surface d'une pièce.

#### **II.4.3 Contrôle par radiographie**

La structure interne du matériau est mise en évidence en soumettant la pièce à contrôler au rayonnement X. on est ainsi en mesure d'observer d'éventuels défauts. Cette technique est particulièrement adaptée pour mettre en évidence les défauts placés dans le plan du faisceau de rayons X (fissures, vides...) ce qui la rend moins sensible pour les défauts de délaminage.

#### **II.4.4 Contrôle par thermographie et infrarouge**

La thermographie infrarouge est devenue un des outils de diagnostic incontournables de la maintenance prédictive. En effet, la plupart des défauts se traduisent par un échauffement ou un refroidissement anormal. Seule la Thermographie Infrarouge vous permet d'observer rapidement une scène thermique et de mettre en évidence, sans contact, des différences de températures à la surface de tout type d'objet. Ainsi, en détectant ces anomalies, souvent invisibles à l'œil nu, la thermographie permet des actions correctives avant l'apparition de pannes ou problèmes coûteux.

#### **II.4.5 Contrôle par ultrasons**

Le contrôle par ultrasons est très efficace pour révéler les défauts présentant une grande variation d'impédance acoustique, il sera donc préférable de l'utiliser lorsqu'on cherche à contrôler des délaminages entre les couches d'un stratifié.

#### **II.4.6 Analyse vibratoire**

L'analyse vibratoire est un outil puissant de détection de défauts des machines tournantes, elle permet notamment de détecter les défauts se manifestant dans les roulements. Peut s'agir d'un défaut de cage, de bille, de piste intérieure ou de piste extérieure. Ces différents défauts sont caractérisés par des fréquences de répétition fonction de paramètres connus. Dans le cadre de cet article [4], seule la fréquence du défaut de piste intérieure sera considérée.

## II.5 Potentialités et limites des CND

Tableau II-1. Potentialités et limites des méthodes CNDII-2

Méthode de CND		Examen visuel	Resuage	Ultrasons (attén.transm.)	Ultrasons (attén.réflexion.)	Ultrasons (mesure de vitesse.)	Radiographie	Thermographie
Vide (bulle d'air, manque d'une couche...)	à la surface	S	BS		L	/	M	SM
	en profondeur	AL	FS	BS	L	/	SM	M
Microporosité	près de la surface	FS	FS	BS	BS	SM	SM	AL
	EN PROFONDEUR	L	FS	BS	AL	/	SM	AL
Inclusion	Près de la surface	L	FS	SM	AL	/	M	SM
	En profondeur	FS	FS	SM	BS	/	SM	AL
Contamination		/	/	/	/	/	BS	/
Polymérisation		/	/	L	AL	SM	/	/
Délaminage (parallèle à la surface)	Près de la surface	AL	BS	BS	AL	/	FS	BS
	En profondeur	AL	BS	BS	BS	/	FS	SM
Fissures de matrice (perpendiculaire à la surface)	A la surface	L	BS	SM	AL	/	BS	SM
	Près de la surface	/	BS	SM	SM	/	BS	SM
	En profondeur	/	AL	SM	SM	/	BS	/
Orientation des fibres		L	/	AL	AL	SM	BS	/
Rupture des fibres		/	/	L	AL	/	SM	/
Décollement fibre /matrice		AL	AL	AL	AL	AL	AL	/
Variation du taux de fibres		/	/	L	AL	SM	BS	/
Variation d'épaisseur		M	/	SM	SM	BS	BS	/
Présence d'humidité		/	/	AL	AL	AL	FS	BS
impact		L	/	BS	BS	FS	AL	BS
Manque d'adhésif		AL	BS	BS	BS	/	AL	S
Porosité dans l'adhésif		/	/	BS	BS	/	AL	/
Variation épaisseur d'adhésif		/	/	AL	SM	/	BS	/
Film de protection restant		/	/	BS	BS	/	AL	/
Découlement peau/peau		AL	/	BS	SM	/	SM	BS

BS : Bonne Sensibilité ; SM : Sensibilité Moyenne ; FS : Faible sensibilité ; AL : Application Limitée.

L'organigramme de la méthode un résumé des différentes méthodes utilisées dans la détection d'endommagement en utilisant des données vibratoires.

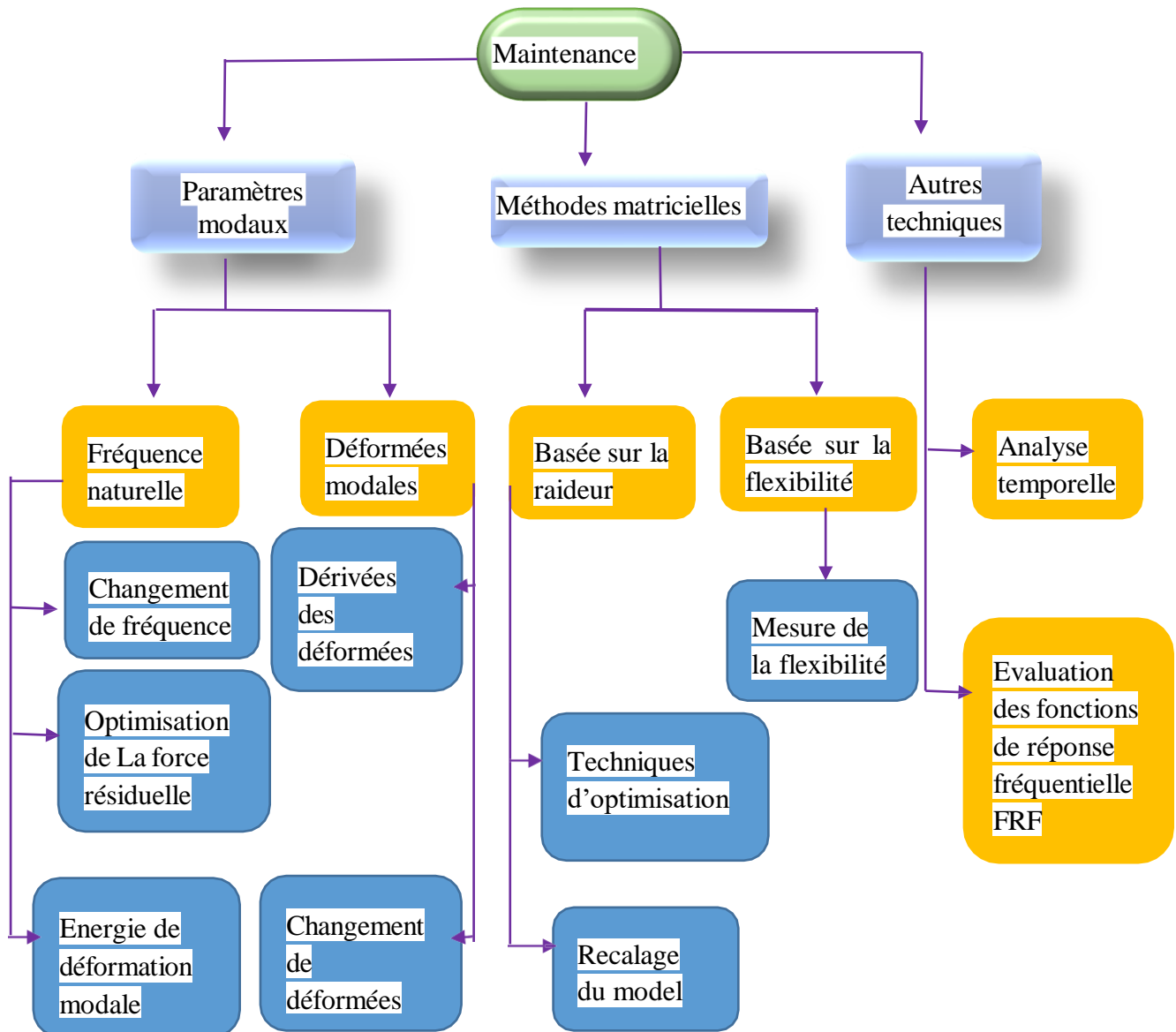


Figure II-2 : Principales méthodes de détection d'endommagement.

## II.6 Modélisation par éléments finis de poutres stratifiées

### II.6.1 Théorie Timoshenko

Il est bien connu qu'en raison de leur rigidité transversale, les composites stratifiés et sandwichs ne peuvent pas être analysés en employant la théorie de Bernoulli-Euler.

Pour analyser ces matériaux, plusieurs approches théoriques ont été développées. Parmi celles-ci, la théorie la plus simple est celle proposée par Timoshenko en 1921, dite théorie des poutres.

Dans cette théorie, le champ de déplacement d'un point quelconque de la poutre est décrit par : Un déplacement longitudinal  $u_1(x)$  suivant l'axe de la poutre  $x$ , un transversal suivant l'axe  $z$   $u_3(x)$  une rotation  $\gamma_x(x)$  caractérisant la flexion autour de l'axe  $y$ . (Figure II.3)

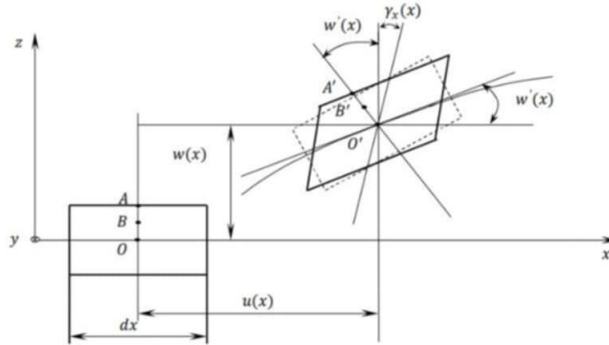


Figure II-3 :Déformation d'une poutre (théorie de Timochenko).

- Les déplacements

$$u_1(x, z) = u(x) + z\gamma_x(x), \quad u_3(x) = w(x) \quad (2.1)$$

Cette approximation peut être appliquée aux poutres homogènes et aux poutres multicouches.

- Les déformations

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Dans notre cas, le champ de déformations est donné par

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u_1}{\partial x} & \epsilon_y &= 0 & \epsilon_z &= 0 \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial u_1}{\partial z} + \frac{\partial u_3}{\partial x} & \gamma_{yz} &= 0 & \gamma_{xy} &= 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

En substituant les relations (2.1) dans (2.2), on obtient les relations suivantes :

$$\begin{cases} \epsilon_{x1} = \epsilon_x + z\kappa_x \\ \gamma_{xz} = 2\gamma_{xy} = 2\epsilon_x = \gamma_x + \frac{\partial w}{\partial x} \end{cases} \quad (2.3)$$

Ici  $\varepsilon_x$  et  $k_x$  sont tensions et courbure.

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \qquad k_x = \frac{\partial \gamma_x}{\partial x} \qquad (2.4)$$

- Energie potentielle de la poutre s'écrit

$$U = \frac{1}{2} \int (\sigma_x \epsilon_x + \gamma_{xz}) dV \qquad (2.5)$$

Remplaçant les expressions (2.3) dans l'équation (2.5) :

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L (N_x \epsilon_x + M_x k_x + 2Q_x \epsilon_{xz}) dx \qquad (2.6)$$

L : est la longueur totale de la poutre.

Les résultantes des efforts sont données par :

$$N_x = \int \sigma_x dS ; \quad M_x = \int \sigma_x z dS \quad ; \quad Q_x = \int \sigma_{xz} dS \qquad (2.7)$$

S : section transversale de la poutre. dS = dzdy.

Substituant dans (2.7) la loi de Hooke en tenant compte des relations (2.3) :

$$N_x = Q_{11} \epsilon_x + B_{11} k_x ; \quad M_x = B_{11} \epsilon_x + D_{11} k_x ; \quad Q_x = 2k Q_{55} \epsilon_{xz} \qquad (2.8)$$

k : facteur de correction de cisaillement.

$Q_{11}, B_{11}, D_{11}$  sont les coefficients de rigidité de la poutre, pour les calculer on utilise les rigidités des couches  $A_{ij}^{(k)}$ .

$$\begin{aligned} Q_{11} &= b \sum_{k=1}^k A_{11}^{(k)} [z_k - z_{k-1}] & Q_{55} &= b \sum_{k=1}^k A_{55}^{(k)} [z_k - z_{k-1}] \\ B_{11} &= \frac{1}{2} b \sum_{k=1}^k A_{11}^{(k)} [(z_k)^2 - (z_{k-1})^2] & D_{11} &= \frac{1}{3} b \sum_{k=1}^k A_{11}^{(k)} [(z_k)^3 - (z_{k-1})^3] \end{aligned} \qquad (2.9)$$

b : largeur de la poutre.

$z_k$  : la coordonnée de la k<sup>ème</sup> couche. (figure II.4)

$$A_{11}^{(k)} = E_x^{(k)} \text{ et } A_{55}^{(k)} = G_{xz}^{(k)} \tag{2.10}$$

$E_x^{(k)}$ : Module de Young de la k<sup>ème</sup> couche dans la direction de l'axe x.

$G_{xz}^{(k)}$  : Module de cisaillement transversal de la k<sup>ème</sup> couche de la poutre.

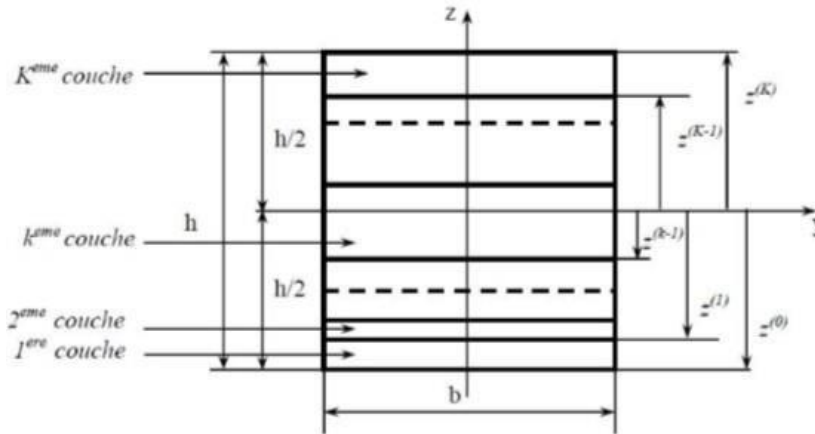


Figure II-4 : Représentation des couches de la poutre.

Remplaçant l'équation (2.8) dans (2.6) en tenant compte des relations (2.3) et (2.4), l'énergie de déformation peut être exprimée comme suit :

$$U = \int_0^L \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2B \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \gamma_x}{\partial x} + D_{11} \left( \frac{\partial \gamma_x}{\partial x} \right)^2 + kQ_{55} \left( \gamma_x + \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right] dx \tag{2.11}$$

Dans le cas la flexion pure (sans effort axial) des poutres stratifiées ( avec un ordre d'empilement des couches symétrique). L'énergie de déformation s'écrit comme suit :

$$U = \int_0^L \left[ \frac{1}{2} \left( D_{11} \left( \frac{\partial \gamma_x}{\partial x} \right)^2 + kQ_{55} \left( \gamma_x + \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right) \right] dx \tag{2.12}$$

K : Facteur de correction de cisaillement.

Pour les besoins de l'identification d'endommagements dans des structures poutres stratifiées en matériaux composites nous définissons les éléments finis dénommés ci-après SI12.

### II.6.2 Élément fini SI8

On étudie la flexion pure d'une poutre réalisée en matériau composite stratifié unidirectionnel, avec une séquence d'empilement symétrique des couches. Chaque nœud de l'élément fini SI8 (Figure II.5) possède deux degrés de liberté, déplacement w normal à la poutre et une rotation autour de l'axe y. Le nombre total de degrés de liberté de l'élément fini SI8 est 8.

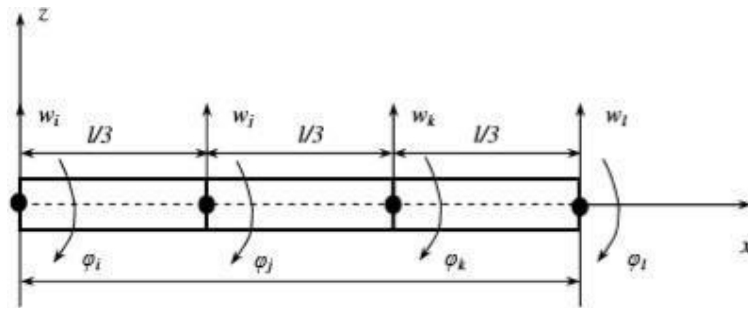


Figure II-5 :Elément fini SI8.

L'énergie de déformation est définie par l'équation(2.12)

$$U = \int_0^L [D_{11} \epsilon_x^2 + kQ_{55} \gamma_{xz}^2] dx \tag{2.13}$$

Les déformations sont définies par les relations (2.3) et (2.4). L'énergie de déformation s'écrit sous forme matricielle suivante :

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L [\epsilon^T D \epsilon] dx \tag{2.14}$$

Les matrices  $\epsilon$  et  $D$  sont définies comme suit :

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & kQ_{55} \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

Les relations contraintes- déplacements sont donnée s sous forme matricielle comme suit :

$$\epsilon = Lu \tag{2.16}$$

Les matrices  $u$  e  $L$  sont données par :

$$U = \begin{bmatrix} w \\ \gamma_x \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial x} & 1 \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

Déplacement nodaux :

Pour l'élément fini SI8 les déplacements nodaux sont  $w_1$  et  $\gamma_x^1$  donc le vecteur déplacement nodal est défini comme suit :

$$\mathbf{v}_i = \begin{bmatrix} w_i \\ \gamma_x \end{bmatrix} \text{ Vecteur déplacements de nœud } i \tag{2.18}$$

$$\mathbf{v}_e^T = \{ \mathbf{v}_i^T, \mathbf{v}_j^T, \mathbf{v}_k^T, \mathbf{v}_l^T \}$$

$\mathbf{v}_e$ : vecteur déplacements nodaux de l'élément fini SI8.

L'approximation des déplacements dans l'élément fini SI8 est donnée par la relation (2.19) :

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}\mathbf{v}_e \tag{2.19}$$

$\mathbf{N}$  : Matrice des fonctions de forme,

$$\mathbf{N} = [N_{il2}, N_{jl2}, N_{kl2}, N_{ll2}, ] \tag{2.20}$$

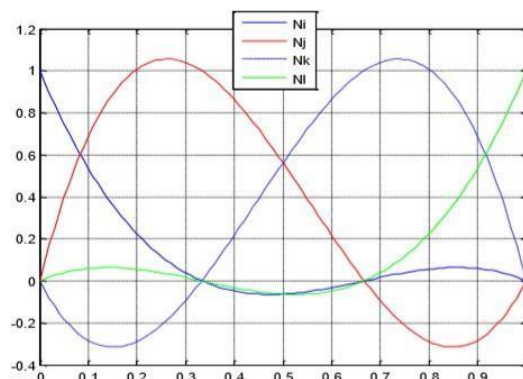
$I_2$  : matrice unité 2x2 :

$$I_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$N_i, N_j, N_k, N_l$  : Fonction d'interpolation qui dépend du type de sous domaine considéré et du nombre de nœuds par sous domaines. Pour assurer la continuité de la flèche  $w$ .

$$\begin{aligned} N_i &= 1 - 11x \frac{x_2}{l} + 9\left(\frac{x_3}{l}\right) - \frac{9}{2}\left(\frac{x_3}{l}\right)^2 & N_j &= 9\frac{x}{l} - \frac{45}{2}\left(\frac{x_2}{l}\right) + \frac{27}{2}\left(\frac{x_3}{l}\right) \\ N_k &= -9x \frac{x_2}{l} + 18\left(\frac{x_3}{l}\right) - \frac{27}{2}\left(\frac{x_3}{l}\right)^2 & N_l &= x \frac{x_2}{l} - \frac{\zeta}{2}\left(\frac{x_3}{l}\right) + \frac{\zeta}{2}\left(\frac{x_3}{l}\right)^2 \end{aligned} \tag{2.21}$$

La figure montre la variation des fonctions de forme en fonction des coordonnées des nœuds  $i, j, k$  et  $l$ .



*Figure II-6 :Fonction de forme de l'élément fini SII2.*

a. Calcul de la matrice de rigidité de l'élément fini SI8

Remplaçant l'expression (2.19) dans (2.16) :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{v}_e \text{avec } \mathbf{B} = \mathbf{L} \mathbf{N} \tag{2.22}$$

Remplaçant la relation (2.21) dans (2.14) énergie de déformation :

$$U_e = \frac{1}{2} \int_0^L \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} dx = \frac{1}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{K} \mathbf{v} \tag{I.23}$$

$K_e$  : est la matrice de rigidité de l'élément fini SI8

$$K_e = \int_0^L \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dx \tag{2.24}$$

b. Calcul de la matrice de masse de l'élément fini SI8

L'énergie cinétique  $T_e$  voir Figure (II.6) est donnée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{1}{2} \int_0^L \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{z_k}^{z_{k+1}} \rho (u_1^2 + u_3^2) dx dy dz \\ &= \frac{1}{2} \int_0^L \int_{z_k}^{z_{k+1}} \rho (u_1^2 + 2zu_1 \gamma_x + z^2 \gamma_x^2) dx dz \\ &= \frac{1}{2} \int_0^L [\rho_0 (u_1^2 + w^2) + 2\rho_1 u_1 \gamma_x + \rho_2 \gamma_x^2] dx \end{aligned} \tag{2.25.a}$$

Les densités massiques généralisées  $\rho_0, \rho_1$  et  $\rho_2$  sont données par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \rho_0 &= b \sum_{k=1}^K \rho_k [z_k - z_{k-1}] \\ \rho_1 &= b \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \rho_k [z_k^2 - z_{k-1}^2] \\ \rho_2 &= b \frac{1}{3} \sum_{k=1}^K \rho_k [z_k^3 - z_{k-1}^3] \end{aligned} \tag{2.26.b}$$

$\rho_k$  : Masse volumique de la  $k^{eme}$  couche .

Dans le cas de l'élément fini SI8, (flexion pure d'une poutre stratifiée avec l'ordre d'empilement symétrique,  $\rho_0=0$  et  $u=0$ ) l'énergie cinétique (formule (2.24)) s'écrit comme suit :

$$T_e = \frac{1}{2} \int_0^L [\rho_0 w'^2 + \rho_2 x^2 u'^2] dx = \frac{1}{2} \int_0^L u' R_0 u' dx \tag{2.26}$$

Le vecteur déplacement  $u$  est défini par la relation (2.17) et la matrice  $R_0$  est défini par la formule suivante :

$$R_0 = \begin{bmatrix} \rho_0 & 0 \\ 0 & \rho_2 \end{bmatrix} \tag{2.27}$$

Substituant l'expression (2.19) dans la relation (2.26) :

$$T_e = \frac{1}{2} v_e^T M_e v_e \tag{2.28}$$

ou  $M_e$  est la matrice de masse de l'élément fini SI.

$M_e$  s'écrit :

$$M_e = \int_0^L N^T R_0 N dx \tag{2.29}$$

c. Matrices de rigidité et de masse globales

Après avoir établi les matrices de rigidité  $K_e$  et de masse  $M_e$  de tous les éléments il est nécessaire de les assembler afin d'obtenir les matrices de rigidité  $K$  et de masse  $M$  de toute la poutre.

➤ Principe de l'assemblage :

- **Noeuds communs** : Si un nœud est partagé entre deux éléments adjacents, les forces appliquées à ce nœud sont la somme des forces provenant de chaque élément.
- **Compatibilité des déplacements** : Les déplacements du nœud global doivent être cohérents avec ceux des nœuds locaux des éléments qui le composent.

II.7 L'élément fini SI12 :

a. Introduction :

Nous étudions ici la flexion d'une poutre composite stratifiée unidirectionnelle, dont l'empilement des couches présente une symétrie. L'élément fini SI12, utilisé pour modéliser ce problème, est caractérisé par trois degrés de liberté par nœud, comme illustré dans la figure (2.21)

b. calcul de la matrice de forme pour l'élément fini SI12

La procédure de base, dans la méthode des éléments finis, est d'exprimer les coordonnées de l'élément sous forme d'interpolation en termes de coordonnées nodales.

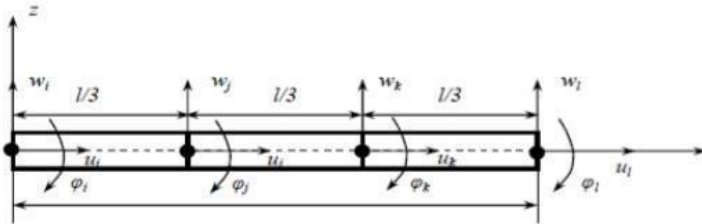


Figure II-7 :Elément fini SI12.

Dans ce modèle, les déplacements dans chaque couche sont représentés par l'expression du déplacement d'une seule couche. Ainsi, les rotations ) sont différentes dans chaque couche.

L'énergie de déformation de l'élément fini SI12 est exprimée sous la forme suivante :

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L [Q_{11} (\epsilon_x)^2 + D_{11} (k_x)^2 + kQ_{55} (\gamma_{xz})^2] dx = \frac{1}{2} \int_0^L \epsilon^T D \epsilon dx \quad (2.30)$$

$\gamma_{xz}$ : sont donnés par la relation (2.4)

$\epsilon_x$  et  $k_x$  : est donnée par la relation (2.3)

Les matrices  $\epsilon$  et  $D$  sont définis comme suit :

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ k_x \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} Q_{55} & 0 & 0 \\ 0 & D_{11} & 0 \\ 0 & 0 & kQ_{55} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Dans la relation ( I.16) les matrices  $u$  et  $L$  sont données par :

$$u_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 1 \end{bmatrix} \quad (I.32)$$

Les déplacements nodaux de l'élément fini SI12  $v_i$  sont définis par le vecteur suivant :

$$v_i = \begin{bmatrix} u_i \\ w_i \\ \gamma_x^i \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$v_i$ : vecteur déplacements de nœud  $i$ .

Les fonctions de formes  $N_i, N_j, N_k, N_l$  sont identiques pour l'élément fini SI8 formule 2.21 La matrice de rigidité élémentaire  $K_e$  de l'élément fini SI12 est définie par la relation 2.24 avec :

La matrice des fonctions de formes pour cet élément est donnée par :

Tel que  $N$  est la matrice des fonctions de forme.

Avec :

$$N = [N_i I_3, N_j I_3, N_k I_3, N_l I_3] \quad (2.34)$$

$I_3$  : Matrice unité 3x3 :

$$I_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice de masse de  $M_e$  l'élément fini SI12 est donnée par la relation (2.29) là où  $u$  est définie par la relation (2.32).

L'énergie cinétique  $T_e$  de l'élément fini SI12 est :

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{1}{2} \int_0^L [\rho (u'^2 + w'^2) + 2\rho u' \gamma_x' + \rho \gamma_x'^2] dx \\ &= \frac{1}{2} \int_0^L u'^T R u' dx \end{aligned} \quad (2.35)$$

D'où  $R_0$  :

$$R_0 = \begin{bmatrix} \rho_0 & 0 & \rho_1 \\ 0 & \rho_0 & 0 \\ \rho_2 & 0 & \rho_2 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

## **II.8 Conclusion**

Ce chapitre a permis d'examiner les diverses méthodes de contrôle non destructif, en mettant en évidence leurs atouts et leurs limites. Par la suite, l'analyse s'est concentrée sur les techniques de détection d'endommagement basées sur les données vibratoires, qui ont été systématiquement classées par catégorie. Le chapitre suivant sera dédié au développement du modèle aux éléments finis, lequel servira à calculer les paramètres modaux d'une poutre stratifiée, indispensables à l'application des deux méthodes étudiées.

**Chapitre III. Localisation**  
**D'endommagement basé sur les courbures**  
**Modales.**

### III.1 Introduction

Les endommagements structurels représentent un défi majeur en ingénierie, ce qui a motivé des décennies de recherche pour développer des méthodes fiables de détection et d'évaluation. Grâce à l'avancée des technologies numériques et des outils de simulation, la modélisation des dommages est devenue plus accessible, offrant des solutions innovantes pour surveiller l'intégrité des infrastructures. Dans ce contexte, ce chapitre se concentre sur une méthode d'identification d'endommagement basée sur les courbures modales, spécifiquement appliquée aux structures de type poutre. Les fissures ou altérations locales modifient significativement les propriétés dynamiques des structures, notamment leurs fréquences propres, leurs modes de vibration et, surtout, leurs courbures modales. Contrairement aux déformées ou aux pentes modales, les courbures présentent une sensibilité accrue aux défauts localisés. L'indicateur Normalized Curvature Damage Factor (NCDF), qui sera au cœur de cette étude, est particulièrement efficace à cet égard. Cette approche vise à surmonter les limites des méthodes traditionnelles, notamment l'influence du bruit expérimental sur les mesures, en proposant des indicateurs robustes capables de discriminer les véritables dommages des artefacts de mesure. Les résultats attendus permettront une localisation précise des fissures et une quantification fiable de leur sévérité, éléments essentiels pour la maintenance prédictive et la sécurité des structures.

### III.2 Méthode de détection d'endommagement basée sur les courbures modales

L'étude des effets des endommagements sur les déformées modales, leurs pentes et leurs courbures a fait l'objet de nombreuses recherches. Les résultats obtenus mettent en évidence des différences marquées entre ces trois grandeurs : si les déformées modales, les pentes modales et les courbures modales peuvent toutes contribuer à la détection d'endommagement, les courbures modales se révèlent nettement plus sensibles et donc plus efficaces pour cette application. Nous présenterons d'abord les indicateurs d'endommagement basés sur les déformées modales et les pentes modales. Ensuite, nous nous focaliserons sur l'indicateur dérivé des courbures modales, en particulier l'indicateur *NCDF*, qui sera utilisé comme outil principal pour la détection des endommagements dans cette étude.

#### III.2.1 Indicateur d'endommagement de la forme des modes :

Cet indicateur permet de détecter les endommagements en comparant les déformées modales d'une structure saine et d'une structure endommagée. Il repose sur la différence absolue entre les deux formes modales :

$$\Delta \mathbf{v}_i = |\mathbf{v}_i^d - \mathbf{v}_i| \quad (3.1)$$

$\mathbf{v}_i$  : déformée modale de la structure saine au point  $i$ .

$\mathbf{v}_i^d$  : déformée modale de la structure endommagée au même point.

$i$  : indice du nœud ou point de mesure.

Les mesures expérimentales sont souvent affectées par du bruit, ce qui peut fausser les déformées modales et générer des pics artificiels dans leurs pentes et courbures. Ces perturbations peuvent masquer les véritables dommages ou induire de fausses détections. Pour atténuer cet effet, une moyenne des indicateurs sur plusieurs modes est proposée :

$$MS_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta \mathbf{v}_{i,j} \quad (3.2)$$

Avec :

$n$ : Nombre de modes considérés.

### III.2.2 Indicateur d'endommagements de la forme des pentes modales (Mode Shape Slope (MSS) damage index)

La variation de la forme des pentes modales est utilisée par cet algorithme :

$$\Delta \mathbf{v}'_i = |\mathbf{v}'_i{}^d - \mathbf{v}'_i| \quad (3.3)$$

où :

$\mathbf{v}'_i$ : Pente modale de la structure saine au point  $i$ .

$\mathbf{v}'_i{}^d$ : Pente modale de la structure endommagée au même point.

Les pentes modales pour une poutre saine sont obtenues par une approximation centrée aux différences finies :

$$\mathbf{v}'_i = \frac{\mathbf{v}_{i+1} - \mathbf{v}_{i-1}}{2l_e} \quad (3.4)$$

Avec :

$l_e$  : longueur de l'élément fini.

$\mathbf{v}_{i+1}, \mathbf{v}_{i-1}$  : Déformées modales aux nœud adjacents.

La même procédure est suivie pour obtenir la forme des pentes modales pour la poutre endommagée. Donc, pour  $n$  modes, l'indicateur d'endommagements de la forme des pentes modales (Mode Shape Slope (MSS) damage index) est donné comme suit :

$$MSS_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta \mathbf{v}'_{ij}) \quad (3.5)$$

### III.2.3 Indicateurs d'endommagements de la forme des courbures modales (FCM)

#### III.2.3.1 Indicateur d'endommagements DMC (Difference in Mode shape Curvature)

Comme l'indicateur de la forme des modes et celui de la forme des pentes modales sont imprécis sur la détection d'endommagements, il fallait étudier la forme des courbures modales pour trouver un meilleur compromis pour la détection d'endommagement. Effectivement, l'indicateur d'endommagement des courbures modales s'avère plus sensible aux endommagements. La présence d'endommagements dans une poutre produit une réduction de sa rigidité. Cette réduction de rigidité conduit à une augmentation de la grandeur de la courbure telle qu'elle est définie ainsi :

$$\mathbf{v}'' = \frac{d^2 \mathbf{v}}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (3.6)$$

où  $M$  est le moment fléchissant,  $E$  est le module de Young et  $I$  est le moment d'inertie de la section droite de la poutre.

Dans cet algorithme, l'emplacement d'endommagements est évalué par la différence entre la forme des courbures modales de la poutre saine et celle endommagée comme suit :

$$\Delta \mathbf{v}''_i = |\mathbf{v}''_i^d - \mathbf{v}''_i| \quad (3.7)$$

La forme des courbures modales sont calculées à partir de la forme des modes (ou déformées modales) en utilisant l'approximation centrée des différences finies :

$$\mathbf{v}''_i = \frac{(\mathbf{v}_{i+1} - 2\mathbf{v}_i + \mathbf{v}_{i-1}))}{l_e^2} \quad (3.8)$$

où  $i$  désigne le nombre de nœuds et  $l_e$  la longueur de l'élément,  $v$  la forme de mode normalisée.

La différence entre la forme des courbures modales (Difference in Mode shape Curvature (DMC)) de la poutre saine et celle endommagée est donnée comme suit :

$$DMC_{i,j} = |\mathbf{v}''_{ij}^d - \mathbf{v}''_{ij}| \quad (3.9)$$

où  $i$  désigne le nombre de nœuds et  $j$  représente le nombre de modes.

La forme des courbures modales de la poutre fissurée changera de façon remarquable à l'endroit de la fissure. En traçant la différence de la forme des courbures modales (DMC), on trouvera un pic au niveau de l'élément fissuré indiquant l'existence d'une fissure.

### III.2.3.2 Indicateur d'endommagements NCDF (Normalized Curvature Damage Factor) :

$$CDF_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n DMC_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |\mathbf{v}''_{ij}^d - \mathbf{v}''_{ij}| \quad (3.10)$$

où  $n$  est le nombre de modes et  $i$  est le nombre de nœuds.

Cependant, l'efficacité de cet indicateur reste insuffisante. En effet, la contribution des premiers modes de vibration peut être atténuée, car les valeurs du DMC pour les modes supérieurs sont souvent bien plus élevées que celles des modes inférieurs. Pour remédier à ce problème, une modification a été apportée en normalisant l'indicateur CDF de la manière suivante :

$$NCDF = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n NDMC_j \quad (3.11)$$

où NCDF représente le vecteur indicateur normalisé du vecteur CDF (Curvature Damage Factor) pour l'ensemble des nœuds à chaque mode. De même,  $NDMC_j$  désigne l'indicateur DMC normalisé pour tous les nœuds à chaque mode, défini par :

$$NDMC_j = \frac{DMC_j}{\|DMC\|_{ij, 2}} \quad (3.12)$$

où  $DMC_j$  est l'indicateur DMC pour chaque mode et  $\|DMC_{i,j}\|_2$  est la 2- norme  $DMC_{i,j}$ ,  $i$  et  $j$  désignent, respectivement, le nombre de nœuds et le nombre de modes. Grâce à cette modification, les pics trompeurs diminuent doucement et deviennent presque plats.

### III.3 Application et résultats

#### III.3.1 Présentations de la poutre

Dans cette partie, nous avons étudié deux structures poutre (encastree-libre et encastree-encastree) de 1D en matériaux composite stratifiée en  $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$ , le modèle est divisé par 20 éléments de 3 ddl pour chaque nœud, nous utiliserons SI12 ; (Figure (III.1)).

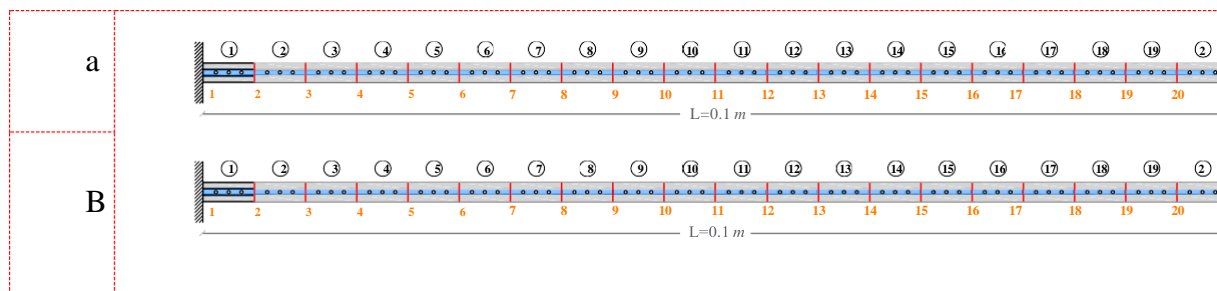


Figure III-1: numérotation des éléments d'une poutre composite stratifiée en  $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$  (a : une poutre encastree-encastree ; b : une poutre encastree-libre).

Les propriétés mécaniques de la poutre sont données sur le tableau suivant :

Paramètres / unité	Valeur
Longueur (L) /m	0.1
Epaisseur (h)/m	0.01
Largeur (b)/m	0.01
Module de Young ( $E_1$ )/GPa	40
Module de Young ( $E_2$ )/GPa	1
Masse volumique ( $\rho$ )/Kg/m <sup>3</sup>	1000
Coefficient de Poisson ( $\nu_{12}$ )	0.25
Module de cisaillement ( $G_{12}$ )/GPa	$0.6E_2$
Module de cisaillement ( $G_{23}$ )/GPa	$0.5E_2$
Module de cisaillement ( $G_{13}$ )/GPa	$0.6E_2$

Tableau III-1. Propriétés mécaniques et géométriques de la poutre composite stratifiée encastree-encastree et poutre encastree-libre en  $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$ .

Afin de valider notre présent travail et Modélisation par éléments finis, nous avons calculer les fréquences propres pour les deux poutres saines, qu'on a ensuite comparées aux fréquences propres saines mesurées expérimentalement dans l'article, tout en mesurant à chaque fois l'erreur en pourcentage (%). La prochaine étape de notre travail consiste a ajouté des endommagements pour chaque poutre, et cela suivant plusieurs scenarios, comme montré dans

le tableau, les fréquences endommagées sont ensuite calculées et comparées à celles des poutres saines de notre présent travail pour prélever l'erreur et tirer une conclusion.

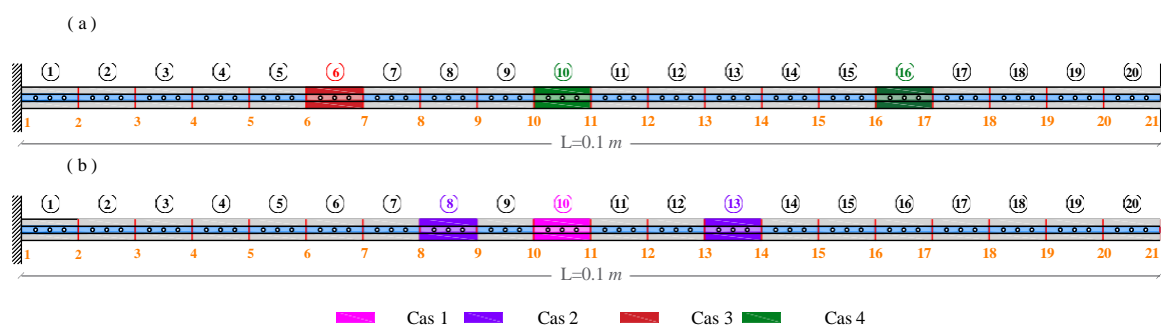


Figure III-2 :(a) Poutre composite stratifiée en  $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$  endommagés encastree-encastree (Cas3 Cas4) ;(b) Poutre composite stratifiée en  $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$  endommagés encastree-libre (Cas1 Cas2).

Tableau III-2. Scénarios d'endommagements de la poutre composite stratifiée en  $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$  encastree-encastree ; poutre encastree-libre.

	Scénario d'endommagement	Élément endommagés (% réduction de rigidité)	
Poutre encastree- libre	Cas1	10 (10 %)	—
	Cas2	8 (10%)	13 (20%)
	Cas3	6 (15 %)	—
Poutre encastree- encastree	Cas4	10 (10 %)	16 (20 %)

### III.3.2 Résultats

L'objectif du présent travail est la détection de l'endommagement, pour notre cas, nous avons utilisé l'indicateur NCDF, les courbes présentées ci-dessous montrent la localisation des endommagements.

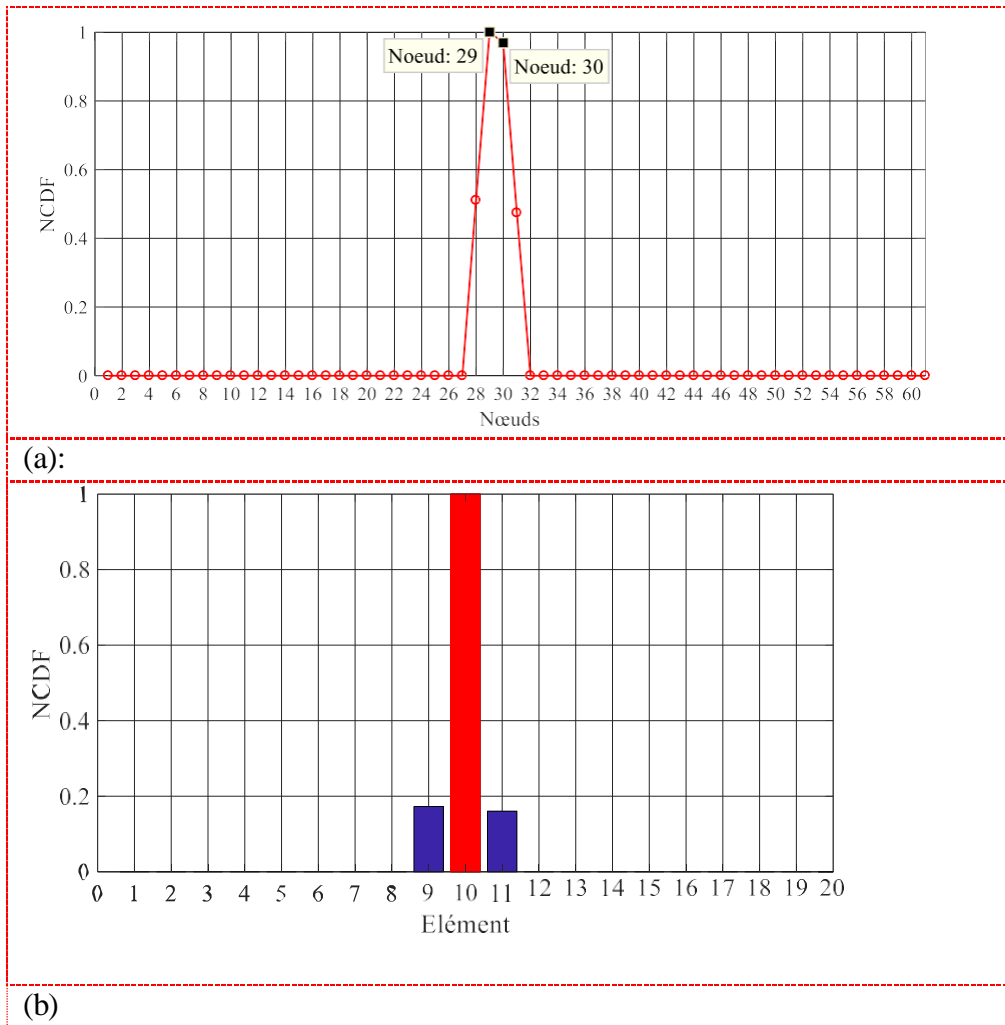
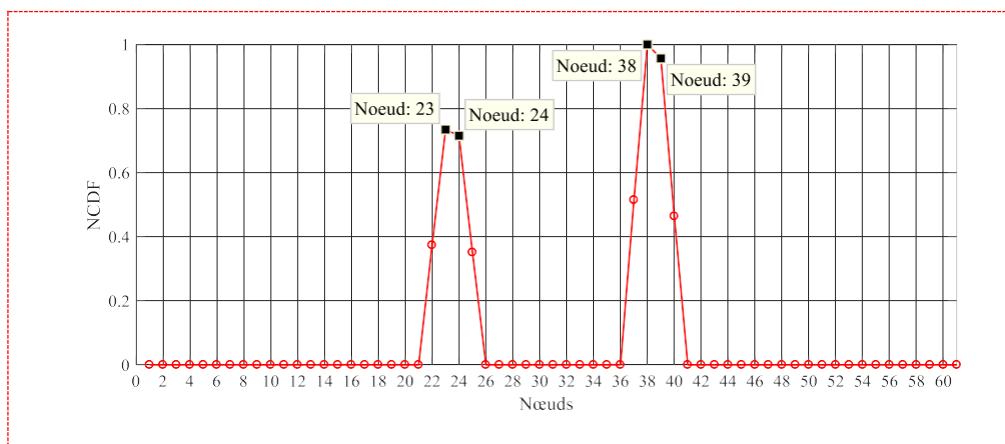


Figure III-3 : (a) Detections d'endommagement ; (b) Localisations et quantifications des éléments endommagés de poutre composite stratifiée encastree\_libre en (0°/90°/0°) Cas 1.



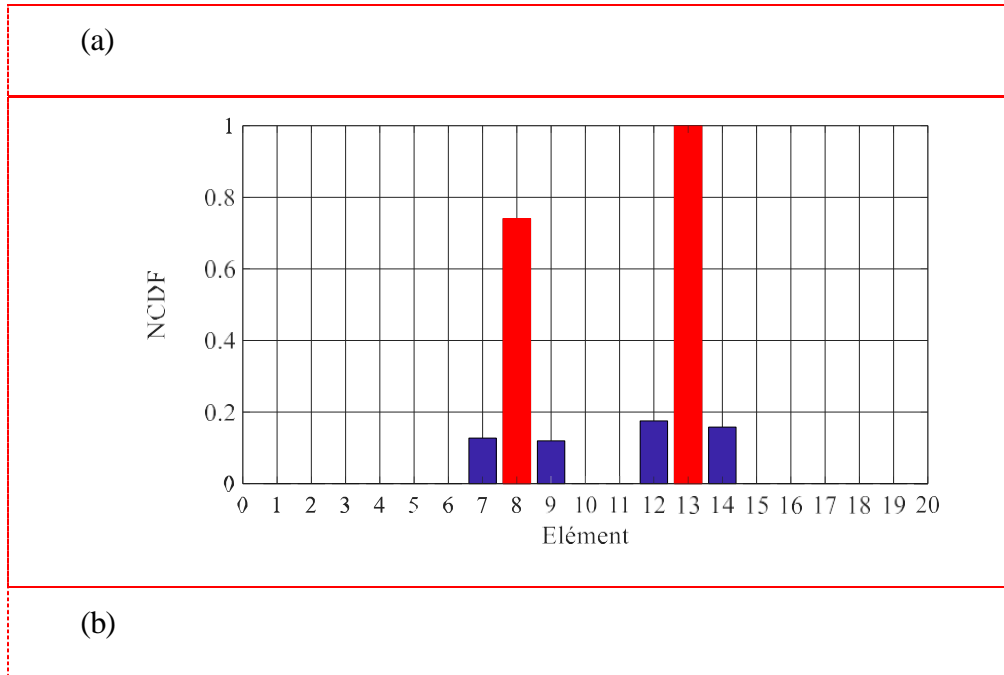


Figure III-4: (a) Détections d'endommagement ; (b) Localisations et quantifications des éléments endommagés de Cas2 en (0°/90° /0°).

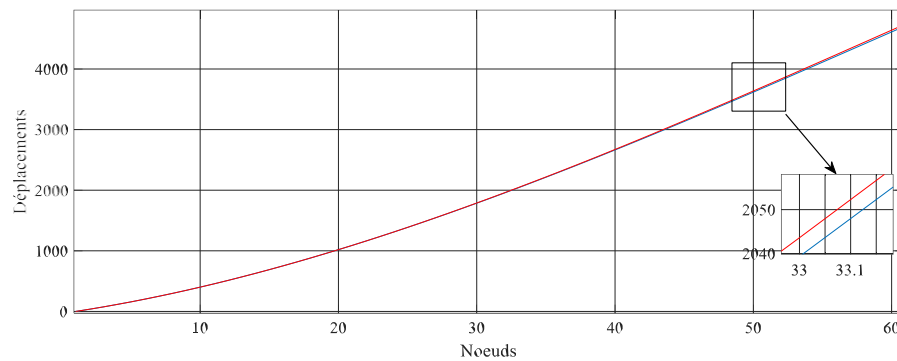


Figure III-5: Déplacements de poutre composite stratifiée encastree libre en (0°/90° /0°).

La figure (III.5) illustre la détection d'endommagement pour une poutre encastree-libre en porte-à-faux transversale (0°/90° /0°) à l'aide de la méthode NCDF (Normalized Cumulative Damage Function) et l'analyse des erreurs associées aux noeuds.

Dans le cas 1, un seul élément est endommagé est l'élément 10 avec un pourcentage (10 %), situé dans une zone de flexion importante. Le cas 2, présenté deux éléments endommagés le 8 et 13 avec un pourcentage 10% et 20% et on observe deux pics distincts sur la courbe NCDF, chacun centré sur les noeuds correspondant aux éléments 8 et 13. Cela traduit la capacité de la méthode à distinguer plusieurs zones endommagées simultanément.

La méthode NCDF permet une localisation précise et fiable des dommages, même à faible taux d'endommagement et dans des zones de flexion importantes. Les pics sur les courbes NCDF et les barres sur les histogrammes confirment la capacité de la méthode à identifier et quantifier les dommages, tout en minimisant les erreurs de localisation. Les résultats illustrés démontrent que la méthode est efficace aussi bien pour un dommage isolé que pour des dommages multiples, avec une bonne sensibilité et une faible probabilité de faux positifs. Ces figures montrent donc la performance de la méthode NCDF pour la détection, la localisation et la quantification de l'endommagement sur une poutre composite encastree-encastree et encastree libre, en s'appuyant sur l'analyse des réponses aux nœuds et aux éléments.

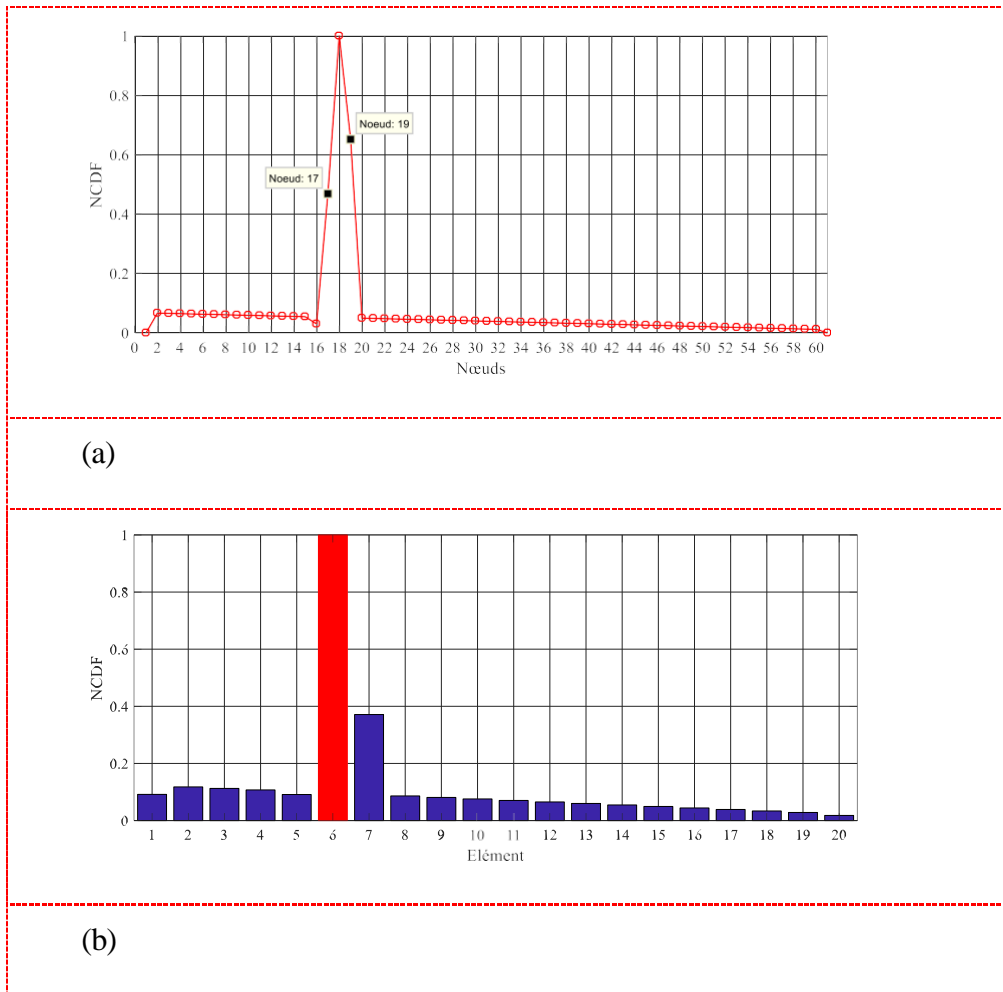


Figure III-6: (a) Detections d'endommagement ; (b) Localisations et quantifications des éléments endommagés de poutre composite stratifiée encastree\_encastree en (0°/90°/0°) Cas 3.

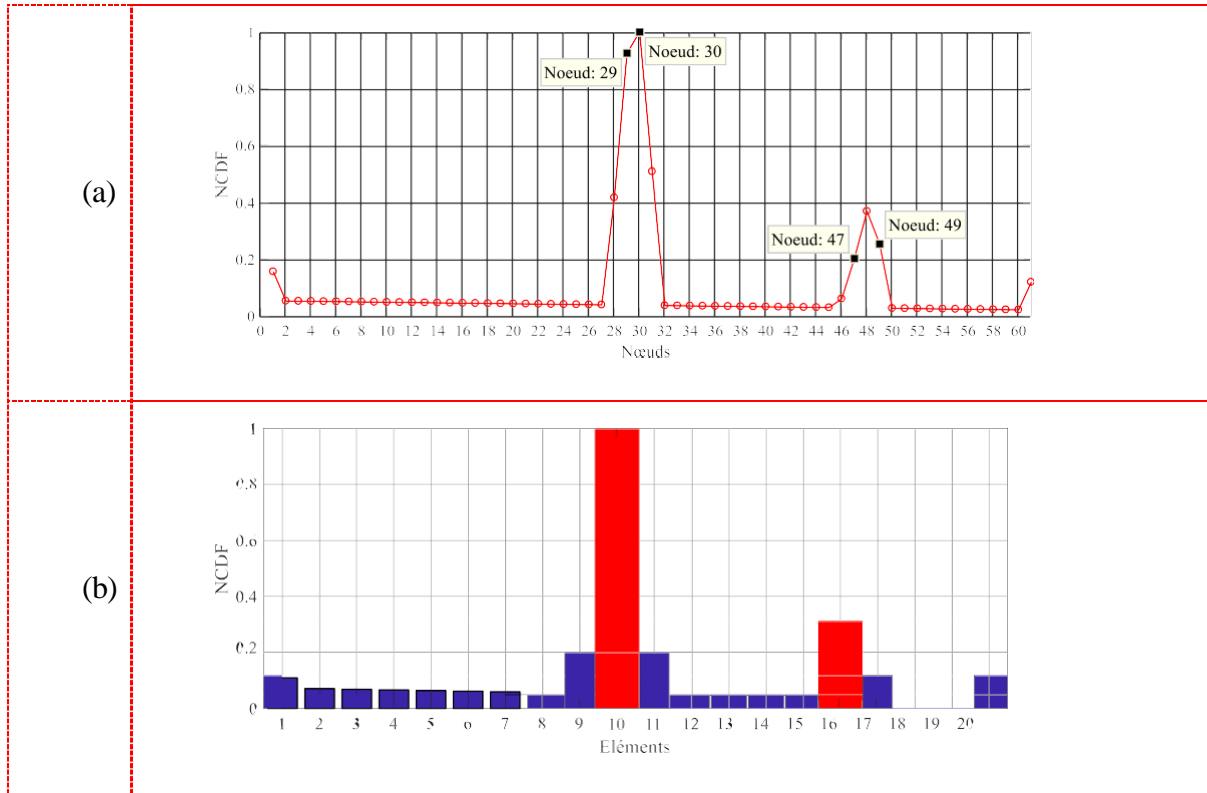


Figure III-7: (a) Détections d'endommagement ; (b) Localisations et quantifications des éléments endommagés de poutre composite stratifiée encastree\_encastree en (0°/90°/0°) Cas 4.

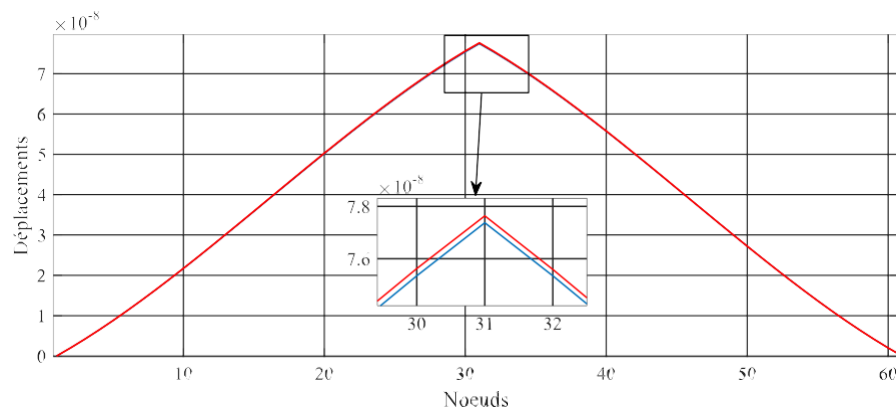


Figure III-8: Déplacements de poutre encastree\_encastree en porte-à-faux transversale (0°/90°/0°).

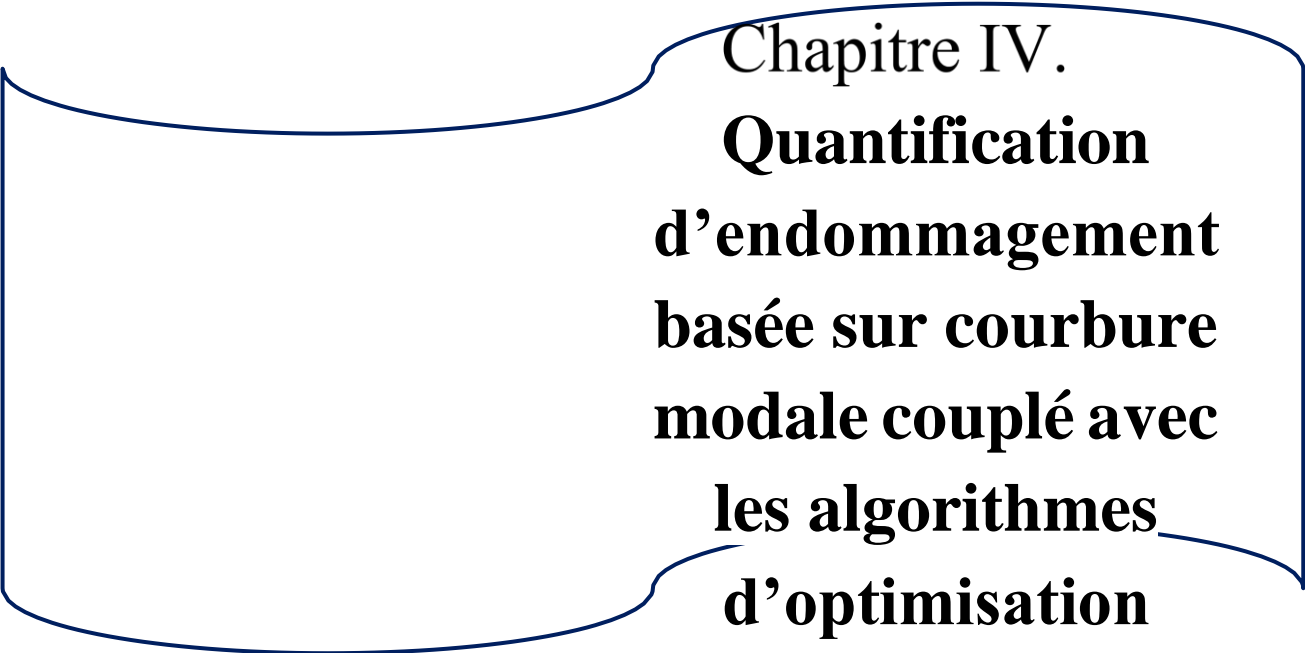
La figure (III.8) illustre un déplacement pour une poutre encastree\_encastree en porte-à-faux transversale (0°/90° /0°) à l'aide de la méthode NCDF (Normalized Cumulative Damage Function) et l'analyse des erreurs associées aux nœuds.

Dans le cas 3, un seul élément est endommagé est l'élément 6 avec un pourcentage (15 %), situé dans une zone de flexion importante. Dans le cas 4, deux éléments sont endommagés :

l'élément 10 (10%) et l'élément 16 (20%). Les pourcentages indiquent le niveau de perte de rigidité ou de section efficace de chaque élément. Les graphiques associés montrent deux pics bien distincts sur le diagramme NCDF, localisant précisément les éléments endommagés. L'élément 16, avec un endommagement plus important (20%), présente un pic plus élevé que l'élément 10 (10%).

#### **III.4 Conclusion :**

La méthode NCDF a permis de détecter efficacement les endommagements à partir des signaux vibratoires, malgré certaines limites liées aux paramètres et à la sensibilité. Pour améliorer ses performances, il est désormais essentiel de passer à une phase d'optimisation, qui sera développée dans le chapitre IV.



**Chapitre IV.**  
**Quantification**  
**d'endommagement**  
**basée sur courbure**  
**modale couplé avec**  
**les algorithmes**  
**d'optimisation**

### IV.1 Introduction

Les méthodes d'optimisation visent à trouver la meilleure solution à un problème en maximisant ou minimisant une fonction objective, souvent sous contraintes. Elles se divisent en deux grandes catégories :

- Optimisation déterministe :

Ces méthodes, comme la programmation linéaire ou non linéaire, reposent sur des calculs précis et des gradients pour converger vers une solution optimale. Elles sont efficaces pour des problèmes bien définis mais peuvent rencontrer des difficultés face à des espaces de recherche complexes ou non différentiables.

- Métaheuristiques:

Inspirées par des phénomènes naturels, sociaux ou culturels (essaims d'oiseaux, théorie des jeux, processus économiques, etc.), ces méthodes sont souvent utilisées pour résoudre des problèmes NP-difficiles ou hautement non linéaires. Elles incluent des algorithmes comme les algorithmes génétiques, l'optimisation par essaims de particules (PSO), ou des approches plus récentes comme l'optimisation basée sur le jeu de fléchettes (DGO) ou l'optimisation de recherche et sauvetage (SAR) ou l'optimisation d'action enzymatique (Backstabbing Optimization Algorithm) (BAO), ou l'optimisation de dynamique de guépard (CDO). Cependant, malgré leur diversité et leur adaptabilité, ces méthodes présentent des défis majeurs tels que la convergence prématurée, la difficulté à s'adapter à des environnements dynamiques, et la sensibilité au réglage des paramètres.

Dans ce chapitre, parmi ces algorithmes, on va présenter seulement BAO et CDO.

### IV.2 Optimisation de la Dérive des Nuages (CDO)

Les nuages sont des formations dynamiques de l'atmosphère, constituées de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace en suspension dans l'air. Ils jouent un rôle fondamental dans la régulation du climat et l'évolution des conditions météorologiques. Leur cycle de vie ainsi que leur déplacement résultent de processus complexes, influencés par une multitude de facteurs atmosphériques. Si les nuages sont souvent étudiés isolément, ils peuvent également former de vastes systèmes couvrant d'importantes étendues géographiques, affectant ainsi le climat à l'échelle continentale.

Le mouvement des nuages se distingue par sa grande capacité d'adaptation aux variations atmosphériques. À leur formation, les nuages émergent lentement, se déplaçant progressivement sous l'effet des conditions météorologiques locales. En grandissant et en se développant, ils deviennent susceptibles d'adopter des trajectoires plus rapides et imprévisibles, sous l'impulsion de vents puissants et de forts gradients de pression. Cette dynamique leur permet de parcourir de longues distances, influençant les conditions climatiques de régions éloignées.

Une caractéristique essentielle du mouvement des nuages est leur aptitude à rechercher activement des conditions atmosphériques favorables à leur développement. Ils ont naturellement tendance à se diriger vers des zones riches en humidité et présentant des gradients de température propices à leur maintien et à leur croissance. Ce comportement de « recherche de cible » est crucial à la survie et à l'évolution des nuages dans un environnement atmosphérique en perpétuelle mutation.

Dans le domaine des algorithmes inspirés de la nature, ce processus de recherche peut être analysé selon deux tendances complémentaires : l'exploration, qui pousse les agents à se déplacer largement pour découvrir de nouvelles régions du paysage de recherche, et l'exploitation, qui consiste à affiner les solutions prometteuses déjà identifiées. Les nuages incarnent de manière naturelle ces deux stratégies grâce à leur mouvement adaptatif et leurs interactions constantes avec leur environnement.

Ainsi, en modélisant mathématiquement ce comportement, il est possible de concevoir un nouvel algorithme bio-inspiré fondé sur les principes de la dérive des nuages. L'algorithme Cloud Drift Optimization (CDO) s'appuie sur cette analogie pour explorer efficacement les espaces de recherche à la recherche de l'optimum global. Les sections suivantes présentent des simulations démontrant la performance de CDO sur diverses fonctions de test ainsi que sur trois problèmes d'optimisation réels. Le code source de l'algorithme est disponible à l'adresse suivante : [Cloud Drift Optimization - MATLAB Central](#).

### IV.2.1 Définition du problème

Soit un problème d'optimisation dont l'objectif est de minimiser (ou maximiser) une fonction donnée  $f(x)$  sur un espace de recherche borné

$\Omega$ , l'objectif est de trouver :

$$\min_{x \in \Omega} f(x) \quad 3.1$$

où :

$\Omega = \{x \in \mathbb{R}^d \mid lb \leq X_i \leq ub\}$  Ici,  $lb$  et  $ub$  désignent respectivement les limites inférieure et supérieure de chaque dimension  $i$  de la variable de décision  $x$ .

### IV.2.2 Initialisation

L'algorithme débute par la génération aléatoire de  $N$  solutions candidates (appelées « nuages ») à l'intérieur de l'espace de recherche. Cette étape garantit une exploration non biaisée de l'ensemble de l'espace :

$$X_i^0 = lb + (ub - lb) \cdot U(0,1), \quad 3.2$$

Pour :  $\forall i = \{1, 2, \dots, N\}$

Où  $U(0,1)$  représente une distribution uniforme dans l'intervalle  $[0,1]$ . Cette stratégie s'inspire de la répartition initiale aléatoire des particules de nuages dans le ciel.

### IV.2.3 Adaptation des poids:

Chaque nuage (ou particule) se voit attribuer un poids dynamique, calculé en fonction de sa valeur de fitness relativement aux autres membres de l'essaim. Ce poids régle l'impact respectif de sa propre position et de celles des autres particules sur son déplacement. La mise à jour de ce poids s'effectue en fonction des performances mesurées par la fonction objectif (fitness).

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 + (0.3 + 0.7 \cdot U(0, 1)) \cdot \log_{10} \left( \frac{f^* - f(X_i)}{S} + 1 \right), & \text{Si } i \leq \frac{N}{2} \\ 1 - (0.3 + 0.7 \cdot U(0, 1)) \cdot \log_{10} \left( \frac{f(X_i) - f^*}{S} + 1 \right), & \text{sinon} \end{cases}$$

$$S = f^* - f^{max} + \varepsilon \quad 3.3$$

où  $f^{max}$  est la pire valeur de fitness observée parmi tous les nuages, et  $\varepsilon$  est une petite constante ajoutée pour éviter toute division par zéro.

Performantes, tout en laissant les particules moins adaptées explorer de nouvelles zones de l'espace de recherche.

### IV.2.4 Mise à jour des positions

La position de chaque nuage est actualisée à chaque itération de l'algorithme. Ce processus repose sur un équilibre entre deux comportements fondamentaux : l'exploitation (recherche locale autour des meilleures solutions) et l'exploration (découverte de nouvelles régions dans l'espace de recherche).

#### IV.2.4.1 Phase d'exploitation – Raffinement local

Dans cette phase, les nuages se dirigent vers la meilleure solution trouvée jusqu'à présent (appelée solution globale optimale ou *global best*). Leur déplacement est influencé par un facteur de perturbation contrôlé, permettant un ajustement précis de leur position :

$$X_i^{t+1} = X_{b(j)} + A \cdot B \cdot v(j) \cdot w(X_i(j) - X_{b(j)}) \quad 3.4$$

où :

- $X_i(j)$  Est la position actuelle du nuage  $i$  dans la dimension  $j$ ,
- $X_{b(j)}$  Est la meilleure position globale connue,
- $A$  et  $B$  sont des coefficients aléatoires ou déterministes,
- $v(j)$  est une variable de perturbation définie par  $v(j) \sim U(-a, a)$
- $a = \tanh(1 - t/T)$  est une fonction décroissante avec le temps,
- $w$  Est le poids dynamique du nuage, ajusté comme en 2.3.

Ce processus imite la manière dont les nuages, une fois organisés, se concentrent autour des zones atmosphériques les plus stables et favorables.

#### **IV.2.4.2 Phase d'exploration – Recherche globale**

Dans cette phase, les nuages effectuent des mouvements plus aléatoires pour explorer de nouvelles régions de l'espace de recherche. Cela favorise la diversité et réduit le risque de stagnation autour d'optima locaux :

$$X_i^{t+1} = v(j).Xi(j) \quad 3.5$$

où:

- $v(j) \sim U(-b, b)$  est un facteur de dispersion,
- $b = 1 - \frac{t}{T}$  ce qui rend le mouvement de plus en plus restreint au fil des itérations.

Cette dynamique reflète la dérive atmosphérique naturelle des nuages, qui peuvent changer soudainement de direction ou de structure en fonction des conditions ambiantes.

#### **IV.2.5 Perturbations aléatoires**

Pour éviter que l'algorithme ne converge prématurément vers des optima locaux, une stratégie de perturbation aléatoire est mise en œuvre. À chaque itération, une fraction des nuages peut être réinitialisée de manière aléatoire dans l'espace de recherche. Cela permet de maintenir la diversité de la population, en particulier dans les dernières phases de l'optimisation.

La réinitialisation d'un nuage se fait selon la formule suivante :

$$X_i(j) = lb + (ub - lb).U(0,1)$$

avec une probabilité  $z$  donnée par :

$$z = 0.002 + 0.003\left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad 3.6$$

où :

- $U(0,1)$  est une variable aléatoire uniforme sur  $[0,1]$ ,
- $lb$  et  $ub$  sont les bornes inférieure et supérieure de la variable  $j$ ,
- $t$  Est l'itération courante, et  $T$  le nombre total d'itérations.

Ce mécanisme reflète les variations imprévisibles de l'atmosphère, qui peuvent provoquer la dispersion ou la reformation de certains nuages. Ainsi, même en fin de processus, l'algorithme reste capable de découvrir de nouvelles zones de l'espace de recherche susceptibles de contenir de meilleures solutions.

### IV.2.6 Convergence vers l'optimum global

L'algorithme CDO continue de faire évoluer les solutions jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint. Deux conditions peuvent déclencher la fin de l'exécution :

La valeur de fitness de la meilleure solution trouvée est inférieure à un seuil prédéfini  $\varepsilon$

Le nombre maximal d'itérations  $T$  est atteint.

Formellement, l'algorithme s'arrête si :

$$f^* \leq \varepsilon \quad \text{ou} \quad t = T \quad 3.7$$

$f^*$  est la meilleure valeur de la fonction objective obtenue jusqu'à l'itération courante  $t$ .

- Bas du formulaire

Dans les phases finales de l'algorithme, la recherche se concentre de plus en plus sur les zones les plus prometteuses, les nuages ayant tendance à se rassembler autour de l'optimum global, tout comme les formations nuageuses finissent par se stabiliser dans des configurations fixes.

Le fonctionnement général de l'algorithme CDO repose sur les étapes suivantes :

1. **Initialisation** : création aléatoire d'une population de solutions (nuages) réparties dans l'espace de recherche.
2. **Ajustement des poids** : évaluation des performances de chaque solution et adaptation des poids selon leur qualité relative.
3. **Stratégie mixte** : combinaison d'une phase d'exploration pour découvrir de nouvelles régions et d'une phase d'exploitation pour affiner les solutions existantes.
4. **Réinitialisation partielle** : introduction de perturbations aléatoires pour échapper aux optima locaux.
5. **Critère d'arrêt** : l'algorithme se termine si l'objectif est atteint ou si le nombre d'itérations maximal est atteint.

Grâce à une modélisation inspirée du comportement atmosphérique des nuages, l'algorithme CDO parvient à naviguer efficacement dans des paysages de recherche complexes. Ses mécanismes dynamiques lui permettent de s'adapter au fil du temps, d'éviter les pièges des optima locaux et de converger avec précision vers des solutions optimales. Une représentation conceptuelle illustrant les interactions entre les nuages et la zone cible est présentée dans la **Figure (VI.1)**.

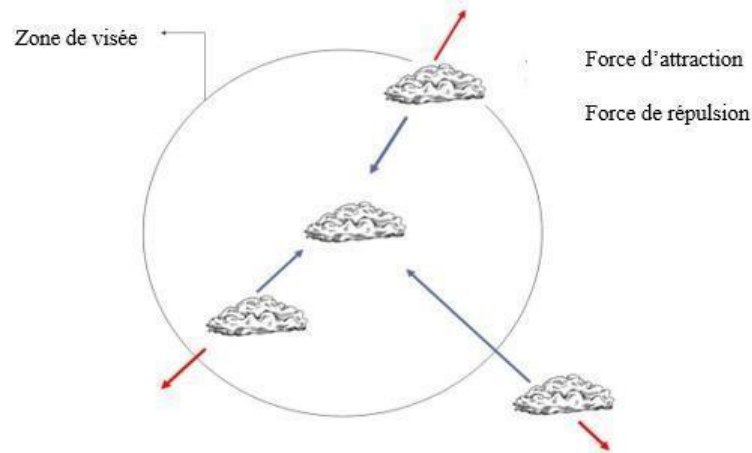
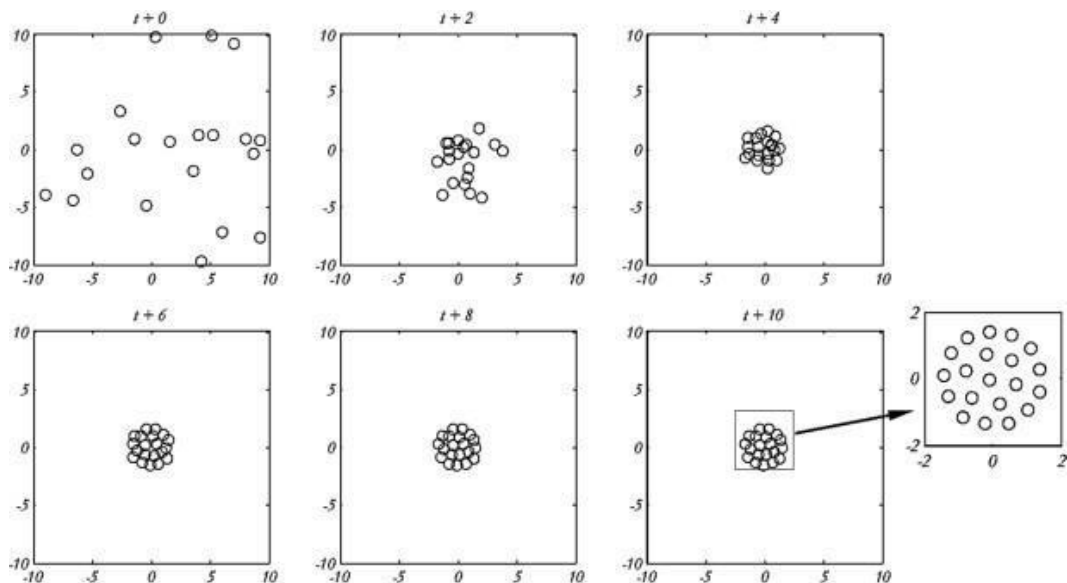


Figure IV-1: Comportements correctifs de base entre les individus dans un essaim de nuages

Figure (IV.1) illustre les interactions fondamentales et les comportements correctifs au sein d'un essaim de nuages dans l'algorithme CDO. Trois forces principales y sont représentées : une force d'attraction pousse les nuages à se rapprocher lorsqu'ils sont à une certaine distance, favorisant la convergence ; une force de répulsion intervient lorsqu'ils deviennent trop proches, les éloignant les uns des autres pour éviter la surpopulation et maintenir la diversité ; enfin, une zone cible symbolise la région optimale que les nuages tentent d'atteindre. L'équilibre dynamique entre attraction et répulsion permet de guider efficacement l'essaim vers cette zone, en combinant exploration (découverte de nouvelles régions) et exploitation (concentration autour des meilleures zones). La Figure 2 met en scène ce comportement dans un espace bidimensionnel, où 20 nuages artificiels évoluent pendant 10 unités de temps en suivant les équations du modèle.



FigureIV-2 : Comportement d'un essaim dans un espace bidimensionnel.

Figure (IV.2) présente le pseudo-code de l'algorithme Cloud Drift Optimization (CDO), qui décrit le déroulement général de l'optimisation basée sur un groupe d'agents collaboratifs. Le processus débute par l'initialisation d'une population de nuages (agents), chacun représentant une

solution candidate. Leur performance est ensuite évaluée à l'aide d'une fonction de fitness, qui mesure la qualité de chaque solution. À chaque itération, les nuages sont analysés pour identifier les meilleurs et pires éléments. En fonction de ces résultats, les agents ajustent leur position dans l'espace de recherche, alternant entre exploration et exploitation. La meilleure solution trouvée est continuellement mise à jour au fil des itérations. L'ensemble du processus se déroule dans une boucle répétitive qui se poursuit jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint (nombre maximal d'itérations ou seuil de performance). Ce mécanisme permet à l'essaim de nuages de converger progressivement vers la solution optimale.

```
1. Initialize the population X(i), for i = 1, 2, ..., N
   Initialize Best_position, Best_fitness = inf
   Initialize weight, AllFitness, and the maximum number of iterations
   Set algorithm parameters (z, Stopping Threshold, Max_iter, lb, ub)
2. Calculate the fitness of each search agent (X(i)):
   For each particle X(i). calculate its fitness using the objective function fobj

3. T= Best search agent (Best_position)
4. While (iteration < Max_iter):
   a. Evaluate fitness for each particle:
      • Ensure each particle X(i) stays within boundaries (lb, ub)
      • Calculate the fitness value AllFitness(i)
   b. Sort the fitness values and calculate weights:
      • Sort AllFitness to find best and worst fitness values
      • Normalize fitness values using weight adjustments
   c. Update positions:
      • For each particle:
      • Normalize the movement probability based on fitness
      • Update position based on the cloud drift mechanism
      • Ensure the particle stays within the boundaries after update
   d. Update the best solution found (Best_position) and its fitness (Best_fitness):
      • If the current fitness is better than Best_fitness, update T (Best_position)
   e. Check for early stopping:
      • If Best_fitness < Stopping Threshold, exit the loop early
   f. Track the convergence:
      • Store the Best_fitness value for each iteration (Convergence_curve)
   g. Update iteration count
5. Return Best_position, Best_fitness, Convergence_curve
```

Figure IV-3 : Pseudo-code de l'algorithme CDO.

Bien que les simulations et les analyses précédentes aient démontré l'efficacité de l'algorithme CDO pour localiser l'optimum global dans un espace de recherche, les sections suivantes approfondissent cette évaluation en testant ses performances sur une série de fonctions mathématiques de référence ainsi que sur quatre problèmes réels complexes issus du monde de l'ingénierie.

### IV.3 Optimisation de L'algorithme BOA (Backstabbing Optimization Algorithm)

L'algorithme BOA (Backstabbing Optimization Algorithm) est une méta-heuristique efficace pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes, notamment dans la détection d'endommagement des structures en poutres composites, largement utilisées dans les domaines aéronautique, automobile et du génie civil pour leur légèreté et leur performance mécanique, mais vulnérables aux défauts internes comme la délamination ou les fissures ; dans ce contexte, BOA peut être appliqué pour ajuster les propriétés locales d'un modèle éléments finis de la poutre afin de faire correspondre les fréquences propres simulées à celles mesurées expérimentalement, permettant ainsi d'identifier la localisation et la sévérité de l'endommagement en minimisant l'erreur entre les réponses dynamiques simulées et expérimentales, à travers un processus d'optimisation non linéaire dans lequel une population de solutions candidates représentant différentes distributions de rigidité est mise à jour à chaque itération selon les principes de loyauté et de trahison caractéristiques de BOA, avec pour objectif l'amélioration de la précision de détection, comme illustré par un exemple MATLAB simplifié où des segments de poutre sont associés à des coefficients de rigidité dont la combinaison optimale est déterminée pour reproduire un comportement vibratoire donné, cette approche pouvant ensuite être étendue par couplage à des modèles éléments finis plus sophistiqués (type Timoshenko ou non linéaires), ou appliquée à des structures plus complexes (plaques, coques), avec pour perspective l'intégration dans des systèmes de monitoring de santé structurelle (SHM) ou des plateformes embarquées assurant une surveillance continue en temps réel.

#### IV.3.1 Définition du problème

La détection d'endommagement dans les structures en poutres composites consiste à identifier la présence, la localisation et la sévérité de défauts internes, tels que des fissures ou des délaminations, qui peuvent affecter les performances mécaniques de la structure. Ces poutres sont largement utilisées dans des domaines exigeants comme l'aéronautique, l'automobile ou le génie civil en raison de leur légèreté et de leur haute résistance. Toutefois, leur nature multicouche rend difficile l'observation directe des dommages, nécessitant l'utilisation de méthodes de détection indirectes basées sur l'analyse des réponses dynamiques (fréquences propres, modes de vibration). Le problème se formule alors comme un problème inverse où l'on cherche à ajuster les paramètres d'un modèle éléments finis de la poutre pour que les résultats simulés concordent avec les mesures expérimentales.

La formulation mathématique de ce problème peut s'exprimer par l'optimisation de la fonction objectif suivante :

Minimiser

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{f_i^{sim}(x) - f_i^{exp}}{f_i^{exp}} \right)^2 \quad 3.8$$

où  $f_i^{sim}(x)$  représente la  $i$ -ème fréquence propre simulée à partir du profil de rigidité  $x$ , et  $f_i^{exp}$  est la fréquence propre mesurée expérimentalement. Le vecteur  $x$  contient les paramètres à

identifier (par exemple, les coefficients de rigidité réduits le long de la poutre). Ce processus, non linéaire et multidimensionnel, est bien adapté à des techniques d'optimisation méta-heuristiques comme l'algorithme BOA, qui exploite des comportements sociaux simulés de loyauté et de trahison pour explorer efficacement l'espace des solutions possibles et identifier les caractéristiques de l'endommagement avec précision.

### IV.3.2 Initialisation

L'étape d'initialisation est cruciale dans l'application de l'algorithme BOA à la détection d'endommagement. Elle consiste à générer une population initiale de solutions candidates, chacune représentant une distribution hypothétique des propriétés mécaniques (par exemple, la rigidité) le long de la poutre composite. Ces propriétés peuvent être codées sous forme de vecteurs de paramètres,  $x=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ , où chaque composante correspond à un segment de la poutre. Les valeurs de ces paramètres sont généralement comprises dans un intervalle défini  $[x_{extmin}, x_{extmax}]$ , correspondant aux extrêmes physiques admissibles (ex. : rigidité intacte et rigidité fortement réduite).

Mathématiquement, on initialise  $P$  individus dans la population selon :

$$x_i^j = x_{extmin} + r. (x_{extmax} - x_{extmin}) \text{ ou } r \sim U(0,1) \quad 3.9$$

Pour  $i = 1, 2, \dots, n$  (dimension du problème), et  $j = 1, 2, \dots, P$  (taille de la population). Cette initialisation aléatoire assure une exploration diversifiée de l'espace de recherche dès le départ. Ensuite, pour chaque individu, la fonction objectif est évaluée afin d'identifier le meilleur agent initial, qui servira de référence pour les itérations suivantes dans l'algorithme BOA.

L'utilisation d'une stratégie d'initialisation équilibrée permet d'éviter un mauvais démarrage pouvant conduire à un piègeage prématuré dans un optimum local, ce qui est fondamental pour la robustesse de l'optimisation dans les cas complexes comme la détection de dommages multiples ou diffus dans les poutres composites.

### IV.3.3 Adaptation des poids

Dans l'algorithme BOA, chaque solution candidate est associée à un poids ou une aptitude représentant la qualité de la solution par rapport à la fonction objectif. L'adaptation des poids est un mécanisme clé qui guide le comportement de la population lors des itérations successives. À chaque génération, le poids d'un individu est mis à jour en fonction de sa performance relative par rapport aux autres membres de la population, ce qui influe directement sur ses chances d'influencer les autres ou d'être « trahi ».

Soit  $f(x^j)$  la valeur de la fonction objective pour l'individu  $j$ , le poids relatif  $w^j$  peut être défini comme :

$$w^j = \frac{1}{1 + f(x^j)} \quad 3.10$$

Cette formulation assure que plus la valeur de la fonction objectif est faible (meilleure solution), plus le poids est élevé. Ces poids servent ensuite à déterminer les probabilités d'interaction entre les agents : les agents avec de meilleurs poids peuvent influencer plus fortement les autres (loyauté), tandis que ceux avec de faibles poids sont plus susceptibles de changer radicalement de direction (trahison).

Une autre stratégie d'adaptation consiste à normaliser les poids dans l'intervalle [0,1] pour renforcer les différences de qualité entre individus :

$$w^j = \frac{f_{max} - f(x^j)}{f_{max} - f_{min}} \quad 3.11$$

où  $f_{max}$  et  $f_{min}$  sont respectivement les pires et meilleures valeurs de la fonction objectif dans la population courante. Cette pondération dynamique est essentielle pour permettre à l'algorithme BOA de s'adapter aux changements dans l'espace de recherche et d'éviter la stagnation dans des optima locaux.

#### IV.3.4 Mise à jour des positions

La mise à jour des positions constitue le coeur dynamique de l'algorithme BOA, traduisant les interactions sociales entre agents sous forme de modifications dans leurs paramètres de solution. Chaque individu de la population décide, à chaque itération, soit de suivre fidèlement un autre agent (loyauté), soit de changer de stratégie de manière radicale (trahison). Cette dynamique est contrôlée par un paramètre de probabilité de trahison  $\tau$ , qui peut être fixe ou décroissant au cours du temps.

La mise à jour de la position de l'individu sur la dimension est alors donnée par :

- Loyauté (influence positive) :

$$x_i^j(t+1) = x_i^j(t) + r \cdot (x_i^{best}(t) - x_i^j(t)) \quad 3.12$$

- Trahison (exploration aléatoire) :

$$x_i^j(t+1) = x_i^j(t) + r \cdot (x_k^j(t) - x_l^j(t)) \quad 3.13$$

où :

- $r \sim U(0, 1)$  Est un nombre aléatoire pour introduire de la variabilité,
- $x_i^{best}(t)$  Est la meilleure solution connue,
- $x_k^j$  et  $x_l^j$  Sont deux individus choisis aléatoirement dans la population.

La décision entre loyauté et trahison est prise en comparant un nombre aléatoire à la probabilité  $\tau$ . Cette mise à jour permet d'assurer un bon équilibre entre exploitation des bonnes solutions (convergence) et exploration de nouvelles régions de l'espace de recherche (diversité).

Cette phase est essentielle pour adapter dynamiquement la position des solutions et éviter de rester piégé dans des optima locaux, notamment dans le cadre de la détection d'endommagement où plusieurs configurations peuvent produire des réponses vibratoires proches.

#### **IV.3.4.1 Phase d'exploitation – Raffinement local**

La phase d'exploitation se concentre sur l'amélioration fine des meilleures solutions identifiées. Elle intervient typiquement lorsque l'algorithme converge vers une région prometteuse de l'espace de recherche. Cette phase consiste à appliquer des perturbations locales réduites autour des meilleures solutions pour explorer leur voisinage immédiat et affiner la convergence.

Mathématiquement, on peut exprimer une mise à jour locale comme :

$$x_i^j(t + 1) = x_i^j(t) + \varepsilon \cdot N(0,1) \quad 3.14$$

où :

- $\varepsilon$  Est un petit coefficient d'amplitude,
- $N(0,1)$  Est une variable aléatoire suivant une distribution normale centrée réduite.

Cette technique de raffinement est inspirée de la recherche locale classique et permet de préciser la position du minimum local autour de la solution la plus prometteuse, améliorant ainsi la précision de la détection d'endommagement dans les structures composites.

#### **IV.3.4.2 Phase d'exploration – Recherche globale**

La phase d'exploration vise à parcourir efficacement l'ensemble de l'espace de recherche afin de découvrir de nouvelles zones prometteuses, en particulier dans les premières itérations ou lorsque la convergence devient stagnante. Cette stratégie repose sur l'application de perturbations larges ou de mouvements aléatoires entre des solutions contrastées pour favoriser la diversification.

Une formulation possible pour simuler ce comportement est :

$$x_i^j(t + 1) = x_i^j(t) + (x_r^j(t) - x_s^j(t) + \varepsilon \cdot N(0,1)) \quad 3.15$$

Où :

- $x_r^j$  et  $x_s^j$  Sont deux agents différents choisis aléatoirement,
- $\varepsilon$  Est un facteur de pas relativement grand,
- $\varepsilon$  Ajoute une variabilité stochastique (comme dans la phase de raffinement).

Cette approche permet de sortir des régions déjà explorées, de maintenir la diversité de la population, et d'éviter le piégeage dans des optima locaux. Elle est cruciale pour assurer une bonne couverture de l'espace de recherche, surtout dans le cadre de problèmes complexes comme la détection d'endommagement dans des structures composites hétérogènes.

### IV.4 Perturbations aléatoires

Les perturbations aléatoires jouent un rôle clé dans l'algorithme BOA en assurant la diversité des solutions et en évitant la convergence prématurée vers des optima locaux. Elles interviennent à différentes étapes de l'algorithme, notamment dans les phases d'exploitation et d'exploration, pour ajouter un comportement stochastique qui permet de mieux explorer l'espace de recherche.

Ces perturbations sont généralement modélisées par des bruits gaussiens ou uniformes appliqués aux vecteurs de position. Une forme générique de perturbation peut être écrite comme :

$$x_i^j = x_i^j + \delta \cdot \varphi \quad 3.14$$

Où :

- $\delta$  Est une amplitude de perturbation adaptative,
- $\varphi$  Est une variable aléatoire (typiquement où).

Dans la détection d'endommagement, ces perturbations permettent de simuler des conditions incertaines ou bruitées, reflétant des mesures réelles, et donc d'améliorer la robustesse du modèle. Leur intensité peut être décroissante au fil des itérations pour favoriser l'exploitation précise une fois les zones prometteuses identifiées. Cela contribue à l'efficacité globale du BOA dans les applications complexes sur structures composites.

#### IV.4.1 Convergence vers l'optimum global

La convergence vers l'optimum global dans l'algorithme BOA repose sur l'équilibre adaptatif entre exploration et exploitation, régulièrement réajusté par les probabilités de trahison et les intensités des perturbations. Au fil des itérations, la population de solutions tend à se concentrer autour des régions les plus prometteuses de l'espace de recherche, où les meilleures performances sont observées.

La convergence est mathématiquement assurée par la diminution progressive des termes stochastiques (par exemple,  $\epsilon$ ,  $\delta$ ), ce qui réduit les fluctuations aléatoires et favorise un raffinement local précis. De plus, l'influence croissante de la meilleure solution connue incite  $x^{best}$  les individus à se rapprocher de celle-ci, ce qui se traduit par :

$$x_i^j(t+1) = x_i^j(t) + r \cdot (x_i^{best}(t) - x_i^j(t)) \quad IV.15$$

Lorsque  $r \rightarrow 0$ , la mise à jour devient minimale, assurant la stabilité des solutions.

Dans le cadre de la détection d'endommagement, cette convergence garantit l'identification précise des paramètres mécaniques ou modaux altérés par des défauts, même en présence de bruit ou d'incertitude. Ainsi, l'algorithme BOA se démontre capable de converger efficacement vers une solution globale optimale, représentant l'état réel d'intégrité de la structure analysée.

### IV.5 Fonction objectif

Les techniques d'optimisation présentées dans la section précédente permettent de déterminer la localisation optimale des endommagements avec une gravité basée sur une fonction objectif (OBF). Le déplacement est introduit dans le nouvel indicateur proposé en tant que fonction objective et intégrée dans CDO et BOA. La fonction objectif, qui est de minimiser la différence entre le  $DMC^{mesuré}$  et le  $DMC^{calculé}$  par les deux algorithmes CDO et BOA, et est donné par :

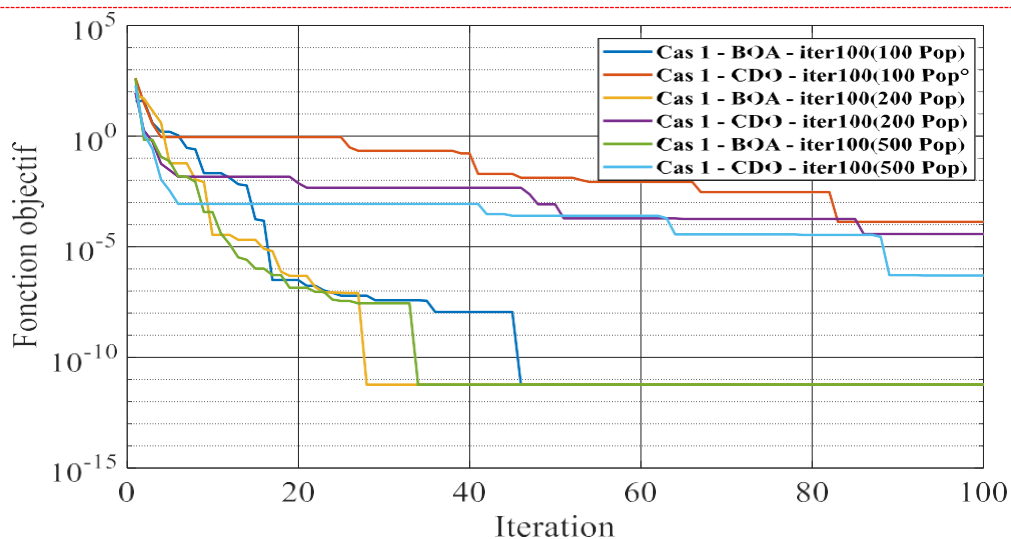
$$Erreur = \|DMC^{mesurer} - DMC^{calculer}\| \quad \text{IV.1}$$

### IV.6 Résultat

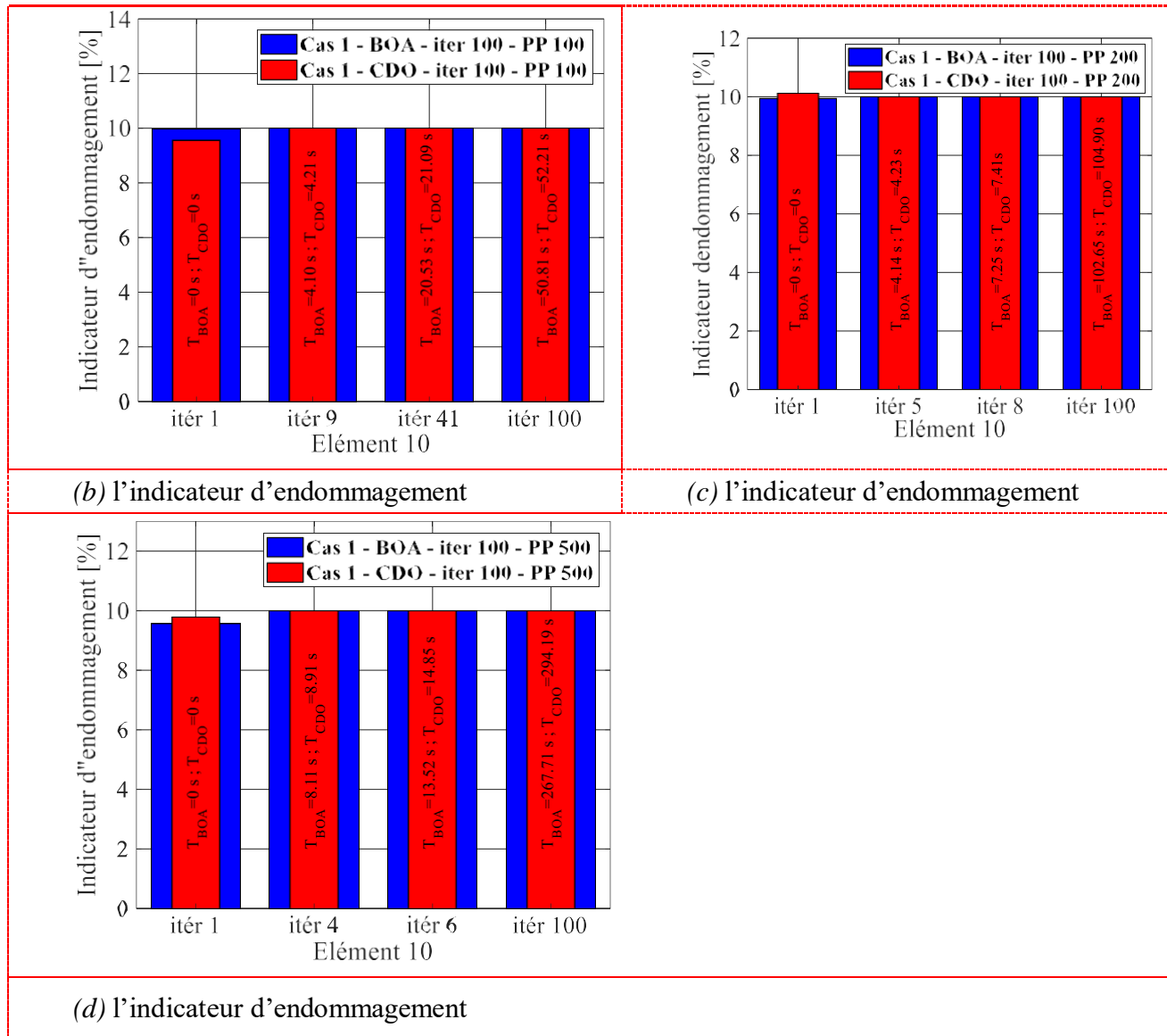
Pour mener une étude comparative, nous nous sommes appuyés sur des indicateurs d'endommagement obtenus antérieurement. Nous avons fixé le nombre d'itérations à 100 et fait varier la taille de la population (100, 200, 500), Ensuite, nous avons d'abord fait varier le nombre d'itérations (100 ,200, 500) en maintenant une population fixe de 50.

#### IV.6.1 Cas 1 est endommagé dans l'élément 10 à 10%

##### IV.6.1.1 Test N°1 itération 100 population [(100); (200); (500)].



(a) Convergence de la fonction objective



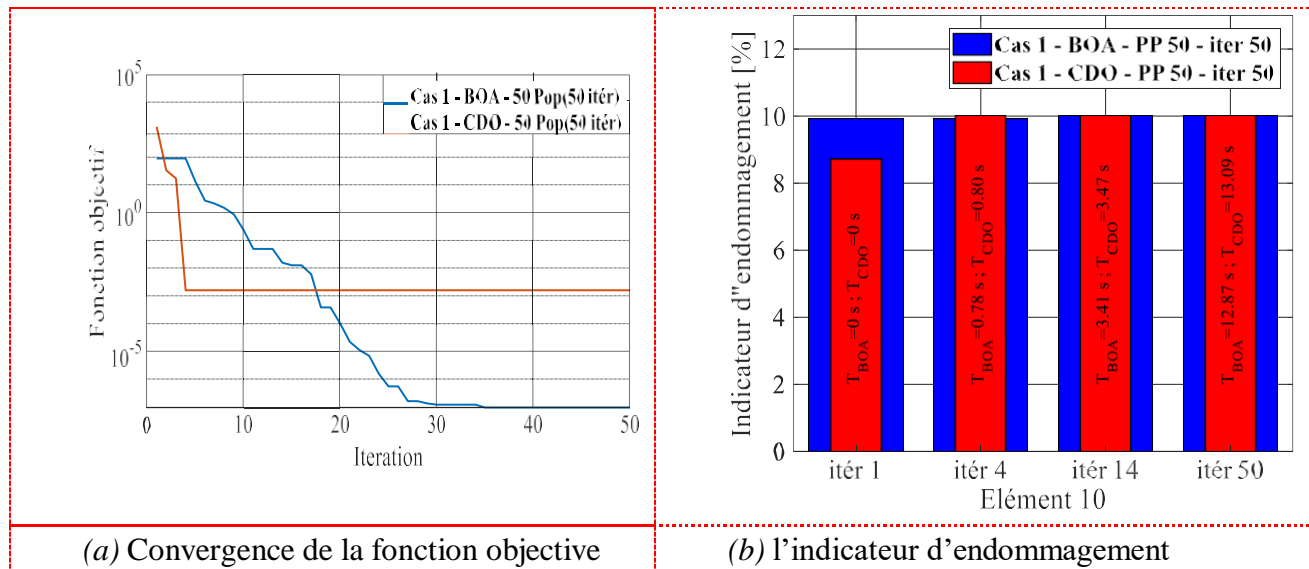
FigureIV-4 : Poutre composite stratifiée encastree-libre en  $(0^{\circ}/90^{\circ} /0^{\circ})$  - cas 1 - 10% d'endommagement dans l'élément 10 - Test N° 1 – 100 itération et variation population.

En premier temps, nous avons fixé le nombre d'itérations à 100 et variant le nombre de populations de 100, 200 et 500. Il est observé que la méthode BOA manifeste un taux d'endommagement de 10% à la 9ème itération et 100 populations pour l'élément 10 en un temps de (4,1061 secondes), correspondant au taux d'endommagement réel. Puis un taux d'endommagement de 10% à la 8ème itération et 200 populations avec un temps de (7,2587secondes), en fin 10% à la 6ème itération et 500 populations en (13,7185 seconde).

Par contre, la méthode de CDO atteint au taux d'endommagement de 10% à la 41ème itération et 100 populations pour l'élément 10 en un temps de (21,0981 secondes), correspondant au taux d'endommagement réel. Puis un taux d'endommagement de 10% à la 5ème itération et 200 populations avec un temps de (4,2384 secondes), en fin 10% à la 4ème itération et 500 populations en (8,9150 seconde).

Dans la figure (IV.4.a), on observe que l'augmentation de la taille de population (de 100 à 200 puis 500) améliore la convergence pour les deux algorithmes. Par exemple, CDO avec Pop=500 atteint une valeur plus basse de la fonction objective que pour Pop=100 ou 200. Pour Pop=500, la courbe BOA descend bien en dessous de toutes les courbes CDO, ce qui signifie que BOA trouve une solution plus précise. De plus, pour Pop=100 et 200, la courbe BOA reste toujours sous la courbe CDO correspondante, montrant une meilleure stabilité et confirmant que BOA converge plus efficacement vers zéro.

**IV.6.1.2 Test N°2 population 50 itération 50**

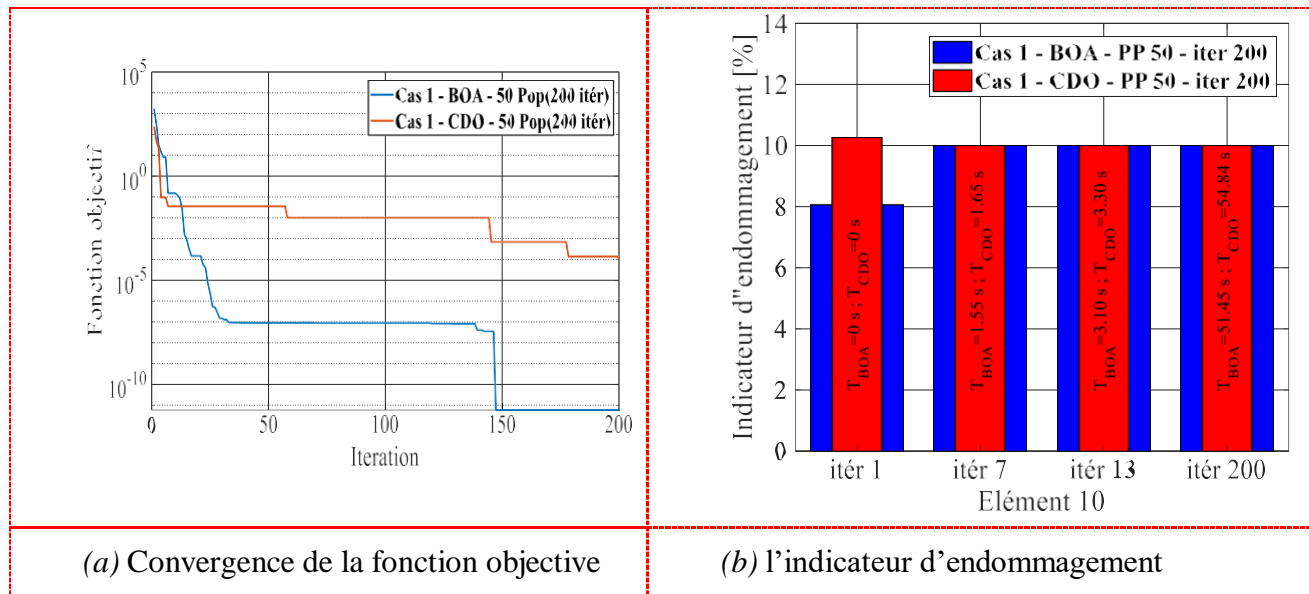


FigureIV-5 : Poutre composite stratifiée encastree-libre en (0°/90° /0°) - cas 1 - 10% d'endommagement dans l'élément 10 - Test N°2 – 50 population et variation itération.

Dans un second temps, en maintenant le nombre de populations à 50 et en variant le nombre d'itérations à 50, 200 et 500, les résultats révèlent que la méthode BOA manifeste pour l'élément 10 un taux d'endommagement de 10% à la 14ème itération pour 50 itérations en un temps de (3,4165 secondes), correspondant au taux d'endommagement réel. Par contre la méthode CDO atteint au taux d'endommagement de 10% à la 4ème itération et 50 itération avec un temps de (0,8015 secondes).

Les résultats illustrés sur le diagramme (figure (IV.5.a)) montrent que la méthode BOA converge plus rapidement et atteint des niveaux d'indicateur d'endommagement légèrement plus faibles que la méthode CDO. Cela suggère que BOA est plus performante pour minimiser la fonction objective, ce qui se traduit par une localisation plus précise et plus efficace de l'endommagement dans l'élément 10.

IV.6.1.3 Test N°3 population 50 itération 200



FigureIV-6 : Poutre composite stratifiée encastree-libre en (0°/90° /0°) - cas 1 - 10% d'endommagement dans l'élément 10 - Test N° 3 – 50 population et variation itération.

Les résultats montrent que la méthode CDO atteint un taux d'endommagement de 10% pour l'élément 10 à la 7ème itération sur un total de 200 itérations, en un temps de 1,6537 secondes, ce qui correspond au taux d'endommagement réel. En revanche, la méthode BOA atteint ce même taux d'endommagement dès la 13ème itération, toujours sur 200 itérations, mais en un temps plus court de 3,1026seconde.

On observe dans la figure (IV.6.a) que la courbe de la fonction objective montre que la méthode BAO converge beaucoup plus rapidement et atteint des valeurs nettement plus faibles que la méthode CDO.

IV.6.1.4 Test N°4 population 50 itération 500

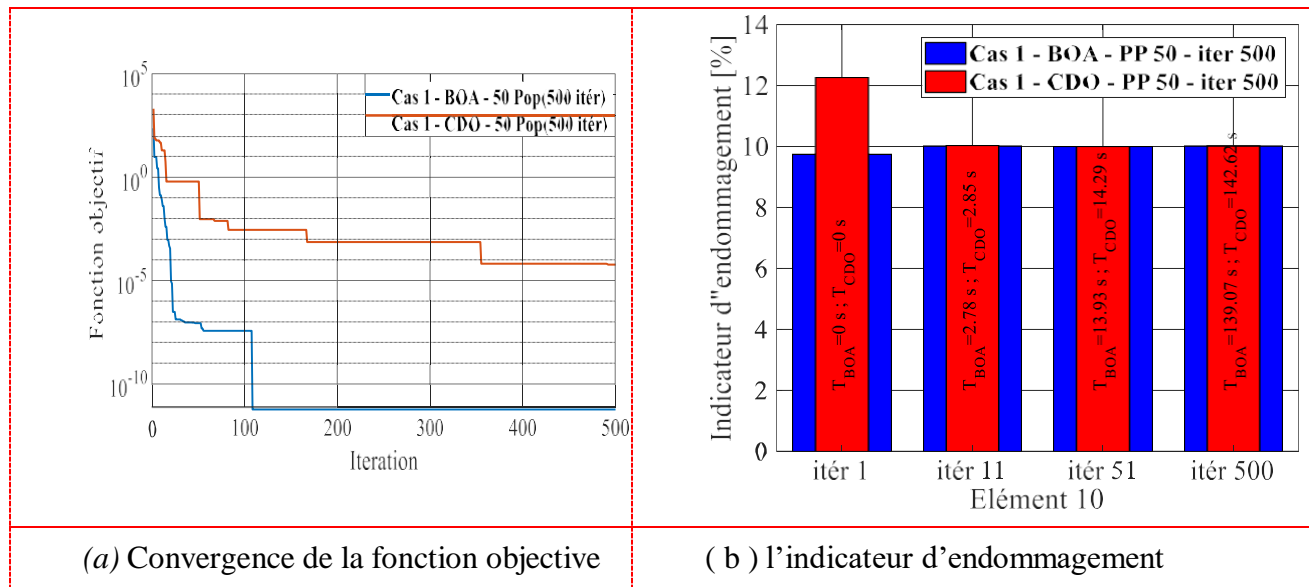


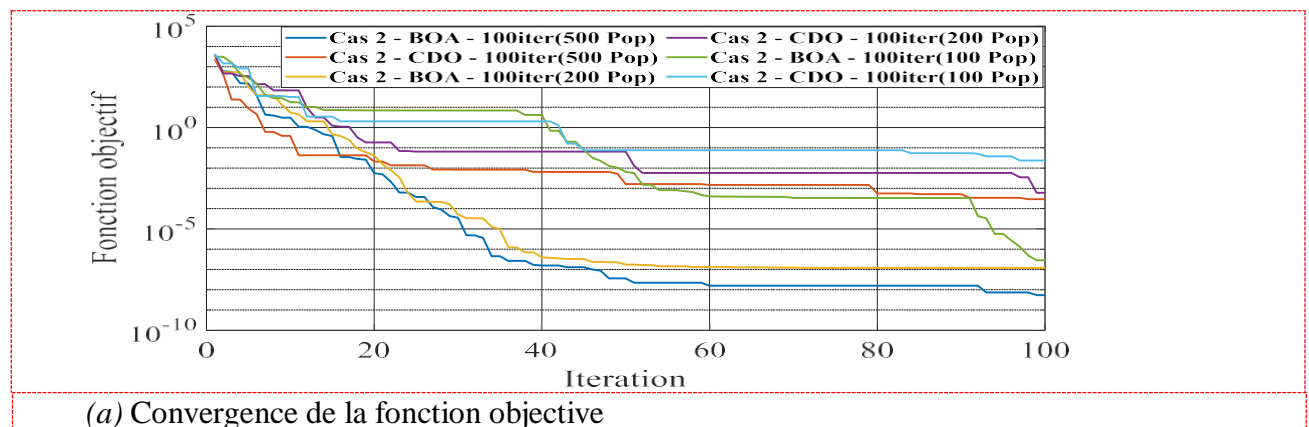
Figure IV-7 : Poutre composite stratifiée encastree-libre en (0°/90°/0°) - cas 1 - 10% d'endommagement dans l'élément 10 - Test N° 4 -50 population et variation itération.

On observe que, les résultats dans itération 1 avec temps 0s, l'estimation du niveau d'endommagement par les deux méthodes reste inférieure ou supérieure au 10% avec 9,73% pour BOA et 12,25% pour CDO. La méthode CDO atteint un taux d'endommagement de 10% pour l'élément 10 à la 51ème itération sur un total de 500 itérations, en un temps de 14,2909 secondes, ce qui correspond au taux d'endommagement réel. Par contre la méthode BOA atteint ce même taux d'endommagement dès la 11ème itération, toujours sur 500 itérations, mais en un temps plus court de 2,7871 seconde.

Le diagramme illustre l'évolution de l'indicateur d'endommagement estimé pour l'élément 10 d'une poutre encastree-libre montre que la méthode BOA converge plus rapidement et atteint des valeurs d'indicateur d'endommagement légèrement plus faibles que la méthode CDO.

IV.6.2 Cas 2 est endommagé dans l'élément 8 à 10% et l'élément 13 à 20%

IV.6.2.1 Test N°1 itération 100 population [(100); (200); (500)].



(a) Convergence de la fonction objective

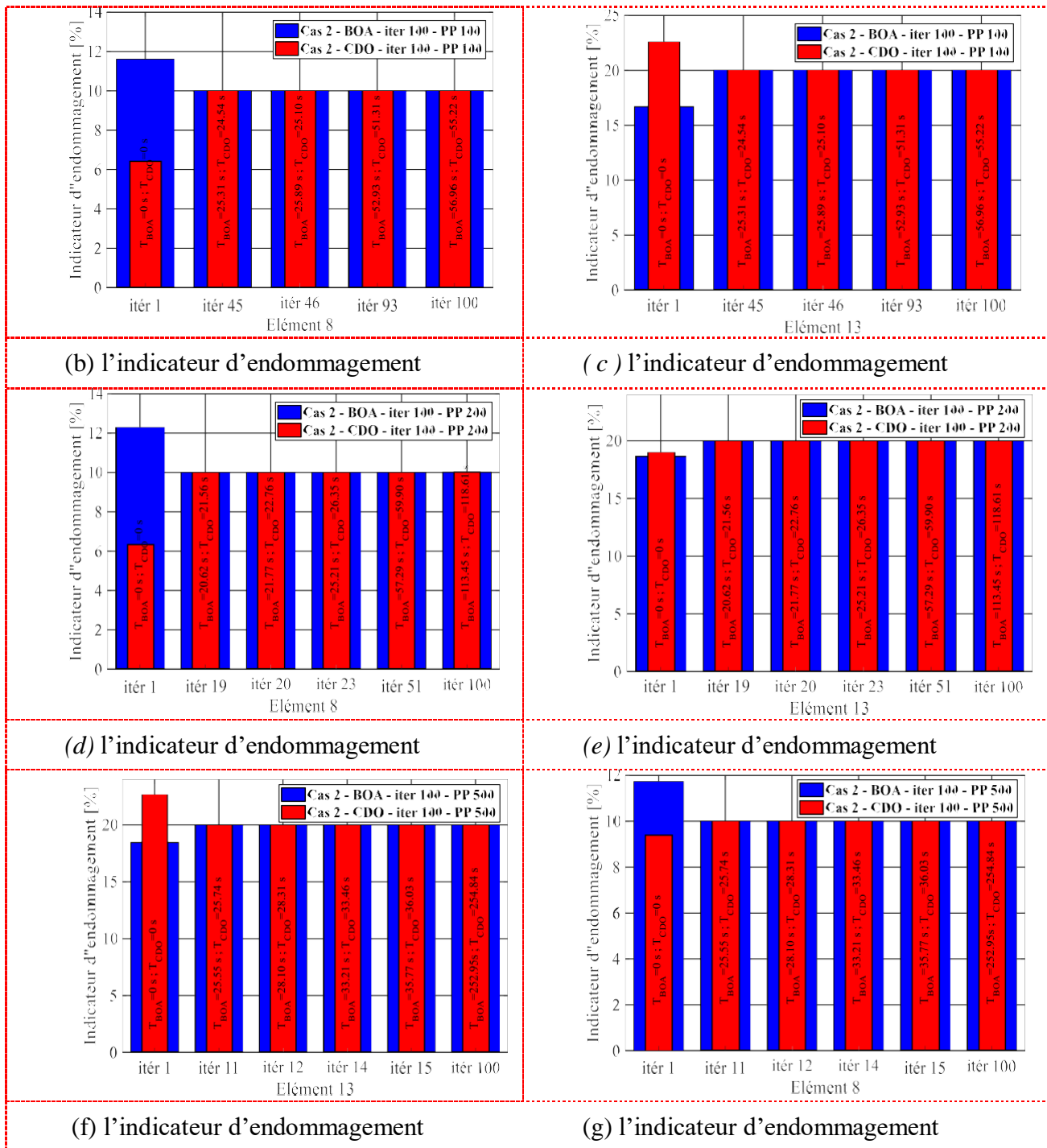


Figure IV-8 : Poutre composite stratifiée encastree-libre en  $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$  - cas 2 10% d'endommagement dans l'élément 8 et l'élément 13 avec 20% - Test N° 1 – 100 itération et variation population.

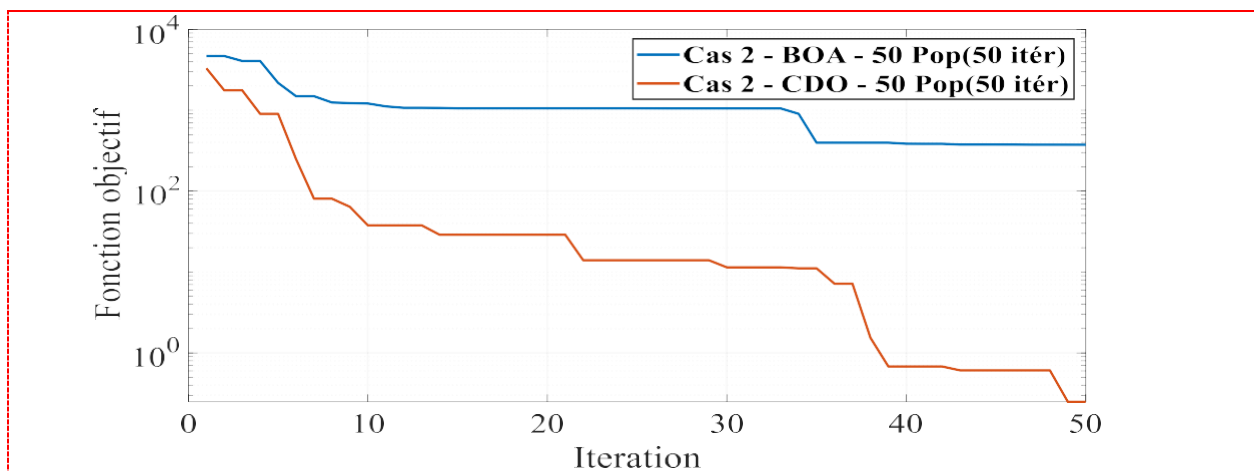
Prenant le cas de la même poutre encastree-libre sur deux appuis avec deux endommagements à savoir les éléments 8 et 13 avec un taux d'endommagement 10% et 20%. En fixant le nombre d'itérations à 100 et en variant le nombre de populations de 100, 200 et 500. On constat que la méthode BOA atteint un taux d'endommagement de 10% à la 45ème itération pour 100 populations en un temps de (25,3156 secondes), un taux de 10% à la 19ème itération pour 200 populations en (20,6280 secondes), et un taux de 10% à la 15ème itération pour 500 populations en (35,7721 secondes) pour

l'éléments 8. Concernent l'élément 13, cette méthode donne un taux d'endommagement de 20% à la 46ème itération pour 100 populations en un temps de (25,8909 secondes), puis un taux de 20% à la 20ème itération pour 200 populations en un temps de (21,7740 secondes), et un taux de 20% à la 11 itération pour 500 populations en (25,5515 secondes).

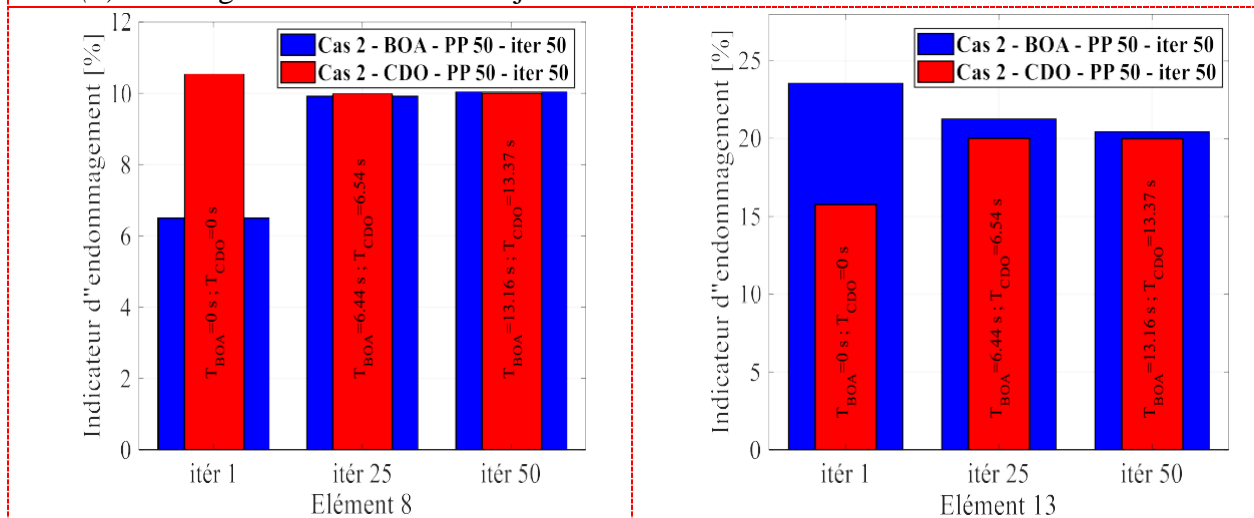
Concernant la méthode CDO, elle atteint un taux d'endommagement de 10% à la 45ème itération pour 100 population en (24,5427 secondes), puis un taux de 10% à 23ème itération pour 200 population en (26,3592 secondes), et un taux de 10% à 11ème itérations pour 500 population avec un temps (25,7422 secondes) pour l'élément 8. Cependant pour l'éléments 13, cette méthode donne un taux d'endommagement de 20% à la 93ème itération pour 100 populations en un temps de (51,3166 secondes), puis un taux de 20% à la 5ème itération pour 200 populations en un temps de (59,9073 secondes), et un taux de 20% à la 11ème itération pour 500 populations avec un temps (25,7422 secondes).

On observe dans la figure (IV.8.a) que la courbe de la fonction objective montre que la méthode BAO converge beaucoup plus rapidement et atteint des valeurs nettement plus faibles que la méthode CDO.

**IV.6.2.2 Test N°2 population 50 itération 50.**



(a) Convergence de la fonction objective



(b) l'indicateur d'endommagement

(c) l'indicateur d'endommagement

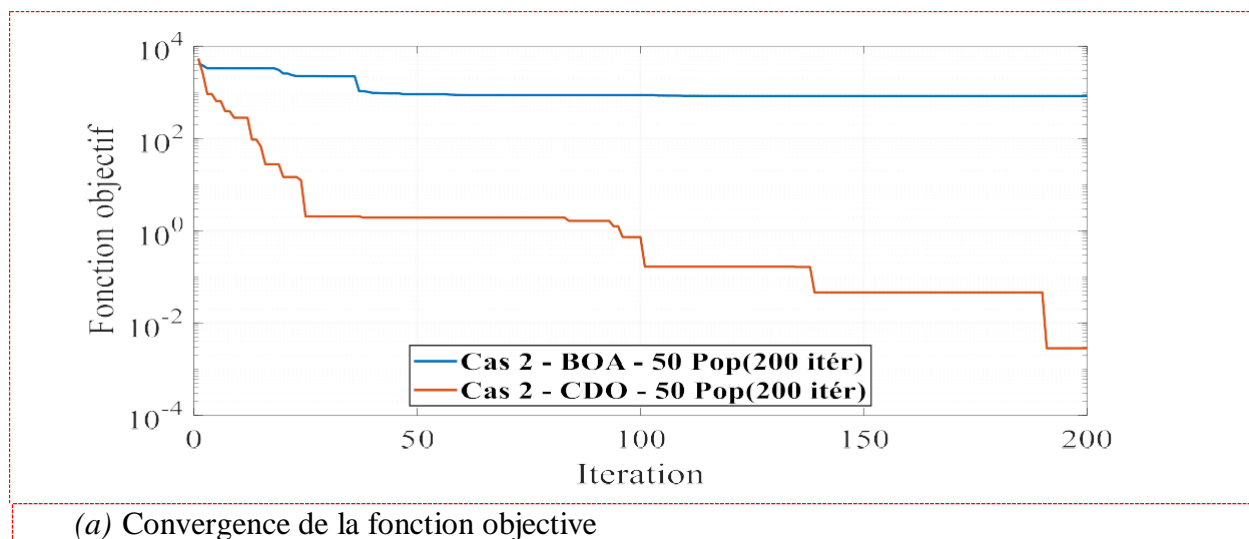
Figure IV-9 : Poutre composite stratifiée encastree-libre en  $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$  - cas 2 10% d'endommagement dans l'élément 8 et l'élément 13 avec 20% - Test N° 2.

En considérant le cas d'une poutre encastree-libre reposant sur deux appuis, présentant deux zones d'endommagement aux éléments 8 et 13 avec des taux respectifs de 10% et 20%, et en fixant le nombre populations à 50 tout en variant la taille des itérations 50, 200 et 500, dans ce test N°2 on observe les résultats suivants avec la méthode BOA. Pour l'élément 8, un taux d'endommagement de 9,9164% atteint à la 25ème itération avec 50 itérations en (6,4470 secondes et une erreur de 0,0836%). Cependant pour l'élément 13, cette méthode donne un taux de 9,9998% à 50ème itération pour 50 itérations en un temps (6,5489 secondes et une erreur de 0,0002%).

Par contre la méthode CDO donne un taux d'endommagement de 9,9916% à la 25ème itération pour 50 itérations avec un temps (6,5489 secondes avec une erreur de 0,0084%) pour l'éléments 8, ensuite pour l'élément 13, cette méthode donne un taux d'endommagement de 19,9998% atteint à la 50 itération avec 50 itérations en (13,3706 secondes et une erreur de 0,0002%).

On observe dans la figure (IV.9.a) que la courbe de la fonction objective montre que la méthode CDO converge beaucoup plus rapidement et atteint des valeurs nettement plus faibles que la méthode BOA.

#### IV.6.2.3 Test N°3 population 50 itération 200.



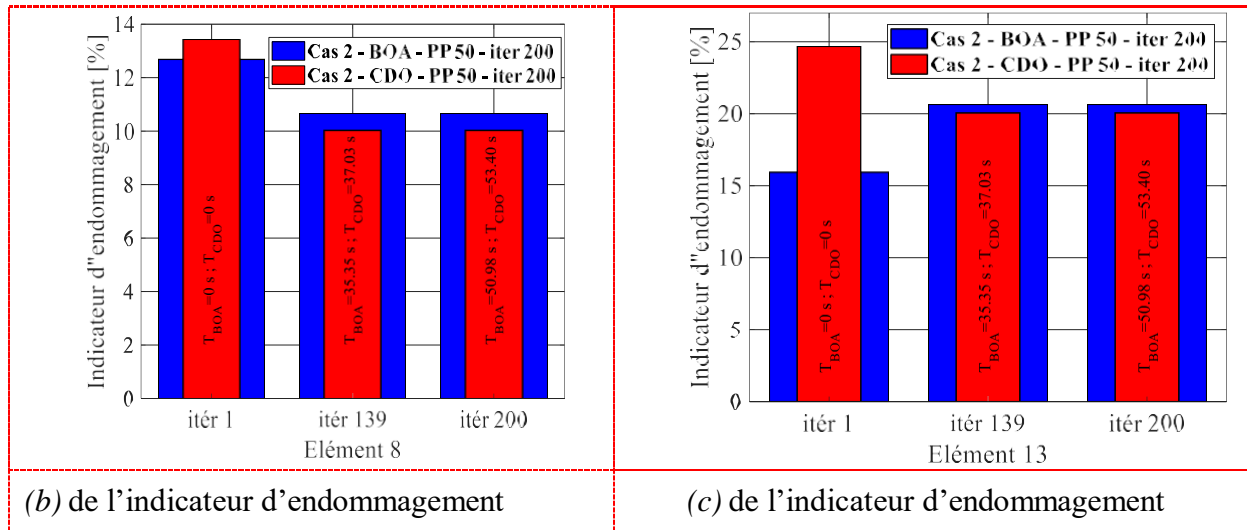
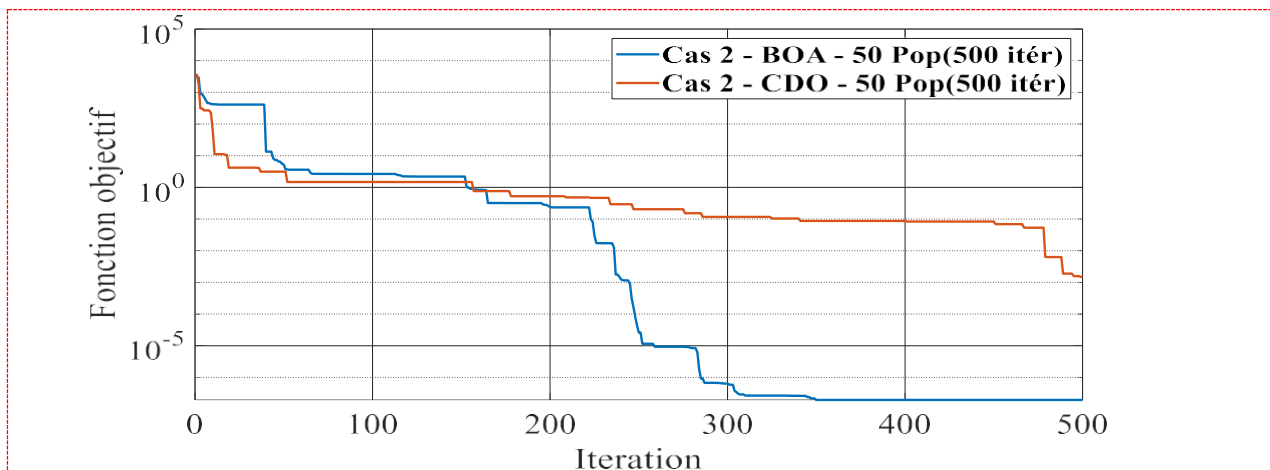


Figure IV-10 : Poutre composite stratifiée encastree-libre en (0°/90°/0°) - cas 2 10% d'endommagement dans l'élément 8 et l'élément 13 avec 20% - Test N° 3.

Dans ce test N°3 en fixant le nombre populations 50 on observe les résultats suivants avec la méthode BOA. Pour l'élément 8, un taux d'endommagement de 10,6395% atteint à la 139ème itération avec 200 itération en (35,3537 secondes et une erreur de 0,6395%). Cependant pour l'élément 13, cette méthode donne un taux de 20,5974% à 139ème itération pour 200 itération en un temps (35,3537 secondes et une erreur de 0,5974%). Par contre la méthode CDO donne un taux d'endommagement de 10% à la 139ème itération pour 200 itérations un temps (37,0325 secondes) pour l'éléments 8, ensuite pour l'élément 13, cette méthode donne un taux d'endommagement de 20% atteint à la 200 itération en (37,0325 secondes).

On observe dans la figure (IV.10.a) que la courbe de la fonction objective montre que la méthode CDO converge beaucoup plus rapidement et atteint des valeurs nettement plus faibles que la méthode BOA.

**IV.6.2.4 Test N°4 population 50 itération 500.**



(a) Convergence de la fonction objective

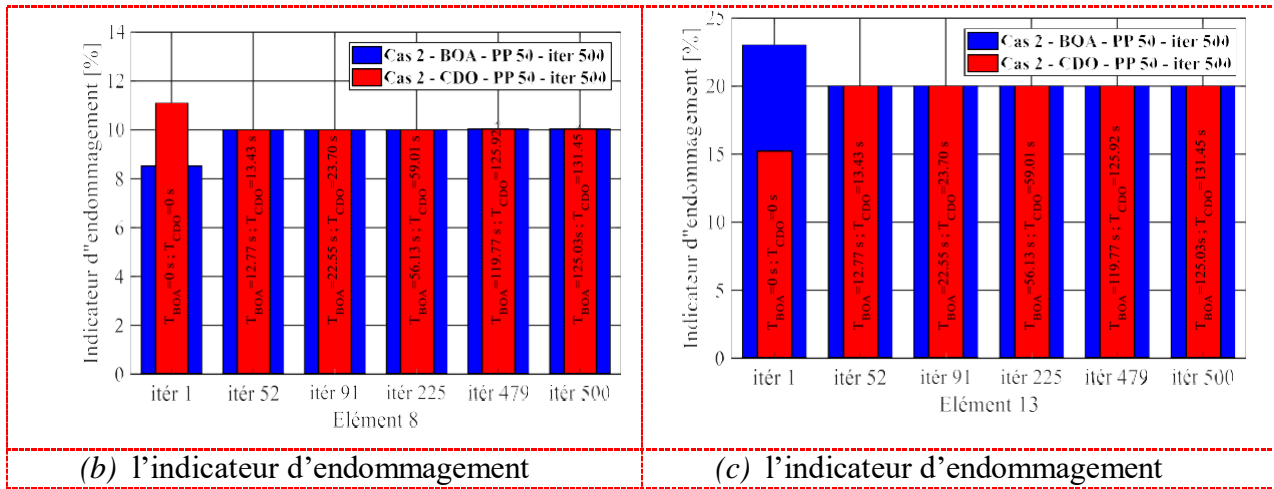
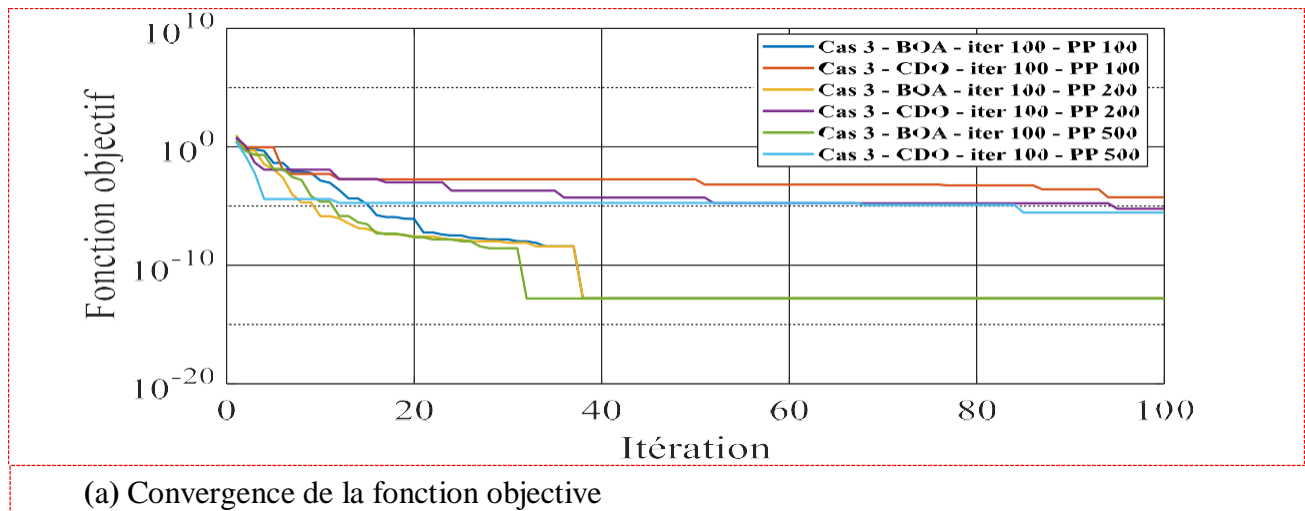


Figure IV-11 : Poutre composite stratifiée encastree-libre en  $(0^\circ/90^\circ/0^\circ)$  - cas 2 10% d'endommagement dans l'élément 8 et l'élément 13 avec 20% - Test N° 4.

Dans ce test N°4 en fixant le nombre populations 50 on observe les résultats suivants avec la méthode BOA. Pour l'élément 8, un taux d'endommagement de 10% atteint à la 91ème itération avec 500 itérations en (22,5522 secondes). Dans l'élément 13, cette méthode donne un taux de 20% à 225ème itération pour 500 itération en un temps (56,1300 secondes). Par contre la méthode CDO donne un taux d'endommagement de 10% à la 52ème itération pour 500 itérations un temps (13,4355 secondes) pour l'éléments 8. Ensuite pour l'élément 13, cette méthode donne un taux d'endommagement de 20% atteint à la 479ème itérations pour 500 itération en (125,9253 secondes).

#### IV.6.3 Cas 3 est endommagé dans l'élément 6 à 15%

##### IV.6.3.1 Test N°1 itération 100 population [(100); (200); (500)].



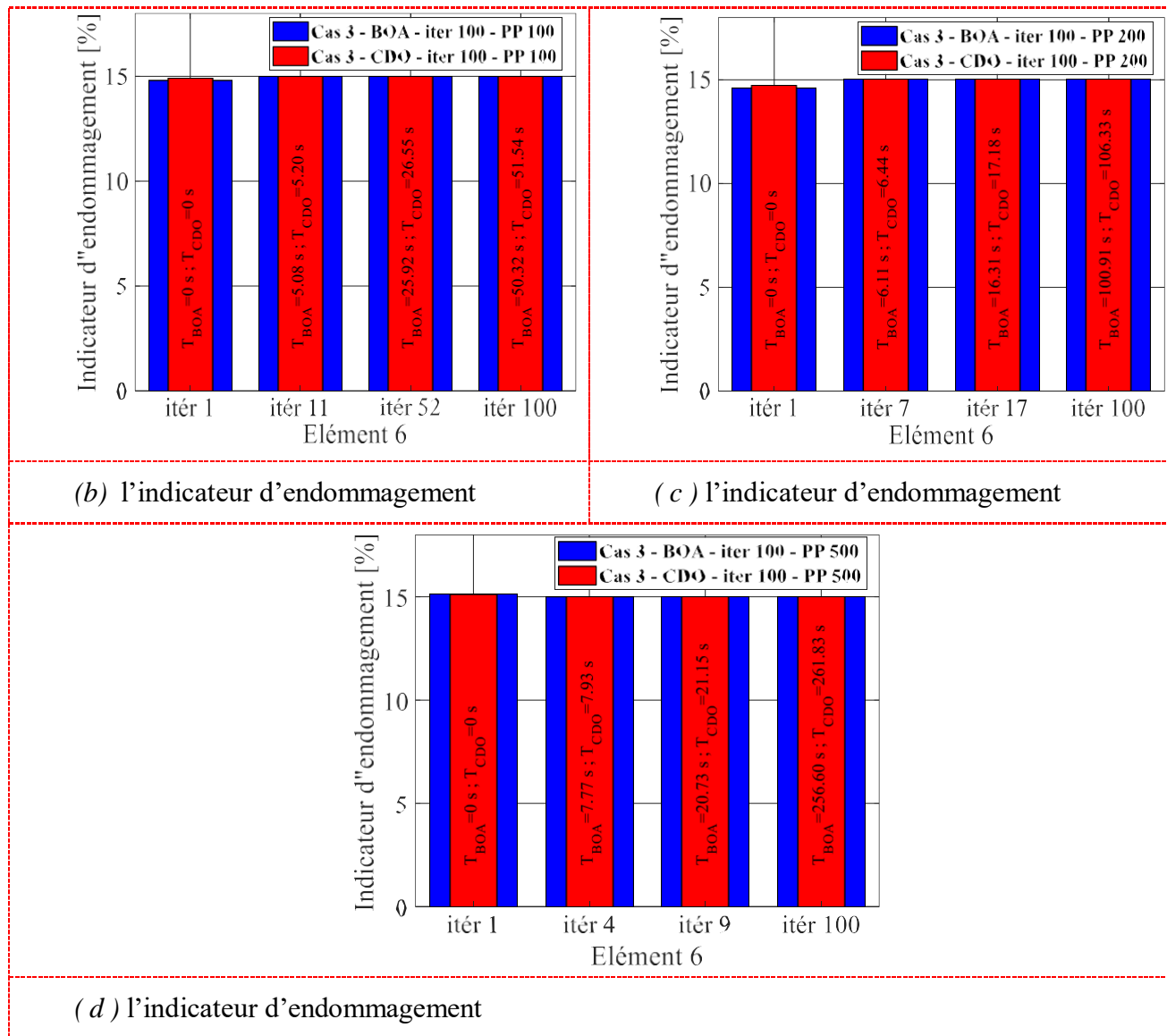


Figure IV-12 : Poutre composite stratifiée encastree-encastree en (0°/90°/0°) - cas 3 15% d'endommagement dans l'élément 6 - Test N° 1 – 100 itération et variation population.

En considérant le cas d'une poutre encastree-encastree, presentant un seul endommagement au éléments 6 avec 15%, nous avons fixé le nombre d'itérations à 100 et variant le nombre de populations de 100, 200 et 500. Il est observé que la méthode BOA manifeste un taux d'endommagement de 15% à la 11ème itération et 100 populations pour l'élément 6 en un temps de (5,0829 secondes), correspondant au taux d'endommagement réel. Puis un taux d'endommagement de 15% à la 7ème itération et 200 populations avec un temps de (6,1162 secondes), en fin 15% à la 9ème itération et 500 populations en (20,7359 seconde). Par contre, la méthode de CDO atteint au taux d'endommagement de 15% à la 52ème itération et 100 populations pour l'élément 6 en un temps de (26,5542 secondes), correspondant au taux d'endommagement réel. Puis un taux d'endommagement de 15% à la 17ème itération et 200 populations avec un temps de (17,1861 secondes), en fin 15% à la 4ème itération et 500 populations en (7,9345 seconde).

Dans la figure (IV.4.a), on observe que ce diagramme met en évidence l'efficacité des deux algorithmes, BOA et CDO, pour détecter rapidement et précisément un endommagement de 15 % dans

l'élément 6 d'une poutre encastree-encastree. Dès les premières itérations, les deux méthodes convergent vers la valeur réelle, et la stabilité des résultats à l'itération 50 confirme leur fiabilité pour ce type d'application. L'augmentation de la taille de population (100, 200, 500) permettrait d'obtenir une convergence encore plus rapide et des résultats encore plus stables pour les deux algorithmes.

**IV.6.3.2 Test N°2 population 50 itération 50.**

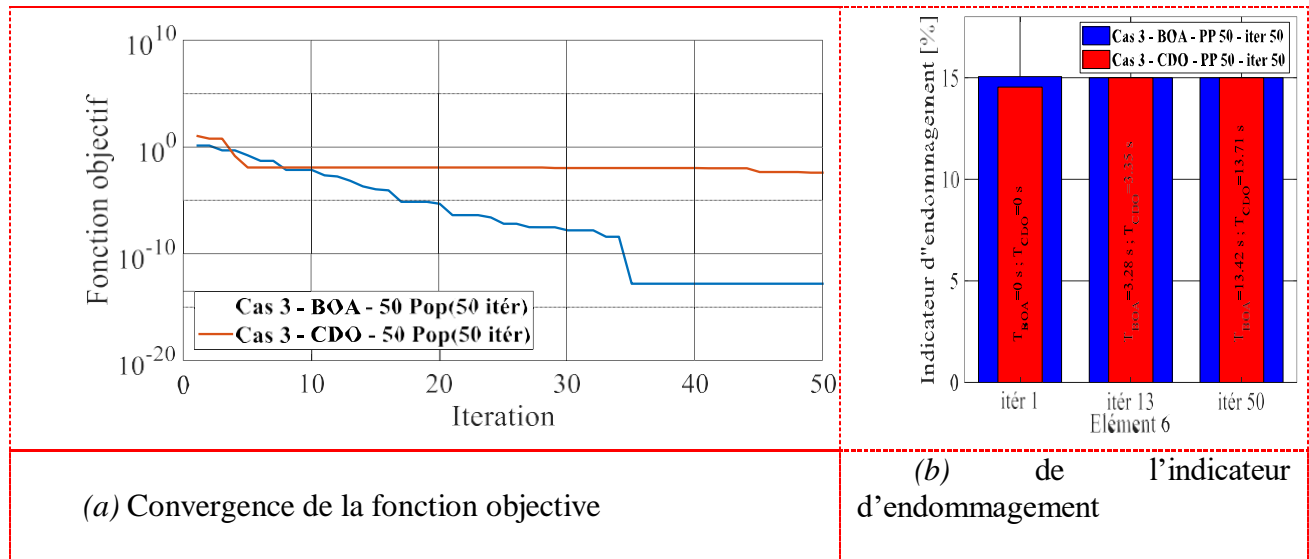


Figure IV-13 : Poutre composite stratifiée encastree-encastree en (0°/90°/0°) - cas 3 15% d'endommagement dans l'élément 6 - Test N° 2 –50 population et variation itération.

Dans un second temps, en maintenant le nombre de populations à 50 et en variant le nombre d'itérations à 50, 200 et 500, les résultats révèlent que la méthode BOA manifeste pour l'élément 6 un taux d'endommagement de 15% à la 13ème itération pour 50 itérations en un temps de (3,280 secondes). Par contre la méthode CDO atteint au taux d'endommagement de 14,9995% à la 13ème itération et 50 itération avec un temps de (3,359 secondes et une erreur de 0,0005%). Les résultats illustrés sur le diagramme (figure (IV.5.a)) montrent que la méthode BOA converge plus rapidement et atteint des niveaux d'indicateur d'endommagement légèrement plus faibles que la méthode CDO. Cela suggère que BOA est plus performante pour minimiser la fonction objective, ce qui se traduit par une localisation plus précise et plus efficace de l'endommagement dans l'élément 6.

IV.6.3.3 Test N°3 population 50 itération 200.

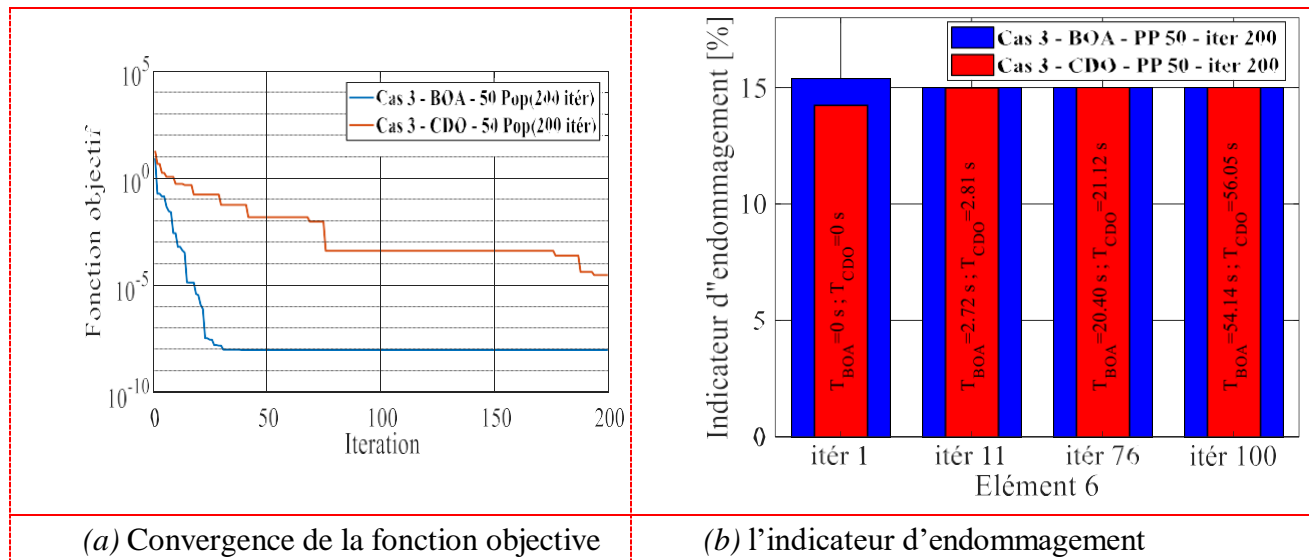
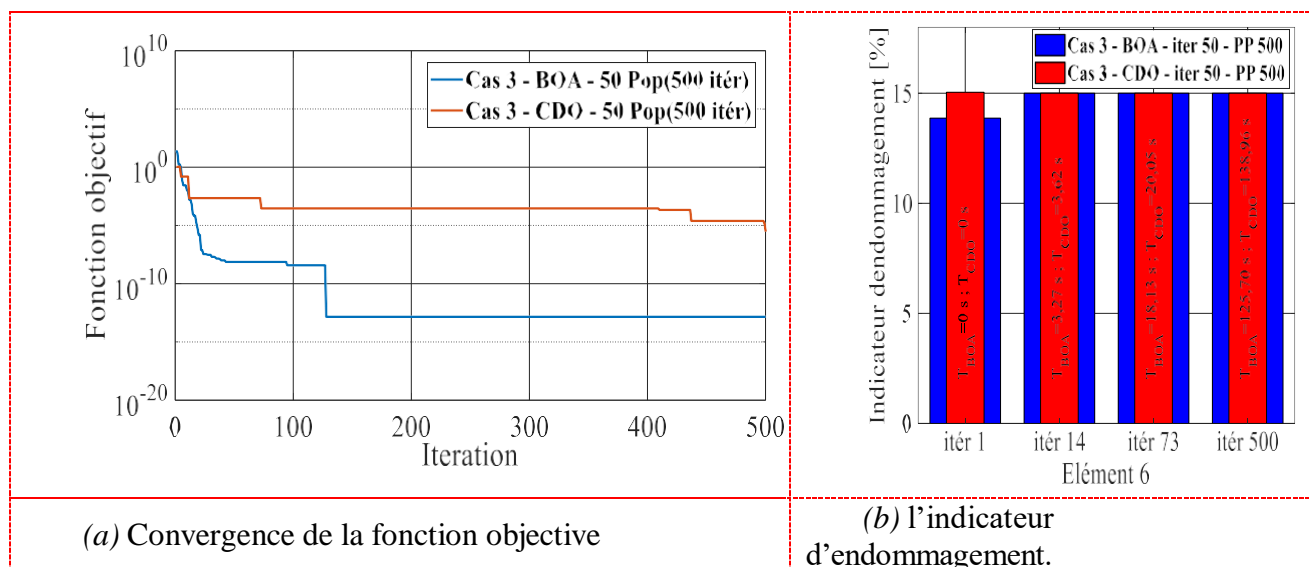


Figure IV-14 : Poutre composite stratifiée encastree-encastree en (0°/90°/0°) - cas 3 15% d'endommagement dans l'élément 6 - Test N° 3 –50 population et variation itération.

Les résultats montrent que la méthode BOA atteint un taux d'endommagement de 15% pour l'élément 6 à la 11ème itération sur un total de 200 itérations, en un temps de 2,7210 secondes, ce qui correspond au taux d'endommagement réel. Et aussi la méthode CDO atteint ce même taux d'endommagement dès la 76ème itération, toujours sur 200 itérations avec un temps (21,1259 secondes).

On observe dans la figure (IV.6.a) que la courbe de la fonction objective montre que la méthode BAO converge beaucoup plus rapidement et atteint des valeurs nettement plus faibles que la méthode CDO.

IV.6.3.4 Test N°4 population 50 itération 500.



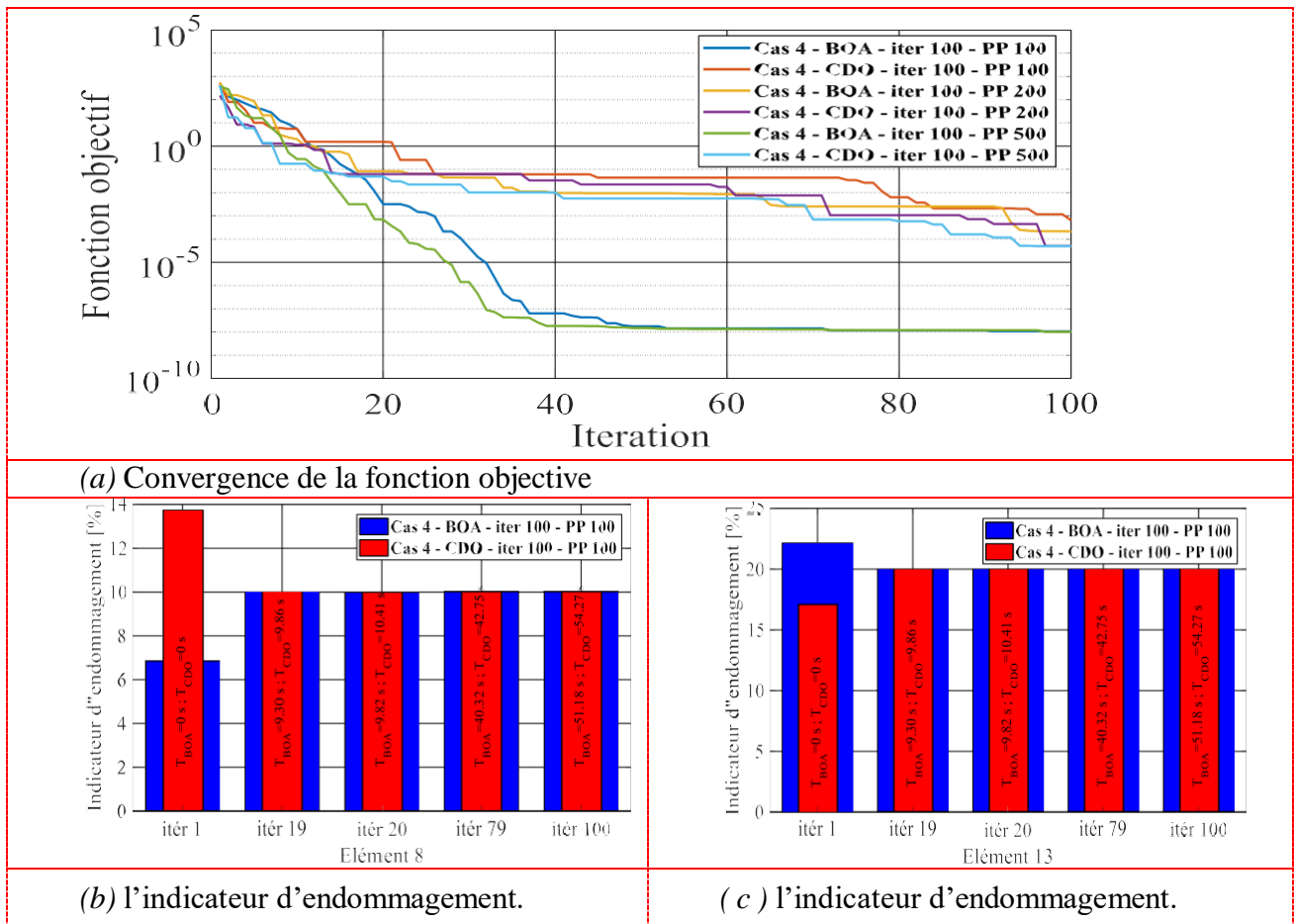
*FigureIV-15 : Poutre composite stratifiée encastrée-encastrée en (0°/90°/0°) - cas 3 15% d'endommagement dans l'élément 6 - Test N° 4 –50 population et variation itération.*

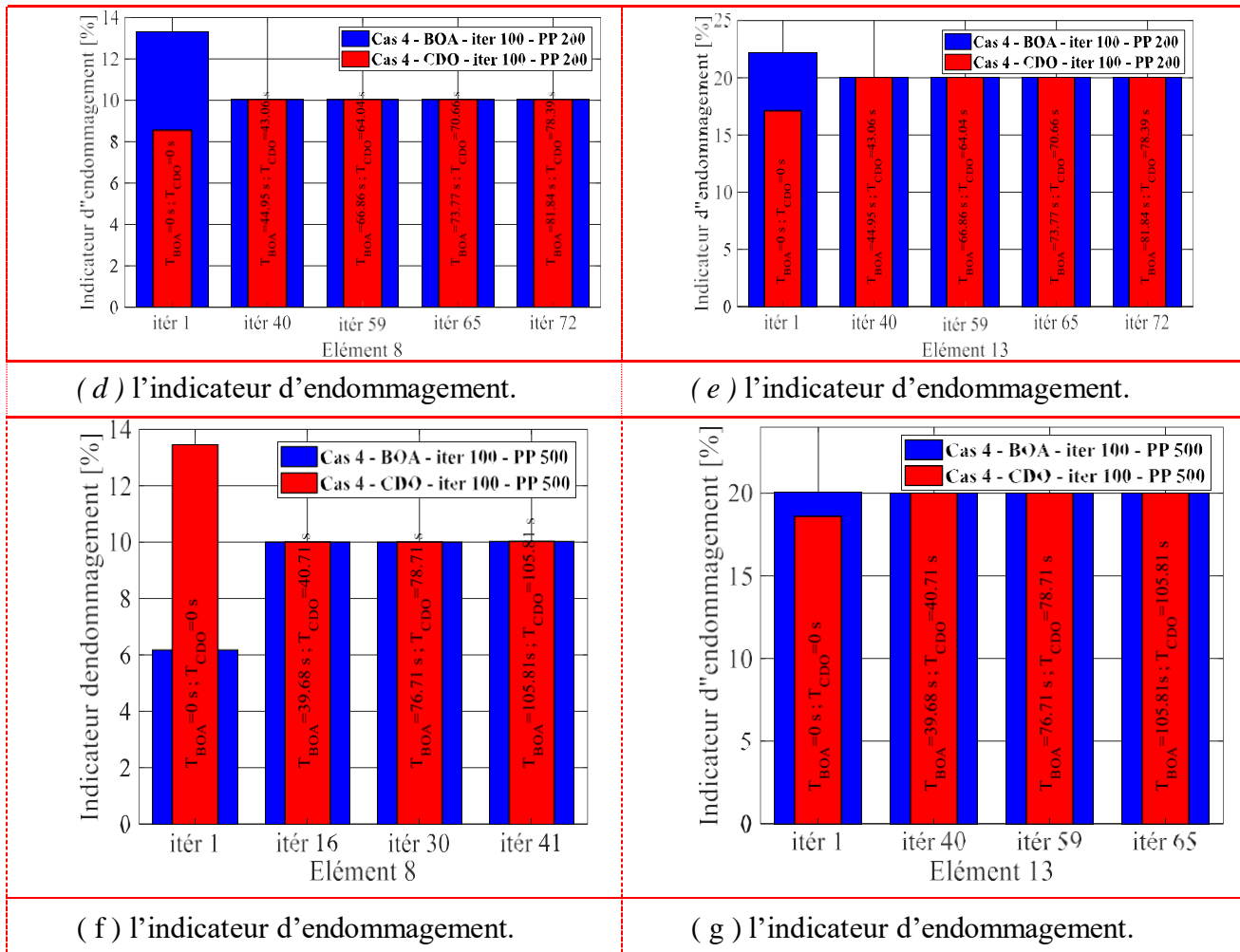
On observe que, les résultats dans itération 1 avec temps 0s, l'estimation du niveau d'endommagement par les deux méthodes reste inférieure ou supérieure au 15% avec 13,8686% pour BOA et 15,0429% pour CDO. La méthode CDO atteint un taux d'endommagement de 15% pour l'élément 6 à la 73ème itération sur un total de 500 itérations, en un temps de (20,0510 secondes). Par contre la méthode BOA atteint ce même taux d'endommagement dès la 14ème itération, toujours sur 500 itérations, mais en un temps plus court de 3,2748 seconde.

Le diagramme (Figure (IV.15. a)) illustre l'évolution de l'indicateur d'endommagement estimé pour l'élément 10 d'une poutre encastrée-libre montre que la méthode BOA converge plus rapidement et atteint des valeurs d'indicateur d'endommagement légèrement plus faibles que la méthode CDO.

**IV.6.4 Cas 4 est endommagé dans l'élément 10 à 10% et l'élément 16 20%**

**IV.6.4.1 Test N° 1 itération 100 population [(100), (200), (500)].**





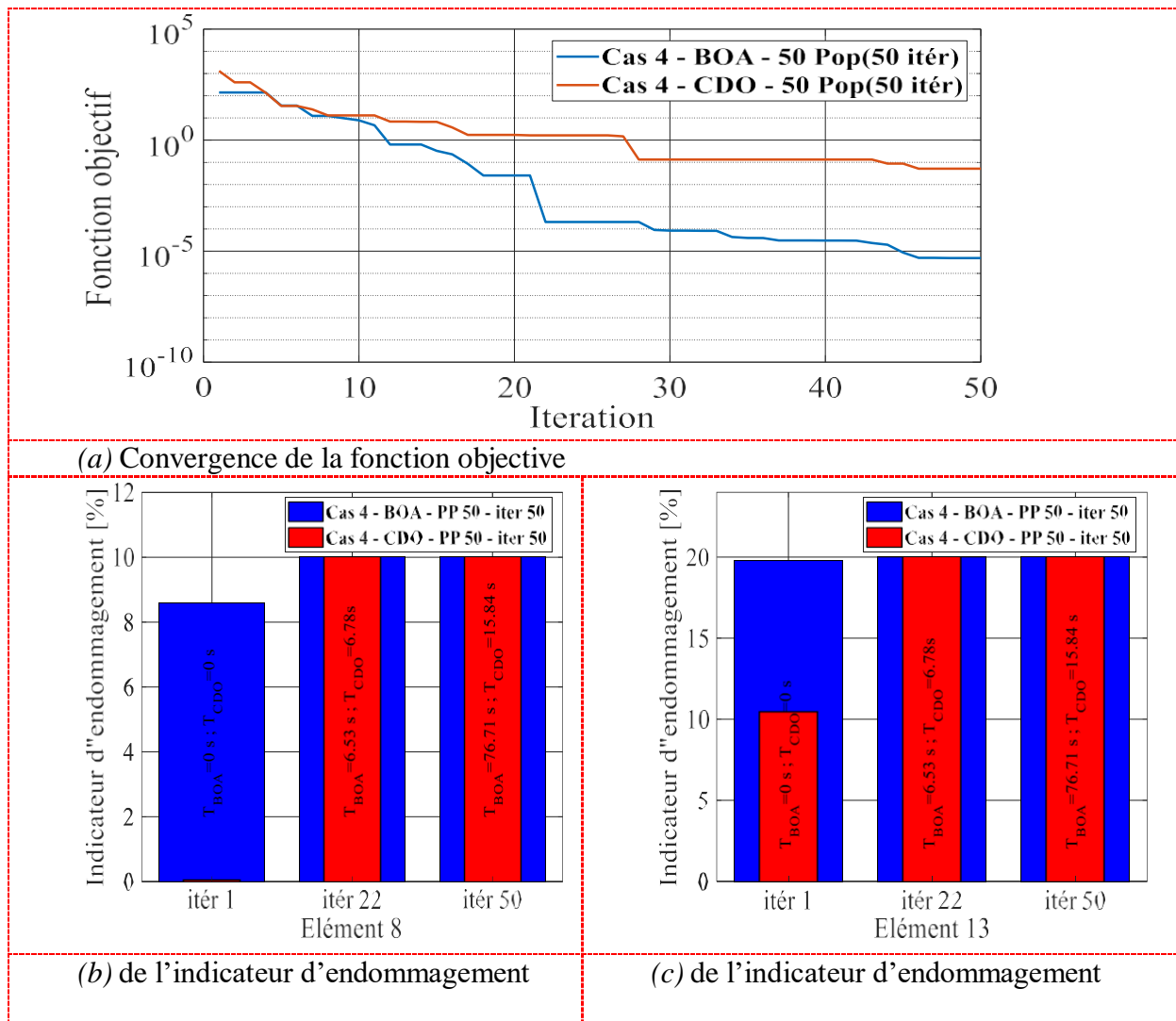
FigureIV-16 : Poutre composite stratifiée encastree-encastree en (0°/90°/0°) - cas 4 10% d'endommagement dans l'élément 10 et l'élément 16 avec 20% - Test N° 1-100 itération et variation population.

Prenant le cas de la même poutre encastree-encastree sur deux appuis avec deux endommagements à savoir les éléments 10 et 16 avec un taux d'endommagement 10% et 20%. En fixant le nombre d'itérations à 100 et en variant le nombre de populations de 100, 200 et 500. On constat que la méthode BOA atteint un taux d'endommagement de 10% à la 20ème itération pour 100 populations en - temps de (9,8228 secondes), un taux de 10% à la 65ème itération pour 200 populations en (73,7770 secondes), et un taux de 10% à la 16ème itération pour 500 populations en (39,6819 secondes) pour l'éléments 10. Concernant l'élément 16, cette méthode donne un taux d'endommagement de 20% à la 19ème itération pour 100 populations en un temps de (9,3059 secondes), puis un taux de 20% à la 40ème itération pour 200 populations en un temps de (44,9578 secondes), et un taux de 20% à la 16 itération pour 500 populations en (39,6819 secondes). Concernant la méthode CDO, elle atteint un taux d'endommagement de 10% à la 79ème itération pour 100 population en (42,7582 secondes), puis un taux de 10% à 72ème itération pour 200 population en (78,3961 secondes), et un taux de 10% à 41ème itérations pour 500 population avec un temps (108,5714 secondes) pour l'élément 10. Cependant pour l'éléments 16, cette méthode donne un taux d'endommagement de 20% à la 79ème itération pour 100 populations en un temps de (42,7582 secondes), puis un taux de 20% à la 40ème itération pour 200

populations en un temps de (43,0627 secondes), et un taux de 20% à la 30ème itération pour 500 populations avec un temps (78,7143 secondes).

Le diagramme (Figure (IV.16.a)) illustre l'évolution de l'indicateur d'endommagement estimé pour l'élément 10 et l'élément 16 d'une poutre encastree-encastree montre que la méthode BOA converge plus rapidement et atteint des valeurs d'indicateur d'endommagement légèrement plus faibles que la méthode CDO.

**IV.6.4.2 Test N° 2 population 50 itération 50.**

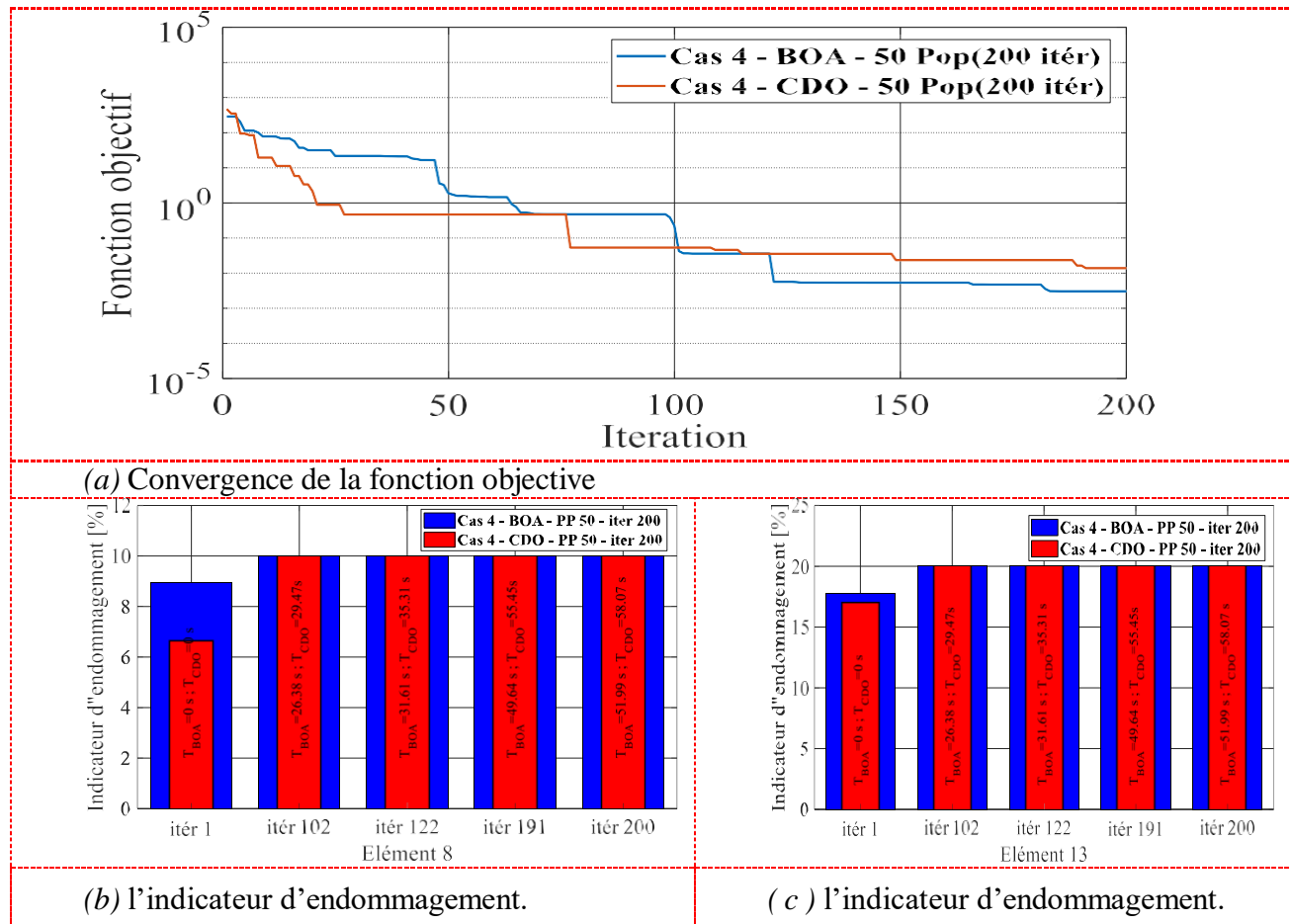


FigureIV-17 : Poutre composite stratifiée encastree-encastree en (0°/90°/0°) - cas 4 10% d'endommagement dans l'élément 10 et l'élément 16 avec 20% - Test N° 2 -50 population et variation itération.

En considérant le cas d'une poutre encastree-encastree reposant sur deux appuis, présentant deux zones d'endommagement aux éléments 10 et 16 avec des taux respectifs de 10% et 20%, et en fixant le nombre populations à 50 tout en variant la taille des itérations 50, 200 et 500, dans ce test N°2 on observe les résultats suivants avec la méthode BOA. Pour l'élément 10, un taux d'endommagement de 10% atteint à la 22ème itération avec 50 itérations en (6,5327 secondes). Cependant pour l'élément

16, cette méthode donne un taux de 20% à 22ème itération pour 50 itérations en un temps (6,5327 secondes). Par contre la méthode CDO donne un taux d'endommagement de 9,9998% à la 50ème itération pour 50 itérations avec un temps (15,8412 secondes avec une erreur de 0,0002%) pour l'éléments 10, ensuite pour l'élément 16, cette méthode donne un taux d'endommagement de 20,0128% atteint à la 50 itération avec 50 itérations en (6,7891 secondes et une erreur de 0,0128%).

**IV.6.4.3 Test N° 3 population 50 itération 200.**



FigureIV-18 : Poutre composite stratifiée encastrée-encastrée en (0°/90°/0°) - cas 4 10% d'endommagement dans l'élément 10 et l'élément 16 avec 20% - Test N° 3 –50 population et variation itération.

Dans ce test N°3 en fixant le nombre populations 50 on observe les résultats suivants avec la méthode BOA. Pour l'élément 10, un taux d'endommagement de 10% atteint à la 102ème itération avec 200 itération en (26,3895 secondes). Cependant pour l'élément 16, cette méthode donne un taux de 20 à 122ème itération pour 200 itération en un temps (31,6151 secondes). Par contre la méthode CDO donne un taux d'endommagement de 10,0001% à la 122ème itération pour 200 itérations un temps (35,3149 secondes avec une erreur de 0,0001%) pour l'éléments 10, ensuite pour l'élément 16, cette méthode donne un taux d'endommagement de 20% à la 191ème itérations pour 200 itération en (55,4531 secondes).

IV.6.4.4 Test N° 4 population 50 itération 500.

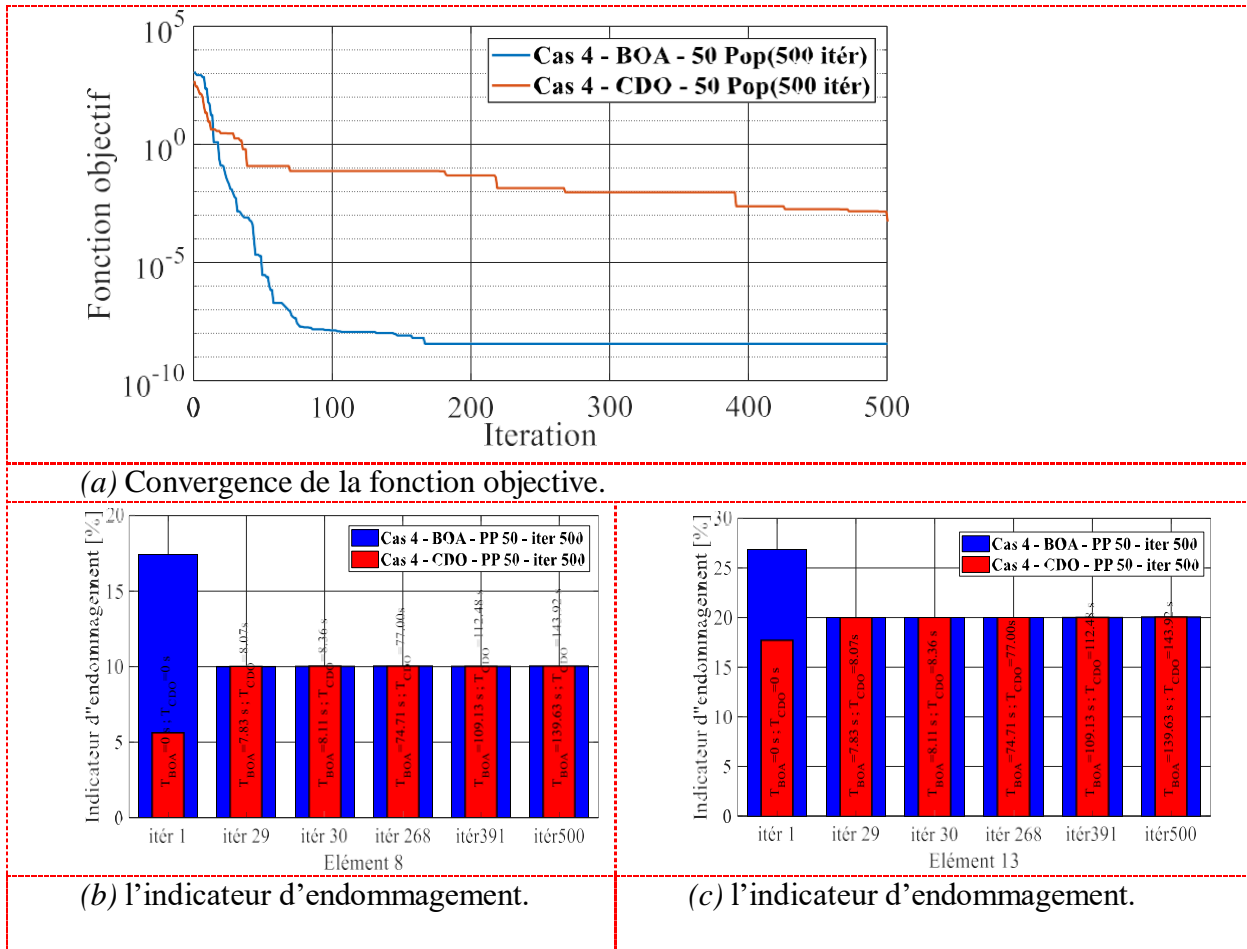


Figure IV-19 : Poutre composite stratifiée encastree-encastree en (0°/90°/0°) - cas 4 10% d'endommagement dans l'élément 10 et l'élément 16 avec 20% - Test N° 4 - 50 population et variation itération.

Dans ce test N°4 en fixant le nombre populations 50 on observe les résultats suivants avec la méthode BOA. Pour l'élément 10, un taux d'endommagement de 10% atteint à la 30ème itération avec 500 itérations en (8,1152 secondes). Dans l'élément 16, cette méthode donne un taux de 20% à 29ème itération pour 500 itération en un temps (7,8354 secondes). Par contre la méthode CDO donne un taux d'endommagement de 10% à la 391ème itération pour 500 itérations un temps (112,4858 secondes) pour l'éléments 10. Ensuite pour l'élément 16, cette méthode donne un taux d'endommagement de 20% atteint à la 268ème itérations pour 500 itération en (77,0095 secondes).

IV.7 Conclusion

Ce chapitre consacré à la localisation et à la quantification de l'endommagement, reposant sur la courbure modale couplée à des algorithmes d'optimisation tels que CDO et l'algorithme BOA, permis d'évaluer l'efficacité de ces méthodes sur des poutres encastrees-libre et encastrees-encastrees. L'analyse des résultats montre que la méthode BOA se démarque comme la plus performante par apport à la méthode CDO, offrant une minimisation plus précise de la fonction objective. Cette précision accrue se traduit par une localisation de l'endommagement plus exacte et fiable au sein des éléments étudiés. Ainsi, l'intégration de l'algorithme BOA dans les processus d'identification

## **Chapitre IV Quantification d'endommagement basée sur courbure modale couplé avec les Algorithmes d'optimisation**

---

---

d'endommagement constitue une avancée significative pour améliorer la détection et la quantification des dommages dans les structures mécaniques.

# **Conclusion générale**

Dans ce mémoire, nous avons modélisé une poutre stratifiée avec deux conditions d'appui, encastree-libre et encastree-encastree en porte-à-faux transversale ( $0^\circ/90^\circ/0^\circ$ ), en utilisant des éléments finis SI12.

Nous avons ensuite étudié deux méthodes de détection d'endommagement appliquées à cette poutre. Après avoir acquis et collecté les données nécessaires à la programmation, il a fallu choisir une méthode de localisation. Nous avons opté pour celle basée sur les courbures modales, en utilisant l'indicateur NCDF (Normalized Curvature Damage Factor). En analysant et comparant précisément les fréquences des états sain et endommagé pour chaque test sur nos deux modèles de poutres, nous avons pu constater des différences significatives, confirmant ainsi la présence d'endommagements.

L'introduction de l'indicateur NCDF nous a permis de localiser avec précision ces défauts, grâce aux multiples courbes générées par le logiciel MATLAB. Pour chaque cas d'endommagement, les localisations apparaissaient clairement sous forme de pics caractéristiques. De plus, la comparaison entre les algorithmes BOA et CDO a mis en évidence leurs performances respectives.

En résumé, ce travail a permis d'approfondir la compréhension des problématiques liées à la détection d'endommagement dans les poutres composites, tout en proposant des solutions innovantes combinant au techniques d'optimisation. Les résultats obtenus ouvrent des perspectives prometteuses pour la maintenance prédictive et la surveillance en temps réel des structures composites, tout en soulignant la nécessité de poursuivre les recherches afin d'améliorer ces méthodes et de les adapter à des configurations plus complexes.



**Référence  
bibliographiques**

- [01] Jean-Marie Berthelot, 2010, « Mécanique des matériaux et structures composites », Institut supérieur et Mécaniques Avancées, le Mans France.
- [02] Danièle. Gay, « Matériaux composites », HERMES, 4ème édition 1997.
- [03] L. Gunnink, B. Vogelesang, J.Schijve, Application of a new hybrid material (ARALL) in aircraft structures, in: proceeding of the 13th Congress of the international Council of the Aeronautical Science (ICAS), Washington, 1982, pp.990-1000.
- [04] Ashby Michael F., Courbon Joël, & Dupeux Michel. (2008). Matériaux. 2, Microstructures, mise en œuvre et conception / Michael F. Ashby,... David R. H. Jones,... ; Traduit de l'anglais par Joël Courbon,... Michel Dupeux,... (3e édition [entièrement refondue]). Dunod
- [05] **AFNOR**. (2002). *NF X 60-010 : Maintenance – Terminologie*. Paris : Association Française de Normalisation.
- [06] **Savoir S5-2 TELEEC**. (s.d.). *Chapitre 1 – La maintenance*. Support de cours en électrotechnique, 2 pages.
- [07] **Timoshenko, S.** (1921). *On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars*. Philosophical Magazine, 41(245), 744–746.
- [08] S.W. Doebling, C.R. Farrar, M.B. Prime and D.W. Shevitz, Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems From Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review, Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS, 1996.
- [09] Y. Xia, Condition Assessment of Structures Using Dynamic Data, PhD. thesis, Nanyang Technology University, Singapore, 2002.
- [10] Y.K. Ho and D.J. Ewins, On Structural Damage Identification with Mode Shapes, Proceedings of COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, Madrid, Spain, 2000, pp. 677–686.
- [11] N. Stubbs and J.T. Kim, Damage Localization in Structures without Baseline Modal Parameters, American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal 34((1996), 1649–1654.
- [12] M.M.F. Yuen, A Numerical Study of the Eigenparameters of a Damaged Cantilever, Journal of Sound and Vibration 103 (1985), 301–310.
- [13] A.K. Pandey, M. Biswas and M.M. Samman, Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes, Journal of Sound and Vibration 145(2) (1991), 321–332.

- [14] C.A. Coello Coello, Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art, *Comput Methods Appl Mech Eng* 191 (2002) 1245–1287. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(01\)00323-1](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(01)00323-1).
- [15] R.T. Marler, J.S. Arora, Survey of multi-objective optimization methods for engineering, *Structural and Multidisciplinary Optimization* 26 (2004) 369–395. <https://doi.org/10.1007/S00158-003-0368-6/METRICS>. 26
- [16] X.-She. Yang, Nature-inspired metaheuristic algorithms, (2010) 148. [https://books.google.com/books/about/Nature\\_inspired\\_Metaheuristic\\_Algorithms.htm?id=iVB\\_ETlh4ogC](https://books.google.com/books/about/Nature_inspired_Metaheuristic_Algorithms.htm?id=iVB_ETlh4ogC) (accessed February 23, 2025)
- [17] I. Boussaïd, J. Lepagnot, P. Siarry, A survey on optimization metaheuristics, *Information Sciences—Informatics and Computer Science, Intelligent Systems, Applications: An International Journal* 237 (2013) 82–117. <https://doi.org/10.1016/J.INS.2013.02.041>.
- [18] J.H. Holland, Genetic algorithms, *Sci Am* 267 (1992) 66–72. <https://doi.org/10.1038/SCIENTIFICAMERICAN0792-66>.
- [19] L.J. Fogel, A.J. Owens, M.J. Walsh, Artificial intelligence through a simulation of evolution, *Evolutionary Computation: The Fossil Record* (1998) 230–248. <https://doi.org/10.1109/9780470544600.CH7>. [7] R. Storn, K. Price, Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, *Journal of Global Optimization* 11 (1997) 341– 359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328/METRICS>.
- [20] A. Zhou, B.Y. Qu, H. Li, S.Z. Zhao, P.N. Suganthan, Q. Zhangd, Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art, *Swarm Evol Comput* 1 (2011) 32–49. <https://doi.org/10.1016/J.SWEVO.2011.03.001>.

