



Thèse de Doctorat en Sciences

Spécialité : Génie Mécanique

Identification en dynamique linéaire et non linéaire de structures en matériaux multicouches

Par
Amar BEHTANI

Soutenue le 21/06/2020 devant le jury suivant :

M. BRAHIM NECIB	PROFESSEUR	UFMCI CONSTANTINE	PRESIDENT
M. AMAR BOUAZZOUNI	PROFESSEUR	UMM TIZI-OUZOU	RAPPORTEUR
M. FARID ASMA	PROFESSEUR	UMM TIZI-OUZOU	EXAMINATEUR
M. DJILALI BOUTCHICHA	PROFESSEUR	UST ORAN	EXAMINATEUR

Laboratoire de Mécanique, Structure & Énergétique (LMSE)



Remerciements

*J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur **Amar BOUZZOUNI**, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou de m'avoir encadré et permis d'entreprendre ce travail de recherche ainsi que pour les conseils et les encouragements qu'il m'a donné tout au long de ce travail.*

*J'exprime également toute ma gratitude à Monsieur **Brahim NECIB**, Professeur à l'université Mentouri de Constantine pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur de présider le jury de ma thèse.*

*Je tiens à remercier Monsieur **Djilali BOUTCHICHA**, Professeur à Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed BOUDIAF (USTO-MB), pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur d'être examinateur de cette thèse.*

*Je tiens à remercier Monsieur **Farid ASMA**, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur d'être examinateur de cette thèse.*

Enfin je renouvelle toute mon amitié et ma sympathie à ceux qui m'ont accordé du temps et m'ont témoigné un soutien constant dans ce long travail de recherche.

A mes parents et à ma famille

Sommaire

Remerciements.....	I
Sommaire	III
Liste des notations	VII
Liste des abréviations.....	X
Liste des illustrations	XI
Liste des tableaux.....	XIV
Introduction générale	1
1 Etat de l'art sur les méthodes d'identification d'endommagements	5
1.1 Introduction :.....	5
1.2 Contrôle continu de l'état de la structure :.....	6
1.2.1 Méthodes basées sur des données vibratoires	7
1.2.2 Fréquences naturelles	7
1.2.3 Déformées propres	10
1.2.4 Méthodes basées sur la courbure modale	11
1.2.5 Amortissement	12
1.2.6 Fonctions de réponse fréquentielle (FRF).....	13
1.2.7 Energie de déformation modale	13
1.2.8 Flexibilité modale.....	14
1.3 Conclusion	16
2 Mécanismes d'endommagement et modélisation des composites stratifiés	18
2.1 Introduction :.....	18
2.2 Comportement a rupture des matériaux composites.....	18
2.3 Mécanisme de rupture dans un composite unidirectionnel [52].....	19
2.3.1 Endommagement des fibres	19
2.3.2 Endommagement de la matrice	19
2.3.3 Endommagement de l'interface.....	20
2.4 Endommagements des composites stratifiés.....	21
2.4.1 Modes de rupture [53].....	21
2.4.2 Les fissurations [53].....	21
2.5 Propagation de la rupture	24
2.5.1 Forte adhérence fibre- matrice [52].....	24
2.5.2 Faible adhérence fibre- matrice [52]	25

2.6	Causes de défaillances des pièces en matériaux composites	26
2.6.1	Défaillances au niveau de la fabrication de la pièce.....	26
2.6.2	Défaillances liées à l'utilisation	27
2.7	Modélisation par éléments finis de poutres stratifiées.....	28
2.7.1	Introduction :	28
2.7.2	Energie potentielle de déformation d'une poutre de TIMOSHENKO	28
2.7.2.1	Les déplacements	29
2.7.2.2	Les déformations	29
2.7.2.3	Energie potentielle de la poutre s'écrit :	30
2.7.3	Élément fini <i>SI8</i>	31
2.7.3.1	Calcul de la matrice de rigidité de l'élément fini <i>SI8</i>	34
2.7.3.2	Calcul de la matrice de masse de l'élément fini <i>SI8</i>	34
2.7.3.3	Matrices de rigidité et de masse globales	35
2.7.4	Élément fini <i>SI12</i>	35
2.7.5	Élément fini <i>SI20</i>	37
2.7.5.1	Calcul de la matrice de rigidité élémentaire	40
2.7.5.2	Calcul de la matrice de masse élémentaire.....	41
2.7.6	Validation expérimental du modèle numérique	41
2.7.7	Conclusion.....	43
3	Intelligence artificielle pour l'identification d'endommagement.....	45
3.1	Introduction :	45
3.2	Les algorithmes génétiques.....	46
3.2.1	Définition :	46
3.2.2	Principes généraux	46
3.2.3	Différentes étapes de l'algorithme génétique.....	48
3.2.4	Terminologie propre aux algorithmes génétiques	48
3.2.5	Description détaillée.....	50
3.2.5.1	Codage des données	50
3.2.5.2	Génération aléatoire de la population initiale.....	52
3.2.5.3	Fonction d'évaluation (fitness) et le hasard	53
3.2.6	Concepts et formalismes d'opérateurs génétiques	53
3.2.6.1	Sélection.....	54
3.2.6.2	Les Croisements	56
3.2.6.3	La Mutation.....	58
3.2.7	Paramètre de dimensionnement.....	58
3.2.8	Etapes importantes de l'algorithme génétique	58
3.2.9	Conclusion :	59

4	Localisation d'endommagements basée sur les données vibratoires.....	61
4.1	Introduction :.....	61
4.2	Méthode basée sur l'énergie de déformation modale :.....	62
4.2.1	Introduction :.....	62
4.2.2	Présentation de la méthode :.....	62
4.2.3	Applications et tests numériques :.....	64
4.2.3.1	Poutreunidirectionnelle :.....	65
4.2.3.2	Poutre stratifiée :.....	66
4.3	Méthode basée sur la fonction reponse fréquentielle (FRF) :.....	69
4.3.1	Détection de défauts en utilisant les FRF.....	69
4.3.1.1	Application de la méthode.....	70
4.3.1.2	Interprétationdes résultats :.....	74
4.3.2	Localisation des endommagements :.....	74
4.3.2.1	Application de la méthode pour la localisation :.....	76
4.3.2.2	Interprétations des résultats :.....	79
4.3.2.3	Conclusion :.....	79
5	Localisation et quantification d'endommagements avec la méthode de la force résiduelle modale couplée avec l'algorithme génétique.	81
5.1	Introduction :.....	81
5.2	Etude théorique :.....	82
5.3	Indicateur d'endommagement :.....	83
5.3.1	Applications et test numériques :.....	85
5.3.2	Détection et localisationd'endommagements.....	86
5.3.2.1	Cas test 1: 3ième élément endommagé :.....	86
5.3.2.2	Cas test 2 8ièmeélément endommagé :.....	87
5.3.2.3	Cas test 3 le 3ième et le 8ième élément endommagé.....	88
5.3.2.4	Cas test 4 : 2, 4, 6 et le 8 ^{ième} élément endommagés.....	88
5.3.2.5	Cas test 5 tous les éléments endommagés :.....	89
5.4	Quantification des endommagements :.....	89
5.4.1	Résultats et discussion :.....	92
5.4.1.1	Cas test 1: Un endommagement (3ième élément) :.....	92
5.4.1.2	Cas test 2: Un endommagement (8ième élément).....	93
5.4.1.3	Cas test 3: Deux éléments endommagés (3 et le 8).....	94
5.4.1.4	Cas test 4: Plusieurs endommagements (2,4,6 et 8).....	95
5.4.1.5	Cas test 5: Tous les éléments endommagés.....	96
5.5	Conclusion :.....	97
	Conclusion générale.....	99

Références bibliographiques..... 102

6 Annexe 1.....107

Résumé..... 111

Liste des notations

- E_i : Module de Young dans la direction i .
 $E_x^{(k)}$: Module de Young de la $k^{ième}$ couche dans la direction de l'axe x .
 G_{ij} : Module de cisaillement dans le plan correspondant.
 $G_{xz}^{(k)}$: Module de cisaillement transversal de la $k^{ième}$ couche de la poutre.
 Q_{ij}, B_{ij} et D_{ij} : Coefficients de rigidité de la poutre.
 ν_{ij} : Coefficient de Poisson dans le plan correspondant.
 k : Facteur de correction de cisaillement.
 a_i : Facteur de réduction de raideur.
 σ_i : Contrainte dans la direction i .
 σ_F : Contrainte de traction.
 σ_{Fu} : Contrainte à la rupture.
 σ_{FM} : Contrainte à la rupture de la matrice.
 τ, τ_m : Contrainte de cisaillement.
 τ_{mu} : Contrainte en cisaillement à la rupture.
 τ_{ij} : Contrainte de cisaillement dans le plan correspondant.
 N_i : Efforts dans la direction i .
 M_i : Moments de flexion.
 T_e : L'énergie cinétique.
 U_i : L'énergie de déformation.
 P_i : Force de traction, Force axiale.
 V_i : Force de cisaillement.
 ε_i : Déformation relative dans la direction j .
 γ_{ij} : Glissement de cisaillement dans le plan correspondant.
 $u_i, u_1(x)$: Déplacement longitudinal.

- $w_i, u_3(x)$: Déplacement transversal.
 $\gamma(x)$: Déplacement de rotation.
 v_m^T : Déplacements des nœuds ($m = i, j, k, l$).
 Z_k : Coordonnée de la $k^{ième}$ couche.
 w_i, γ_x^i : Déplacements nodaux.
 v_i : Vecteur déplacements de nœud i .
 v_e : Vecteur déplacement nodale de l'élément fini *S18*.
 N_i, N_j, N_k, N_l : Fonction d'interpolation
 K_e : Matrice de rigidité d'un élément fini
 $D^{(k)}$: Matrice d'élasticité
 M : Matrice de masse de la structure,
 K : Matrice de rigidité de la structure,
 Φ : Matrice des vecteurs propres,
 ρ_1, ρ_2, ρ_3 : Les densités massiques généralisées
 ρ_k : Masse volumique de la $k^{ième}$ couche.
 m_i : Densité de masse par unité de longueur
 h : Epaisseur
 L : Longueur
 b : Largeur de la poutre.
 A_i : Rigidité en traction
 D_i : Rigidité en flexion
 $\phi_i, \bar{\phi}_i$: Vecteurs propres, normalisés par rapport à la matrice de masse des structures respectivement saine et endommagée.
 $\omega_i, \bar{\omega}_i$: Fréquences naturelles des structures, respectivement saine et endommagée
 λ_i : $i^{ième}$ valeur propre
 $\{ \}_u$: Cas de non endommagement (structure saine)
 $\{ \}_d$: Cas d'endommagement (structure susceptible).

$\{ \}^T$: Vecteur ou matrice transposé
 gn : Pourcentage du bruit introduit.

Liste des abréviations

MEF	: Méthode des Eléments Finis.
DDL	: Degré de liberté.
<i>Diag</i>	: Diagonal.
<i>abs</i>	: Valeur absolue.
AGs	: Algorithmes génétiques.
CND	: Contrôle non destructif

Liste des illustrations

Figure 2-1 : <i>Rupture de fibre</i>	19
Figure 2-2 : <i>Rupture transverse de la matrice</i>	20
Figure 2-3 : <i>Rupture longitudinale de la matrice</i>	20
Figure 2-4 : <i>Modes de fissuration de la matrice, en (a) Mode dispersé et en (b) Mode localisé</i>	20
Figure 2-5 : <i>Décohésion fibre- matrice</i>	21
Figure 2-6 : <i>Schéma représentant les modes élémentaires de sollicitation</i>	21
Figure 2-7 : <i>Différentes types de fissuration au sein d'un composite stratifié</i>	22
Figure 2-8 : <i>Différents mécanismes de rupture d'un stratifié</i>	23
Figure 2-9 : <i>Stratifié croisé soumis à une traction dans la direction 0°</i>	23
Figure 2-10 : <i>Stratifié croisé $\pm 45^\circ$ soumis à une traction dans la direction 0°</i>	24
Figure 2-11 : <i>Délamination d'une pièce en chloroprène (CR) dû à une pression insuffisante</i>	24
Figure 2-12 : <i>Rupture d'un tube en verre- polyester ortho phtalique $\pm 30^\circ$ réalisé par enroulement filamentaire. Défaut : fibres humides- aspect d'un délamination entre couches</i>	24
Figure 2-13 : <i>Propagation de la rupture dans le cas d'une forte adhérence fibre- matrice</i>	25
Figure 2-14 : <i>Propagation de la rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre- matrice</i>	26
Figure 2-15 : <i>Déformation d'une poutre (théorie de TIMOSHENKO)</i>	29
Figure 2-16 : <i>Représentation des couches du stratifié</i>	31
Figure 2-17 : <i>Elément fini SI8</i>	32
Figure 2-18 : <i>Fonction de forme de l'élément fini SI8</i>	33
Figure 2-19 : <i>Elément fini SI12</i>	35
Figure 2-20 : <i>Elément fini SI20</i>	37
Figure 2-21 : <i>Déformations de l'élément fini SI20</i>	38
Figure 2-22 : <i>Poutre stratifiée CFRP (a) Encastrée des deux côtés (b) Encastrée libre [56, 57]</i>	42
Figure 3-1: <i>Organigramme d'un AG standard</i>	47
Figure 3-2: <i>Principe général des algorithmes génétiques</i>	48
Figure 3-3 : <i>Structure d'une population constituée d'individus</i>	49
Figure 3-4 : <i>Structure d'un chromosome</i>	49

Figure 3-5 : les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique.	51
Figure 3-6 : Illustration schématique du codage des variables réelles.	52
Figure 3-7 : Schéma d'un chromosome.	54
Figure 3-8 : Schéma d'une roulette.	55
Figure 3-9 : Croisement à un site.	57
Figure 3-10 : Croisement à k sites.	57
Figure 4-1 : L'organigramme de la méthode de l'énergie de déformation modale.	64
Figure 4-2 : Poutre unidirectionnelle graphite/époxy.	65
Figure 4-3 : Histogrammes de l'indicateur d'endommagement MSEBI.	66
Figure 4-4 : Poutre stratifiée graphite/époxy ($0^\circ/90^\circ_2/0^\circ$).	67
Figure 4-5 : Histogrammes de l'indicateur d'endommagement MSEBI.	68
Figure 4-6 : Organigramme de la méthode FRF (détection).	70
Figure 4-7: Poutre encastree- Libre en matériau composite stratifiée [$0^\circ/90^\circ_2/0^\circ$] graphite/époxyde.	70
Figure 4-8: Tracé de X_{uw} et X_{dw} pour les cas tests A.	71
Figure 4-9 : Tracé de X_{uw} et X_{dw} pour les cas tests B.	72
Figure 4-10 : Tracé de X_{uw} et X_{dw} pour les cas tests C.	73
Figure 4-11 : Tracé de X_{uw} et X_{dw} pour les cas tests D.	73
Figure 4-7 : Organigramme de la méthode FRF (Localisation).	76
Figure 4-13 : Histogrammes de l'indicateur d'endommagement pour le cas test A.	77
Figure 4-14 : Histogrammes de l'indicateur d'endommagement pour le cas test B.	78
Figure 4-15 : Histogrammes de l'indicateur d'endommagement pour le cas test C.	78
Figure 4-16 : Histogrammes de l'indicateur d'endommagement pour le cas test D.	79
Figure 5-1 : Organigramme de la méthode force résiduelle modale.	85
Figure 5-2 : Poutre unidirectionnelle en CFRP ncastée libre.	85
Figure 5-3 : Indicateur d'endommagement cas test 1.	87
Figure 5-4 : Indicateur d'endommagement cas test 2.	87
Figure 5-5 : Indicateur d'endommagement cas test 3.	88
Figure 5-6 : Indicateur d'endommagement cas test 4.	88
Figure 5-7 : Indicateur d'endommagement cas test 5.	89

Figure 5-8 : <i>Organigramme général de l'algorithme génétique classique pour la détection d'endommagement.</i>	90
Figure 5-9 : <i>Pseudo code pour la localisation et la quantification d'endommagements.</i>	91
Figure 5-10 : <i>Convergence de l'AG pour le cas test 1.</i>	92
Figure 5-11 : <i>Cas test 1.</i>	92
Figure 5-12 : <i>Convergence de l'AG pour le cas test 2.</i>	93
Figure 5-13 : <i>Cas test 2.</i>	93
Figure 5-14 : <i>Convergence de l'AG pour le cas test 3.</i>	94
Figure 5-15 : <i>Cas test 3.</i>	94
Figure 5-16 : <i>Convergence de l'AG pour le cas test 4.</i>	95
Figure 5-17 : <i>Cas test 4.</i>	95
Figure 5-18 : <i>Convergence de l'AG pour le cas test 5.</i>	96
Figure 5-19 : <i>Cas test 5.</i>	96

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : <i>Principales méthodes de détection d'endommagement.</i>	15
Tableau 2-1 : <i>Types de problèmes rencontrés selon l'étape d'élaboration d'une pièce en composites.</i>	27
Tableau 2-2 : <i>Propriétés mécaniques et géométriques d'une poutre CFRP.</i>	42
Tableau 2-3 : <i>Fréquences mesuré par l'expérimental et numérique.</i>	42
Tableau 3-1 : <i>Exemple de sélection par rang pour 6 chromosomes.</i>	55
Tableau 4-1 : <i>Récapitulatif des cas test sur la structure unidirectionnelle.</i>	65
Tableau 4-2 : <i>Fréquences naturelles des structures saines et endommagées (cas de test 3).</i>	65
Tableau 4-3 : <i>Récapitulatif des cas test sur la poutre stratifiée.</i>	67
Tableau 4-4 : <i>Fréquences naturelles des structures saines et endommagées (cas de test 2).</i>	67
Tableau 4-5: <i>Cas test étudiés.</i>	71
Tableau 5-1: <i>Les propriétés de la poutre CFRP.</i>	86
Tableau 5-2 : <i>Récapitulatif des cas tests étudiés.</i>	86
Tableau 5-3: <i>Fréquences naturelles de la poutre saine et endommagée.</i>	86

Introduction générale.

Introduction générale

L'utilisation des poutres, en matériaux composites, est très répandue dans divers domaines tels l'aérospatiale, l'aéronautique, l'industrie automobile, et l'industrie sportive. Ces matériaux sont prisés en raison de leur haute résistance et rigidité spécifique, de même que pour certaines de leurs propriétés mécaniques comme la résistance à la corrosion par exemple. De plus, l'utilisation des matériaux composites peut être avantageuse par rapport aux matériaux traditionnels, car elle permet la conception de structures aux propriétés globales qui répondent mieux aux besoins particuliers d'une situation.

Cependant, que ce soit au cours de leur fabrication ou pendant leur utilisation, des défauts sont susceptibles d'apparaître. Ces défauts engendrent une concentration de contraintes et peuvent avoir de lourdes conséquences. De ce fait, le contrôle continu de ces derniers est devenu une nécessité pour garantir l'intégrité, la fiabilité et la sécurité de la structure.

De nombreuses techniques de contrôle non destructif (CND) sont utilisées ou développées. Ces dernières sont très utilisées car elles permettent de vérifier l'intégrité des structures sans les altérer, mais elles sont limitées par leur incapacité à contrôler la structure en continu, aussi ces méthodes ne peuvent pas être utilisées sur de grandes structures, sans connaître, a priori, l'endroit de la défaillance. Les méthodes de détection d'endommagement, basées sur des données vibratoires, sont apparues pour maîtriser ces difficultés.

Les avancées technologiques, en matériel de mesures et informatiques, ont largement contribué aux récentes améliorations dans la détection et la localisation des endommagements par les essais vibratoires. L'idée de base dans toutes les techniques de détection d'endommagement, basées sur les essais vibratoires, réside dans le fait que les paramètres modaux (fréquence, coefficients d'amortissement, déformées propres) mesurés sont fonctions des propriétés physiques de la structure (rigidité, masse, amortissement). La présence de défauts dans une structure provoquent des changements dans les propriétés mécaniques et dynamiques de la structure. Ces changements sont utilisés pour détecter et localiser l'endommagement, grâce à la mise en œuvre des indicateurs d'analyse vibratoire.

Ces différentes méthodes ont permis certes de résoudre les problèmes de détection et de localisation des défauts dans les structures, l'inconvénient principal de ces méthodes réside dans leur incapacité à quantifier les endommagements. Pour améliorer la précision de détection et de localisation ainsi de quantifier les défauts dans des structures poutres en

matériaux composites, nous envisageons dans le contexte de notre travail de thèse, de mettre en œuvre une approche pour la surveillance, le diagnostic et le suivi de l'état d'endommagement des structures dans le cadre de la maintenance préventive, basée sur l'analyse vibratoire, couplée à des algorithmes AGs.

Les méthodes d'optimisation, par algorithmes génétiques, ont été reconnues comme des techniques de recherches intelligentes pour le contrôle des structures, en raison de leur attractivité par rapport aux procédés classiques (ne nécessitant pas une recherche de solution à l'intérieure de tout l'espace), ainsi que leur capacité à améliorer la sensibilité des résultats pour des endommagements avec faible pourcentage.

Le travail de cette thèse est subdivisé en cinq chapitres.

Le premier chapitre propose une revue de littérature sur les méthodes et outils de détection et de localisation des endommagements dans des structures, basées essentiellement sur l'analyse vibratoire. Pour identifier les endommagements, en utilisant les données vibratoires, les chercheurs utilisent plusieurs paramètres différents, à savoir : fréquences propres, modes propres, courbures modales, la réponse fréquentielle...

Le second chapitre comporte deux parties, la première est consacré à la présentation des différents types de défauts rencontrés dans les structures en matériaux composites multicouches. Quant à la deuxième partie nous avons présenté deux types d'éléments finis utilisés dans la modélisation des poutres unidirectionnelles et stratifiées. Des exemples de poutres avec différente condition aux limites ont été traités et les résultats ont été confrontés avec ceux de la littérature.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté : les algorithmes génétiques (AG), la terminologie propre aux algorithmes génétiques, les différentes étapes de l'algorithme génétique, les concepts et formalismes des opérateurs génétiques ainsi que les étapes importantes de l'algorithme génétique.

Le quatrième chapitre est dédié à la description de deux méthodes de détection et de localisation des endommages basées sur les données vibratoires, la première est basée sur la réponse fréquentielle et la deuxième sur l'énergie de déformation modale. Pour évaluer les performances de ces méthodes, des cas tests de simulations numériques sur deux types de structures, poutre unidirectionnelle et stratifiée, sont considérés. Les résultats obtenus sont illustrés vers la fin du chapitre.

Dans le dernier chapitre, la méthode basée sur la force résiduelle modale a été décrite et les résultats de son application pour la détection et la localisation des endommagements ont été illustrés et discutés. Afin de quantifier l'ampleur des endommagements, nous avons proposé un couplage des algorithmes génétiques avec la méthode étudiée. L'efficacité de cette approche a été testée par un exemple d'une structure poutre encastré-libre.

Enfin, une conclusion générale et des perspectives d'extension de notre contribution pour des travaux de recherche ultérieurs, parachève cette thèse.

Chapitre 1 : Etat de l'art sur les méthodes d'identification d'endommagements.

1 Etat de l'art sur les méthodes d'identification d'endommagements

1.1 Introduction :

Il est d'usage avant et après la mise en service d'une structure de la tester dans son intégrité. Le contrôle non destructif (CND) est le plus largement utilisé, de par son caractère non invasif qui laisse la structure intacte. Plusieurs méthodes de contrôle non destructif sont utilisées avec succès dans plusieurs domaines de l'industrie, telles que les ultra-sons, la radiographie par rayon X et le test par émission acoustique. Cependant, ces méthodes ne nous permettent pas de surveiller la structure en continu pendant son service. Le développement technologique, dans les domaines de capteurs, acquisition de données, le traitement du signal et l'outil informatique, a favorisé la surveillance de la structure en temps réel, et a fait que l'émergence de ce type de contrôle soit l'évolution naturelle des méthodes traditionnelles. La surveillance de l'état de la structure (Structural Health Monitoring « SHM ») peut être classée dans la littérature parmi les méthodes de contrôle non destructif en termes de technologie; elle diverge avec les méthodes traditionnelles dans le but qui est l'automatisation et le contrôle continu, en temps réel, de la structure en service, avec un minimum d'intervention humaine.

En particulier dans le domaine des transports (ferroviaires, automobiles, aéronautiques), l'accroissement de l'utilisation des matériaux composites et le renforcement des normes de sécurité conduisent à l'obligation d'un contrôle périodique accru des structures. Ce contrôle a notamment pour objectif d'en prévenir toute défaillance due à une perte de ses caractéristiques mécaniques induites par de l'endommagement.

La littérature met en évidence de nombreuses méthodes possibles de contrôle non destructif de l'endommagement au sein des matériaux et des structures. Cependant, le cadre de nos exigences, dans lequel on inscrit les notions de coût, de rapidité d'une mesure réalisée obligatoirement in situ (afin de réduire les coûts d'immobilisation) et d'adaptation aux composites, fait que le nombre des techniques envisageables est finalement assez réduit. Ainsi, les méthodes fondées sur le principe de la thermographie infrarouge, de l'émission acoustique, de la méthode EMIR (ElectroMagnetic InfraRed) et de l'imagerie micro-onde conduisent, en général, assez aisément à une expertise adaptée à notre demande.

La détection de défauts par des méthodes non destructives est devenue un facteur majeur d'intérêt dans de nombreux domaines industriels, pour des raisons économiques et de fiabilité des systèmes.

Les méthodes non destructives de détection de défauts peuvent s'appuyer sur la variation des fréquences propres induites par la fissure[1] ou sur la variation de l'amplitude des modes propres ou de la fonction de réponse fréquentielle[2]. Un état de l'art des principales méthodes de détection est proposé par Montalvao[3].

La détection d'endommagements à partir de mesures vibratoires nécessite l'extraction de paramètres caractéristiques de la structure à partir d'échantillons temporels périodiquement espacés, ainsi que l'analyse de ces paramètres caractéristiques afin de déterminer à chaque instant l'état d'intégrité du système. Si l'on dispose d'un modèle par éléments finis (EF) de la structure, la détection et la localisation du dommage peuvent être réalisées à partir de méthodes de correction paramétriques de modèles (recalage)[1]. Une autre méthode consiste à identifier toutes modifications des paramètres modaux (fréquences naturelles, modes propres et amortissement)[2].

1.2 Contrôle continu de l'état de la structure :

Les méthodes de détection de l'endommagement ont contribué au développement de la SHM (Structural Health Monitoring). L'endommagement de la structure peut être défini comme un

changement introduit au système, qui affecte ses performances présentes et futures [1]. Rytter[2] l'identification des endommagements peut être classée en quatre niveaux :

- Niveau 1 : détermination de l'existence de l'endommagement dans la structure ;
- Niveau 2 : détermination du type d'endommagement et de sa localisation ;
- Niveau 3 : quantification de la sévérité de l'endommagement ;
- Niveau 4 : prédiction de la durée de vie en service restante, en se basant sur le suivi de l'endommagement et des conditions de service.

Jusqu'à maintenant, la plupart des méthodes d'identification d'endommagements basées sur la réponse vibratoire ne permettent que des identifications de niveau 1 et de niveau 2[1].

Le développement typique du diagnostic de l'endommagement, est le fruit d'une collaboration entre des domaines multidisciplinaires, tels que la technologie des capteurs, les matériaux intelligents, le traitement du signal, les systèmes intégrés, l'interprétation des données...etc.

Les méthodes de détection des endommagements basées sur des données vibratoires tiennent une part importante de la recherche dans le domaine de la SHM ces dernières années. Le nombre important d'articles présentés, dans les conférences dédiées à la SHM, montre qu'une multitude de techniques d'acquisition de données et d'algorithmes de diagnostic ont été développées, et que plusieurs techniques ont des applications réelles dans les structures du génie civil, l'aéronautique, les plateformes de pétrole offshore et les pipelines souterrains... etc.

1.2.1 Méthodes basées sur des données vibratoires

La vibration se réfère usuellement à un mouvement périodique dans le domaine élastique de la structure autour d'une position d'équilibre. Le fondement des méthodes basées sur des données vibratoires est que l'endommagement altère la raideur, la masse ou l'amortissement de la structure, ce qui affecte la réponse dynamique de cette dernière, comme les fréquences naturelles, déformées propres et les coefficients d'amortissement. Donc, intuitivement, ce changement dans les propriétés dynamiques est utilisé pour localiser et quantifier l'endommagement dans la structure.

1.2.2 Fréquences naturelles

De tous les paramètres dynamiques, les fréquences naturelles sont les plus faciles à mesurer. L'inspection de changement de fréquences naturelles pour la détection d'endommagement

était l'approche majeure dans les méthodes basées sur les données vibratoires pendant les décennies passées, où l'analyse modale expérimentale n'était pas encore établie, et elle, l'inspection de changement de fréquences naturelles, captivait la plupart des recherches dans le domaine.

Salawu 1997 [4] a résumé 65 articles sur la détection d'endommagements à partir du changement des fréquences.

L'investigation systématique de ce changement, dans la détection d'endommagement, peut être attribuée à *Adams et al.*[3] et *Cawley et Adams*[5]. En partant du principe que le changement de raideur est indépendant de celui des fréquences, le rapport de changement de fréquences en deux modes est fonction seulement de la localisation de l'endommagement. Des expériences ont été faites sur une plaque d'aluminium avec un défaut sous forme d'un trou rectangulaire, et sur une plaque composite en polymère renforcé de fibres de carbone, avec des défauts sous formes de fissures et d'écrasement. Avec un modèle éléments finis, de bons résultats furent obtenus en localisant l'endommagement sur la plaque d'aluminium, par contre, pour la plaque composite les résultats n'étaient pas concluants.

Stubbs et Osegueda[6, 7] ont développé une approche de détection de l'endommagement, à partir du changement de fréquences naturelles, qui est basée sur le critère de *Cawley-Adams*. Par la suite *Friswell et al.*[8] ont aussi développé ce critère en introduisant des analyses statistiques sur les scénarios d'endommagement.

Palacz et Krawczuk[9] ont comparé différentes méthodes, basées sur les données vibratoires, incluant le critère de *Cawley-Adams*, pour la détection d'endommagement sur des poutres fissurées, ils indiquent dans leur travail que le changement dans les deux premières fréquences sans erreurs de mesure, et les quatre premières fréquences avec erreurs de mesure peuvent détecter avec succès la position et la profondeur de la fissure.

Cependant, comme mentionné par *Doebbling et al.*[1] et *Friswell et Penny*[10], l'identification de l'endommagement en utilisant le changement de fréquences naturelles seul a des limitations pratiques dans certaines applications. Par exemple, le changement de fréquences est plus affecté par la température et l'humidité que par l'endommagement dans l'inspection des ponts (*Ferrar et al.*)[11].

En outre, les fréquences naturelles nous informent sur la nature globale de la structure, mais elles sont insensibles aux endommagements naissants, plus spécialement quand ces derniers sont situés dans une région à faibles contraintes.

Messina et al. [12] ont développé un algorithme appelé « Damage Location Assurance Criterion (DLAC) ». L'indicateur DLAC est calculé à partir du vecteur de changement de fréquences expérimental et du vecteur de changement de fréquences théorique dans la région du présumé endommagement. La localisation de l'endommagement est obtenue en comparant les modèles de changement de fréquences. Plus tard, *Messina et al.*[13] ont généralisé l'approche pour des endommagements multiples (MDLAC), en incorporant les déformées propres aux fréquences. Le DLAC a pour expression :

$$DLAC_j = \frac{|\Delta\omega_j^T \delta\omega_j|^2}{(\Delta\omega_j^T \Delta\omega_j)(\delta\omega_j^T \delta\omega_j)} \quad (1.1)$$

avec :

$$\Delta\omega = \frac{\omega_s - \omega_d}{\omega_s} \quad (1.2)$$

Armon et al.[14] ont proposé un classement par rang des modes en changement de fréquences pour détecter des fentes et des fissures dans une poutre, et ils ont démontré que la méthode est efficace même en prenant en considération les erreurs expérimentales et les incertitudes sur le model.

Nicholson et Alnefaie[15] ont introduit un autre paramètre sensible à l'endommagement nommé l'indice du moment modal (Modal Moment Index MMI), qui extrait des paramètres modaux expérimentaux. L'indice a un changement brusque à l'endroit de l'endommagement et peut servir à le quantifier.

En résolvant un problème inverse des trois premières fréquences naturelles, *Chaudhari et Maiti*[16] ont utilisé la technique Frobenius qui gouverne des équations différentielles, et ont obtenu ainsi la localisation du défaut par une approche semi-numérique, tandis que *Chinchalkar*[17] a fait recours à la méthode des éléments finis pour modéliser une modification du premier ordre du problème aux valeurs propres.

Jones et Turcotte [18] ont pris les fréquences d'antirésonance dans un model éléments finis pour détecter les endommagements.

Moser et al.[19] ont étudié l'effet des conditions environnantes sur le changement de fréquences naturelles, ils ont, de la sorte, pu rendre les fréquences naturelles plus efficaces dans la détection d'endommagement.

A. Morassi.[20]présente une technique inverse pour localiser les effets d'entailles dans des poutres en acier en utilisant les changements de fréquence modale. Sous l'hypothèse qu'il n'y a pas de modification de la masse, les changements des fréquences sont corrélés avec des coefficients de Fourier de la variation de rigidité qui est inconnue. Cette méthode a donné des résultats satisfaisants aussi bien pour la détection que pour la localisation en espace des défauts.

Une raison importante d'utilisation des techniques d'identification d'endommagements basées sur les fréquences est que les fréquences propres sont sensibles aux différents types d'endommagement (local ou global); et elles peuvent être déterminées facilement dans beaucoup d'applications en utilisant un nombre réduit de capteur. Cependant, la difficulté est qu'elles peuvent être facilement influencées par des paramètres de l'environnement comme la température ou l'humidité ce qui pose un problème pour la détection de l'endommagement des structures réelles. Selon S.G. Creed [21],il est nécessaire que le changement des fréquences propres causé par l'endommagement soit supérieur à 5% pour faire confiance aux résultats de détection. Cependant, des changements significatifs des seules fréquences n'impliquent pas systématiquement l'existence d'un endommagement puisque dans certains cas, on a observé en une seule journée des variations des fréquences dues aux conditions ambiantes de plus de 5% pour des ponts en béton ou en acier, A.E. Aktan[22].

1.2.3 Déformées propres

Les déformées propres sont les descriptions spatiales des amplitudes à chacune des fréquences de résonance. Le MAC (Modal Assurance Criterion), et les variantes qui lui sont reliées, a été développé durant les dernières décennies, comme un indicateur pour explorer l'information modale spatiale (Allemang)[23]. L'expression de l'indicateur MAC s'écrit :

$$MAC_{ij} = \frac{|\sum_{k=1}^n [\phi_s]_k^i [\phi_d]_k^j|^2}{\sum_{k=1}^n ([\phi_s]_k^i)^2 \sum_{k=1}^n ([\phi_s]_k^j)^2} \quad (1.3)$$

West [24] est probablement le premier à avoir proposé une investigation systématique en utilisant le MAC comme indicateur statistique, qui fait la corrélation entre les déformées propres d'une structure saine et une autre endommagée sans passer par la méthode des éléments finis. Un autre critère largement utilisé est le COMAC (Coordinate Modal Assurance Criterion), qui fait l'identification des coordonnées où un ensemble de deux vecteurs propres ne se correspondent pas (Lieven et Ewins)[25]. Le COMAC s'écrit :

$$COMAC_{ij} = \frac{|\sum_{k=1}^m [\phi_s]_k^i [\phi_d]_k^j|^2}{\sum_{k=1}^m ([\phi_s]_k^i)^2 \sum_{k=1}^m ([\phi_s]_k^j)^2} \quad (1.4)$$

En outre, *Ratcliffe*[26] a proposé une méthode de détection d'endommagement basée seulement sur les déformées propres. La localisation peut être effectuée à partir d'une approximation aux différences finis de l'opérateur Laplacien aux vecteurs propres.

Khan et al.[27] ont utilisé un scanne continu avec laser Doppler vibromètre pour surveiller les discontinuités dans les déformées propres pour détecter l'endommagement.

Contrairement aux fréquences, l'estimation des déformées propres requiert la mesure dans chacun des points où il faut faire l'estimation, posant des difficultés pratiques dues au nombre limité de capteurs et à la capacité d'avoir une mesure fiable. En plus, l'estimation des vecteurs propres à partir de la réponse fréquentielle, même en l'absence d'endommagement, peut devenir problématique quand la structure a une configuration complexe. C'est une méthode qui dépend des techniques mises en œuvre ; la faisabilité et la fiabilité sont affectées par le type de structure, l'étendue de l'endommagement, la façon d'extraire les vecteurs propres et les algorithmes utilisés pour le traitement des données.

1.2.4 Méthodes basées sur la courbure modale

Plutôt que d'utiliser les déformées modales directement pour obtenir des informations sur le défaut (la source des changements vibratoires), une autre façon est d'étudier leurs dérivées secondes ou les courbures modales. Pour le cas d'une poutre, la relation entre la courbure et le moment fléchissant en un point s'écrit : $v''(x) = \frac{M(x)}{EI(x)}$ où $v(x)$ est le déplacement transversal.

Les courbures modales peuvent être calculées à partir des déformées modales par la formule suivante :

$$\phi''_j(i) = \frac{\phi_j(i+1) - 2\phi_j(i) + \phi_j(i-1)}{l^2} \quad (1.5)$$

où j est le numéro du mode, i le numéro du noeud et l la distance entre 2 noeuds.

Plusieurs études ont confirmé que la courbure modale est un indicateur plus sensible que les coefficients MAC et CoMAC des déformées modales (Pandey, Biswas Samman 1991) [28].

Helfrick et al. [29] ont présenté une autre technique utilisant des courbures modales pour l'identification d'endommagement. Les courbures modales sont approximées par l'équation 1.5. Ils ont proposé l'indicateur d'endommagement défini par :

$$D_j(i) = P_j(i) - \phi_j''(i) \quad (1.6)$$

où $P_j(i)$ est la valeur au point i d'un polynôme de degré 3 qui passe par 4 points voisins $\phi_j''(i-2)$, $\phi_j''(i-1)$, $\phi_j''(i+1)$ et $\phi_j''(i+2)$. Ils ont appliqué cette méthode sur des données expérimentales d'une poutre en porte-à-faux. Les résultats de l'identification de l'endommagement dépendent évidemment de l'importance du défaut.

D'autres applications des méthodes utilisant des courbures modales sont présentées par Maeck et al. [30, 31], Hamey et al [32].

1.2.5 Amortissement

Malgré que l'estimation de la matrice d'amortissement par les fonctions de réponse fréquentielles (*Chen et al.*) [33], input/output data (*Fritzen*) [34] et plusieurs autres approches, ont été un thème de recherche dans le domaine d'identification des systèmes mécaniques pendant plusieurs années. La détection d'endommagement basée seulement sur le changement des paramètres d'amortissement n'a pas été intensément étudié, comparé aux méthodes basées sur les fréquences naturelles et les vecteurs propres. Cela peut être dû à l'existence de différents types d'amortissement ainsi qu'à l'incertitude relativement haute dans son estimation.

Tandis qu'un accroissement anormal des coefficients d'amortissement, ce qui suggère plus de dissipation d'énergie, peut indiquer un endommagement de la structure, comme observé expérimentalement dans presque tous les cas (*Morgan et Osterle*) [35] et (*Napolitano et Kosmatka*) [36]. L'endommagement peut aussi résulter d'une diminution d'amortissement ou d'une augmentation précédée d'une diminution (*Salane et Baldwin*) [37] et (*Hearn et Testa*) [38]. *Williams et Salawu* [39] ont revu des études en génie civil, et ont conclu que l'amortissement seul ne peut pas donner une véritable signification à la détection d'endommagement (localisation et quantification).

Par contre, le changement d'amortissement peut détecter l'endommagement là où les méthodes conventionnelles basées sur le changement de fréquences et de déformées propres ne sont pas sensibles. *Modena et al.* [40] ont démontré que des microfissures causent des changements négligeables dans les fréquences naturelles, mais une augmentation

considérable d'amortissement, ce qui peut être utilisé pour localiser la fissure. Les techniques de détection basées sur la mesure d'amortissement sont capables de nous renseigner seulement sur l'existence de l'endommagement.

1.2.6 Fonctions de réponse fréquentielle (FRF)

Les fonctions de réponse fréquentielle décrivent le domaine fréquentiel du système, et sont très utilisées dans la dynamique des structures et l'identification des systèmes mécaniques pour l'extraction des fréquences de résonance, l'estimation des vecteurs propres et des coefficients d'amortissement, et vérifier les matrices de masse, de raideur et d'amortissement. Plusieurs méthodes de détection d'endommagement basées sur l'évaluation des paramètres modaux sont reliées, directement ou indirectement, à la FRF. Cela implique que l'information contenue dans les données FRF, peut être directement utilisée pour détecter l'endommagement.

Wang et al.[41] ont développé un algorithme pour localiser et quantifier l'endommagement en utilisant directement les données FRF mesurées. L'indicateur d'endommagement, qui indique la position et la magnitude de ce dernier, est calculé à partir des perturbations dans les équations de la FRF. *Mottershead et al.*[42] ont exploré la possibilité de détection d'endommagement, en utilisant des équations FRF rationnelles, basée sur l'observation que l'endommagement peut augmenter le comportement non-linéaire d'une structure. Des techniques ont été développées pour extraire ces distorsions des données FRF, afin de localiser et quantifier l'endommagement (*Vanhoenacker et al.*)[43].

1.2.7 Energie de déformation modale

Yang et al.[44] ont utilisé la propriété de l'invariance d'énergie de déformation modale élémentaire pour localiser l'endommagement. Dans cette méthode, l'énergie de déformation modale est décomposée en deux parties qui définissent deux indicateurs d'endommagement. Le premier est le rapport de changement d'énergie de déformation modale de compression et le second représente le rapport de changement d'énergie modale de torsion. L'énergie de déformation modale a été obtenue par des formes modales incomplètes et des matrices de raideur élémentaire. Plusieurs cas d'endommagement ont été simulés sur une plateforme pétrolière offshore. D'après les résultats obtenus, les auteurs ont montré l'efficacité et la précision de la méthode dans la détection d'endommagement sur des structures complexes.

Brehm et al. [45] ont développé une approche basée sur un modèle purement mathématique enrichi par des informations physiques obtenues par un modèle numérique basée sur

l'énergie de déformation modale, ils ont ainsi pu localiser et quantifier l'endommagement. *Dixit et al.*[45] ont présenté une méthode basée sur l'énergie de déformation modale obtenue à partir des fréquences naturelles et des déformées propres correspondantes, afin de localiser et de quantifier des endommagements sur des poutres, sous différentes conditions aux limites, et ils ont obtenu des résultats expérimentaux qui démontrent la robustesse de leur approche.

1.2.8 Flexibilité modale

L'idée des ces méthodes est d'utiliser la matrice de flexibilité pour estimer le changement de la structure. La matrice de flexibilité est définie comme l'inverse de la matrice de rigidité, chaque colonne représente alors le déplacement causé par une force unité appliquée en un degré de liberté. La matrice de flexibilité peut être estimée à partir des modes propres normalisés par rapport à la matrice de masse $(\Phi^T M \Phi) = I$ et des fréquences propres correspondantes :

$$F = \Phi \Lambda^{-1} \Phi^T = \sum_{j=1}^n \frac{1}{\omega_j^2} \phi_j \phi_j^T \quad (1.7)$$

où : $\Lambda^{-1} = \text{diag}(\omega_i^2)$ est la matrice des valeurs propres. L'endommagement peut être détecté en comparant la matrice de flexibilité estimée à partir des modes mesurés de l'état endommagé avec celle estimée à partir des modes de l'état sain qui peuvent être déterminés avec la méthode des éléments finis.

La matrice de flexibilité complète exige la mesure de tous les modes et fréquences propres de la structure. En pratique, la matrice de flexibilité n'est approximée qu'avec un certain nombre réduit des premiers modes. A cause de la relation inverse avec le carré des fréquences, la matrice de flexibilité estimée converge rapidement avec l'augmentation de la valeur des fréquences. Donc, une bonne estimation de la matrice de flexibilité peut être obtenue avec quelques uns des premiers modes (*Pandey et Biswas* 1994 [46]) et l'identification de l'endommagement en utilisant la matrice de flexibilité est plus sensible aux changements des modes en basse fréquence (*Maeck* 2003[47]). L'utilisation de la matrice de flexibilité comme indicateur d'endommagement a donné de bon résultats. Cependant, cette technique est appliquée plutôt sur des cas tests numériques ne présentant qu'un seul défaut. *Zhao et DeWolf*[48] ont comparé différents indicateurs d'endommagement tels que les fréquences propres, les modes propres et les flexibilités modales dans un cas test numérique de structure à 5 degrés. Ils ont trouvé que la flexibilité modale est le critère le plus sensible au défaut.

Li et al. [49] ont présenté une nouvelle approche basée sur le changement de la matrice de flexibilité modale généralisée, pour localiser et quantifier des endommagements. En comparaison avec la matrice de flexibilité modale, la matrice de flexibilité modale généralisée réduit l'effet de troncature des modes d'ordre supérieur.

Kazemi et al. [50] ont utilisé la variation de la flexibilité modale pour détecter des défauts sur des structures plaques minces. L'indicateur d'endommagement est formulé à partir de la matrice de flexibilité modale et des équations différentielles de variation des efforts.

Reynders et al. [51] ont proposé une méthode basée sur la flexibilité quasi statique. La matrice de flexibilité modale est combinée avec des forces virtuelles qui causent des contraintes non nulles sur de petites parties de la structure, où de possibles changements de raideur sont à chercher. Ils ont démontré que, si la relation contraintes-déformations est proportionnelle, le rapport entre certaines combinaisons de déformations avant et après endommagement, fait apparaître un changement de raideur, égal à l'inverse de la raideur locale. La méthode est appelée flexibilité locale.

Le tableau 1.1 donne un résumé des différentes méthodes utilisées dans la détection d'endommagement en utilisant des données vibratoires.

Catégorie		Méthodologie
Paramètres modaux	Fréquences naturelles	Changement de fréquences propres
		Optimisation de la force résiduelle
	Déformées modales	Changement de déformées modales
		Energie de déformation modale
		Dérivées des déformées propres
Méthodes matricielles	Basée sur la raideur	Techniques d'optimisation
		Recalage du modèle
	Basée sur la flexibilité	Mesure de la flexibilité dynamique
Autres techniques		Analyse temporelle
		Evaluation des fonctions de réponse fréquentielle FRF

Tableau 1-1 : Principales méthodes de détection d'endommagement.

1.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue différentes méthodes de contrôle non destructif, en faisant apparaître leurs potentialités et limites, ensuite nous nous sommes intéressés aux méthodes de détection d'endommagement basées sur des données vibratoires, en les classifiant par catégorie. Dans le chapitre suivant, nous développerons le modèle éléments finis que nous utiliserons pour le calcul des paramètres modaux des structures poutres unidirectionnelle et stratifiée, nécessaires à l'application des méthodes d'identification d'endommagements étudiées.

Chapitre 2 : Mécanismes d'endommagement et modélisation des composites stratifiés.

2 Mécanismes d'endommagement et modélisation des composites stratifiés

2.1 Introduction :

Lors de leur vie en service, les pièces peuvent être soumises à diverses sollicitations mécaniques dont les effets peuvent être aggravés par le facteur temps ou par un environnement plus ou moins agressif. Il est donc important d'avoir une idée sur la manière dont les composites se comportent vis à vis des contraintes mécaniques et du vieillissement.

2.2 Comportementa rupture des matériaux composites

Les pièces peuvent être amenées à s'endommager et se rompre de manière prématurée en service. Le mécanisme de rupture est le résultat d'un processus de déformation non homogène favorisant la propagation d'un endommagement au sein du matériau composite à partir d'une ou plusieurs zones d'amorçage (zone la plus faible, ou contenant des défauts initiaux).

D'une manière générale la fissuration peut résulter :

- Des contraintes mécaniques excessives au mal prises en compte dans le cahier des charges ;

- D'un environnement non adapté (température, milieu oxydant ...)
- D'une combinaison de ces différents paramètres (fissuration en environnement sous contrainte).

2.3 Mécanisme de rupture dans un composite unidirectionnel[52]

La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de divers mécanismes élémentaires :

- la rupture des fibres ;
- la rupture transverse de la matrice ;
- la rupture longitudinale de la matrice ;
- la rupture de l'interface fibre- matrice ;

Généralement, un mécanisme n'est pas isolé, mais divers mécanismes coexistent. Ces mécanismes se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées.

2.3.1 Endommagement des fibres

Dans un matériau composite unidirectionnel soumis à des sollicitations mécaniques la rupture des fibres intervient lorsque la contrainte de traction σ_f dans une fibre atteint la contrainte à la rupture σ_{fu} de la fibre (**Figure 2.1**). La rupture de la fibre produit une concentration de contrainte au voisinage de la rupture, il s'ensuit une redistribution de ces contraintes. Le processus de rupture dépend principalement de la contrainte à la rupture des fibres, de la capacité de la matrice à absorber l'énergie libérée et des propriétés de l'interface fibre- matrice.

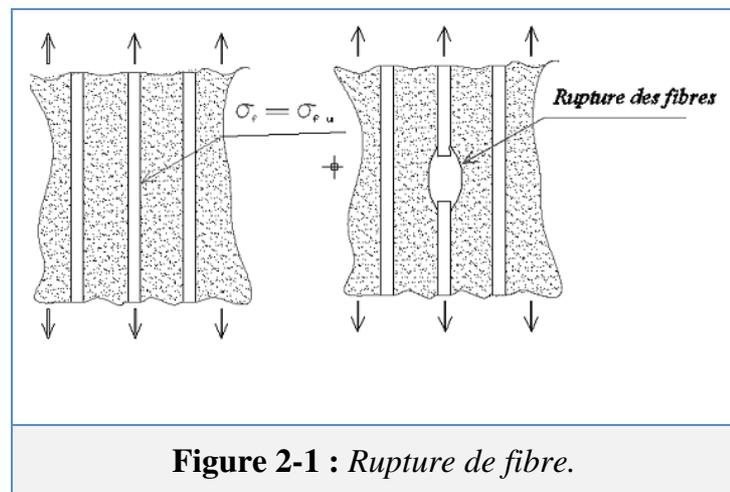
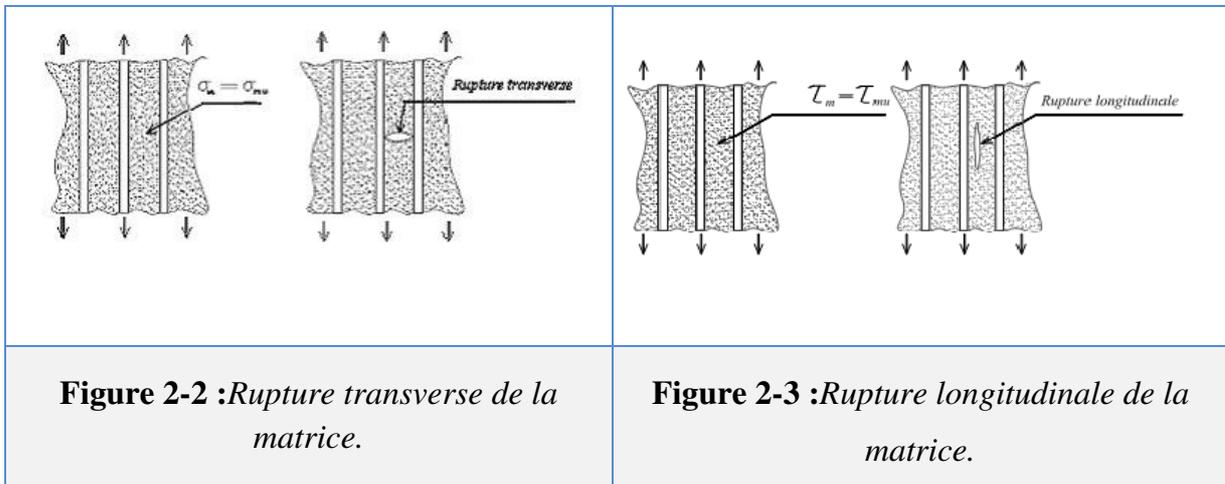


Figure 2-1 : Rupture de fibre.

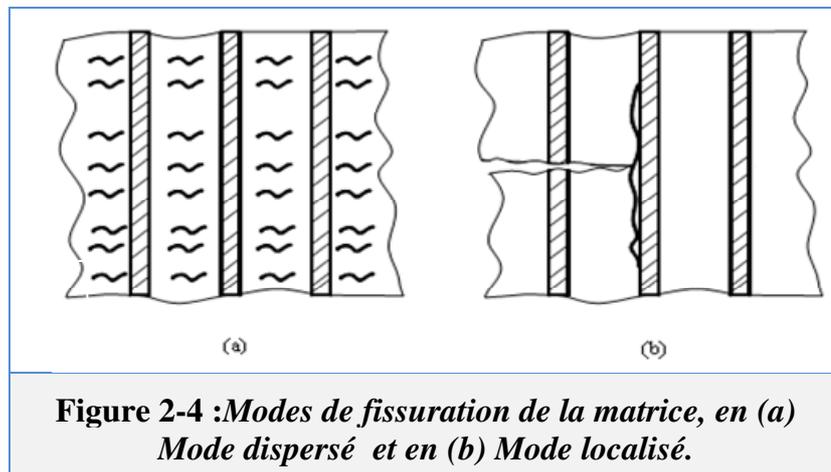
2.3.2 Endommagement de la matrice

Toujours dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à des sollicitations mécaniques, l'endommagement de la matrice de nature organique peut se produire de deux manières : soit

par fissuration transverse lorsque la contrainte en traction σ_m dans la matrice atteint la valeur de rupture σ_{mu} (**Figure 2.2**), ou bien par fissuration longitudinale lorsque la contrainte de cisaillement τ_m de la matrice atteint la valeur de rupture τ_{mu} , généralement au voisinage d'une fibre (**Figure 2.3**).



Lorsque les déformations sont assez faibles (**Figure 2.4-a**), les fissures n'apparaissent que dans la matrice, l'application des charges cyclique fait augmenter leur nombre, on parlera de mode de fissuration dispersé par contre, à des contraintes élevées les fibres se cassent au bout de la longueur, la contrainte de cisaillement à son bout peut devenir suffisante pour causer une décohésion de l'interface, on est en présence du mode de fissuration localisé. (**Figure 2.4-b**)



2.3.3 Endommagement de l'interface

Dans un polymère renforcé par les fibres unidirectionnels, la décohésion de l'interface intervient lorsque la contrainte de cisaillement t dans la matrice atteint la contrainte de décohésion td , et cela arrive quand cette dernière est inférieure à la contrainte en cisaillement à la rupture de la matrice τ_{mu} (**Figure II.5**).

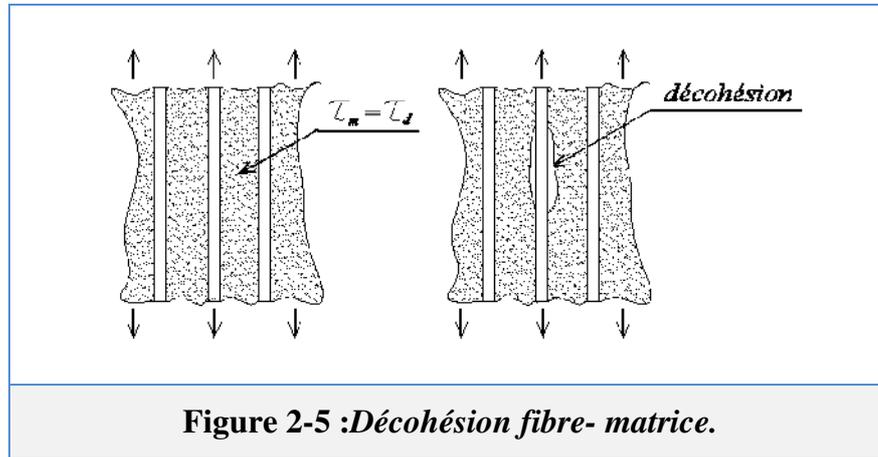


Figure 2-5 :Décohésion fibre- matrice.

2.4 Endommagements des composites stratifiés

2.4.1 Modes de rupture [53]

Ils constituent les trois modes élémentaires de sollicitation d'un matériau quel qu'il soit ; l'état de contraintes d'une pièce soumise à une sollicitation complexe résultera d'une combinaison de ces trois modes simples. (Figure II.6)

- Mode I : les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculairement au plan de fissuration,
- Mode II (glissement droit) : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au front de la fissure,
- Mode III (glissement vis) : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de fissuration.

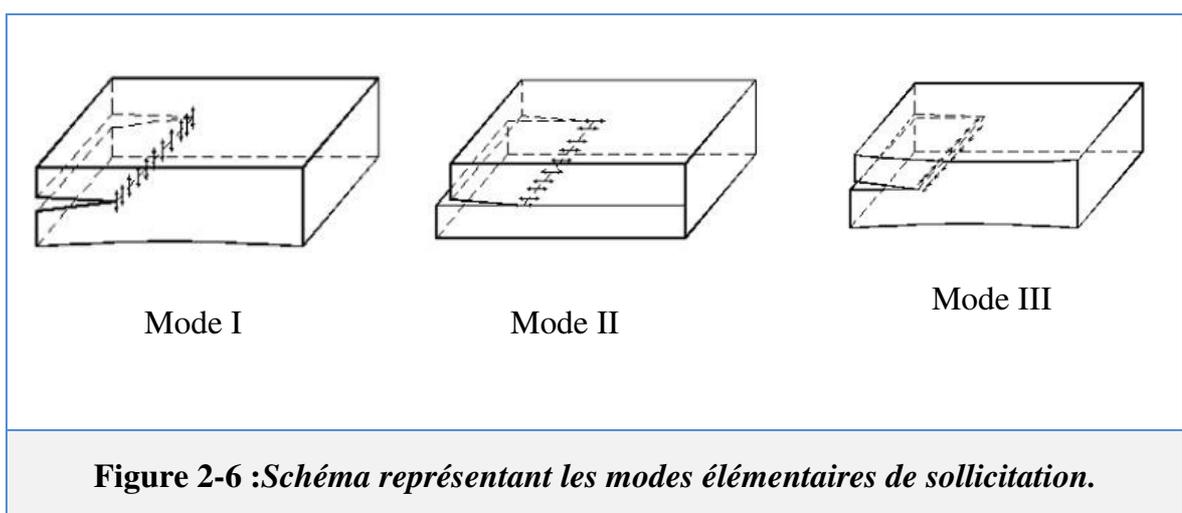


Figure 2-6 :Schéma représentant les modes élémentaires de sollicitation.

2.4.2 Les fissurations [53]

Les matériaux composites stratifiés constitués de couches superposées renforcées de fibres unidirectionnels, de tissus ou de mats peuvent présenter différents types de fissuration

(interlaminaire, intralaminaire, ou translaminaire). Ces termes définissent les plans dans lesquels peuvent se développer les fissures dans les matériaux composites.

- Fissures interlaminaire : la fissure se développe suivant un plan parallèle aux couches de renfort, entre deux couches (**Figure 2.7-a**). Ce type d'endommagement se rencontre lors d'essai en mode I ou II, lors d'essai de flexion entre appuis rapprochés.
- Fissures Intralaminaire : le plan de la fissure est perpendiculaire ou parallèle aux couches de renfort à l'intérieur des couches (**Figure 2.7-b**). Ce mode d'endommagement se rencontre lors d'essai de cisaillement ou de traction transverse sur matériau unidirectionnel par exemple.
- Fissures Trans laminaire : le plan de la fissure est perpendiculaire aux couches et aux renforts (**Figure 2.7-c**). Ce mode d'endommagement est par exemple observé lors d'essai de traction ou compression uniaxial dans le sens des fibres.

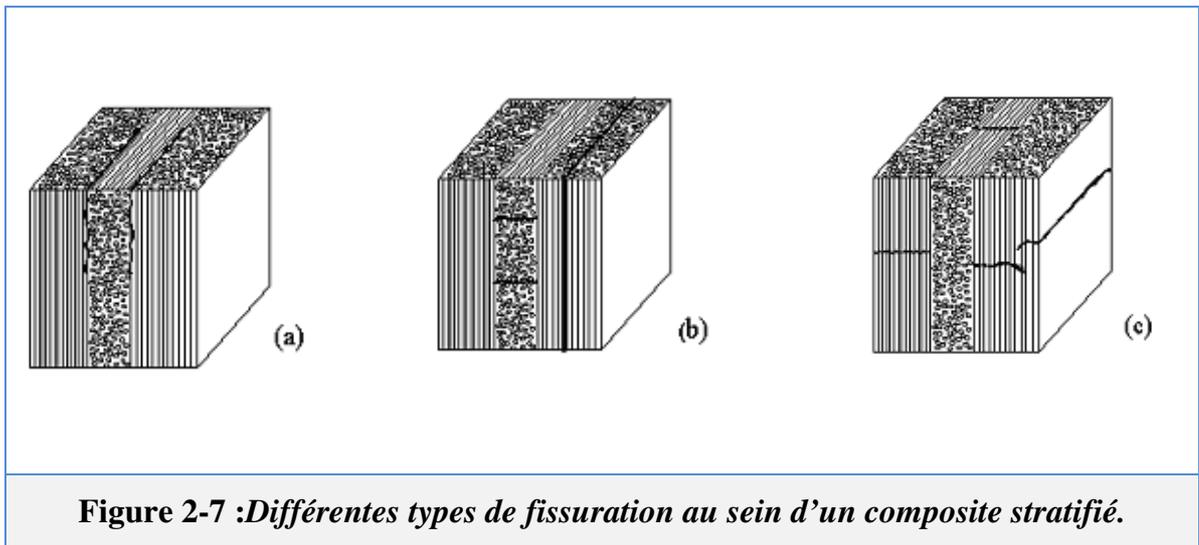
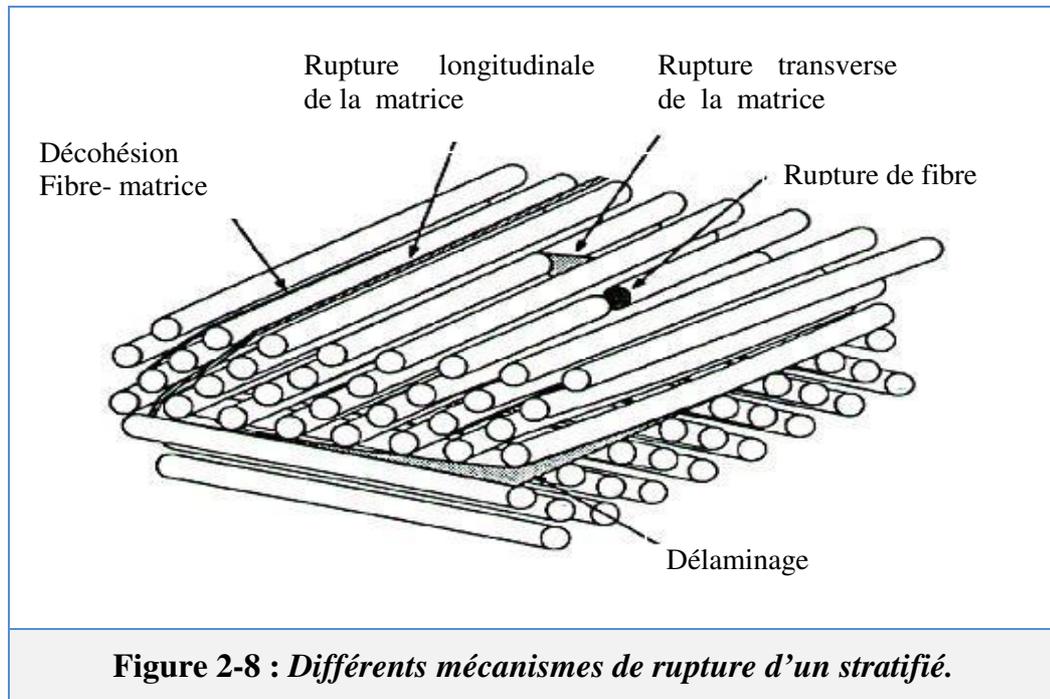


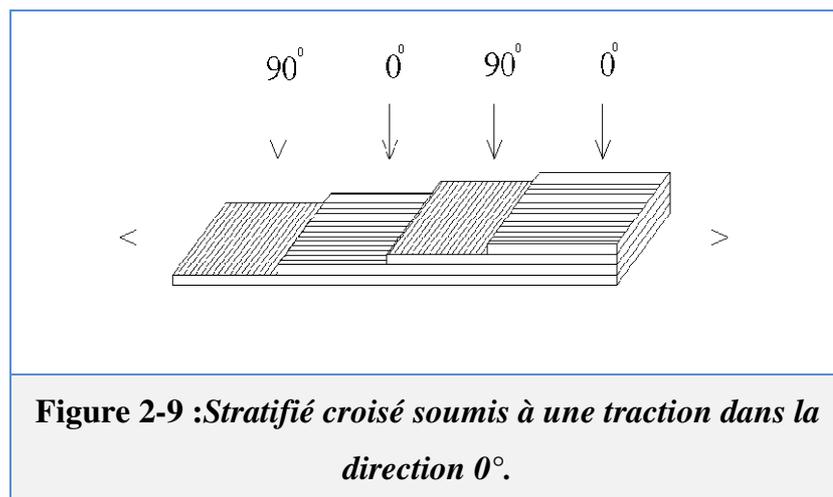
Figure 2-7 :Différentes types de fissuration au sein d'un composite stratifié.

Dans le cas des stratifiés, aux mécanismes élémentaires décrits précédemment (décohésion fibre matrice; rupture longitudinale de la matrice; rupture transverse de la matrice ; rupture des fibres) s'ajoute (**Figure 2.8**) un mécanisme de rupture entre couches, il est dit rupture par délaminage. Les mécanismes de rupture induits dépendent de la nature des constituants, de l'architecture des couches ainsi que du mode de sollicitation mécanique imposé [52].



Dans le cas d'un stratifié croisé soumis à une traction longitudinale dans la direction 0° (Figure 2.9). Cependant comme dans le cas des composites unidirectionnels, les divers mécanismes de rupture peuvent être observés :

- La rupture longitudinale de la matrice et/ou la rupture de l'interface fibre-matrice dans les couches orientées à 90° ;
- la rupture des fibres dans les couches à 0° ;
- la rupture transverse de la matrice dans les couches à 0° ;



Dans le cas d'un stratifié croisé $\pm 45^\circ$ soumis à une traction longitudinale dans la direction 0° (Figure 2.10). La dégradation de ce type de matériau n'est pas une rupture des fibres, mais une fissuration matricielle et un délaminage ; on observe d'abord une rupture longitudinale dans les couches à $\pm 45^\circ$ suivie d'un délaminage entre couches.

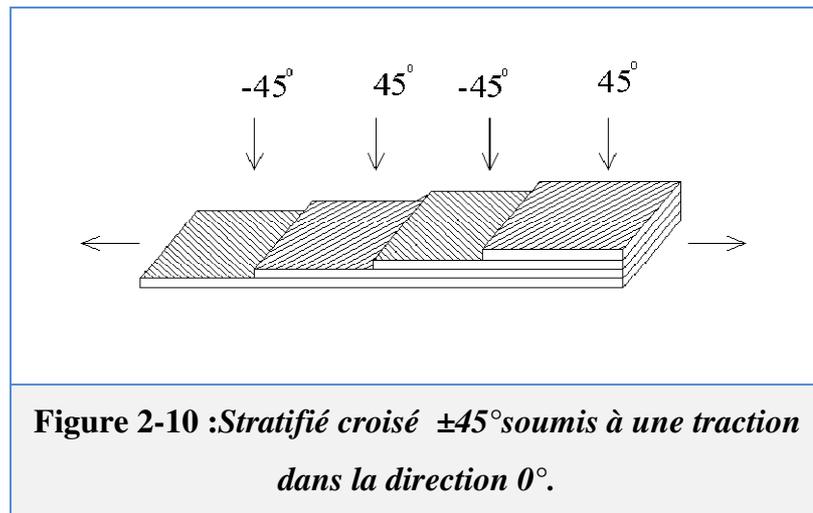


Figure 2-10 : *Stratifié croisé $\pm 45^\circ$ soumis à une traction dans la direction 0° .*

Deux exemples de délaminages sont donnés sur les (Figures 2.11 et 2.12)

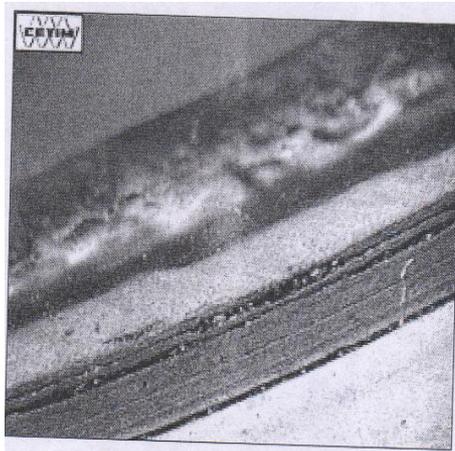


Figure 2-11 : *Délaminage d'une pièce en chloroprène (CR) dû à une pression insuffisante.*

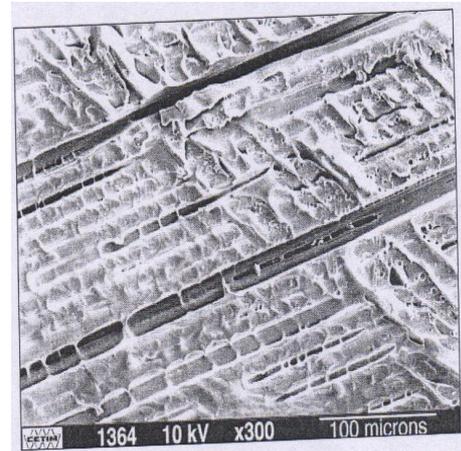


Figure 2-12 : *Rupture d'un tube en verre-polyester orthophtalique $\pm 30^\circ$ réalisé par enroulement filamentaire. Défaut : fibres humides- aspect d'un délaminage entre couches.*

2.5 Propagation de la rupture

Après initiation de la rupture, sa propagation diffère suivant la nature de l'interface fibre-matrice.

2.5.1 Forte adhérence fibre- matrice [52]

Dans le cas d'une adhésion fibre- matrice élevée, la rupture initiée, soit par rupture des fibres, soit par rupture de la matrice, induit en front de fissure des concentrations de contraintes conduisant à une propagation de la rupture successivement dans les fibres et dans la matrice (Figure 2.13-a). La rupture observée est de type fragile (Figure 2.13-b). Il est

également possible d'observer un pontage, par rupture longitudinale de la matrice ou par décohésion fibre- matrice, de deux fissures initiées dans des zones différentes (**Figures 2.13-c et d**).

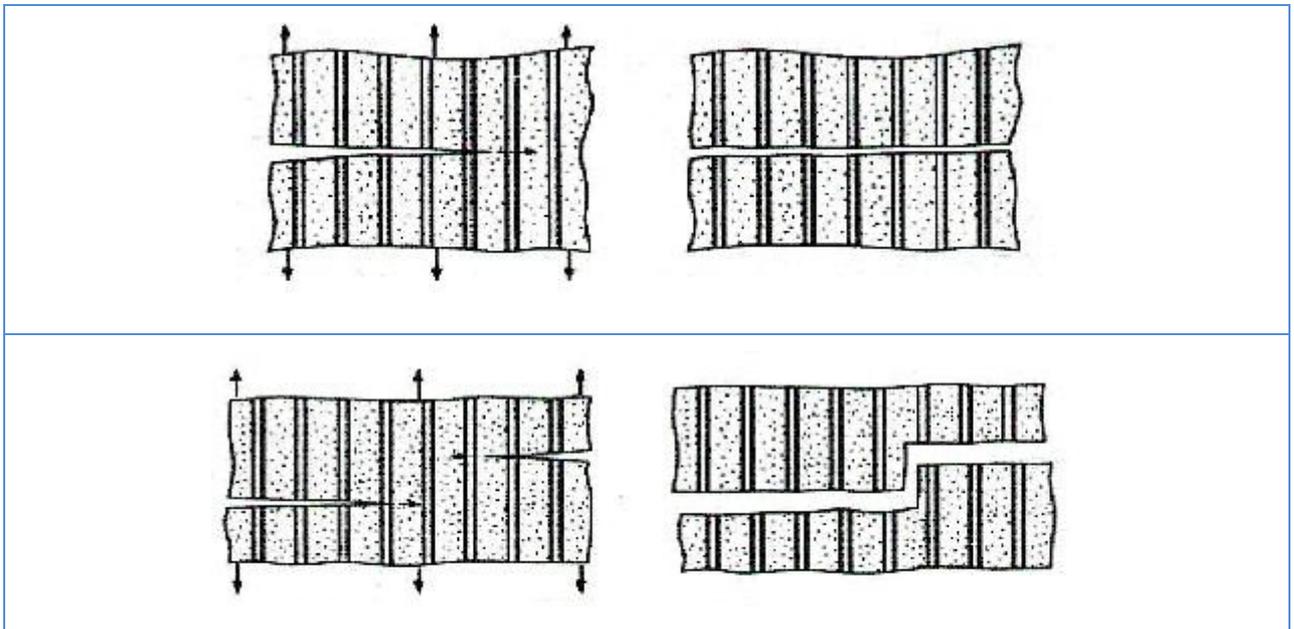


Figure 2-13 :*Propagation de la rupture dans le cas d'une forte adhérence fibre- matrice.*

2.5.2 Faible adhérence fibre- matrice [52]

Dans le cas d'une faible adhérence fibre- matrice, la propagation transverse de la fissuration peut être schématisée de la manière suivante : En tête de fissure, la rupture transverse de la matrice et la rupture des fibres (**Figure 2.14**), sans qu'il y ait rupture des fibres, mais avec décohésion de l'interface fibre-matrice. Dans certains cas, les concentrations de contraintes en tête de fissure peuvent conduire à une décohésion fibre- matrice avant rupture transverse de la matrice. En arrière, l'ouverture de la fissure induit des contraintes élevées dans les fibres pontant la fissure. Ces contraintes provoquent la rupture des fibres à une distance plus ou moins proche de la surface de rupture. La fissure continuant de progresser, les fibres rompues sont extraites de la fissure au fur et à mesure de la progression de la fissure.

Etape	Type de problème
Conception	Cahier des charges Manque de calculs, anisotropie... Dimensionnement insuffisant Assemblage Vibration, usure... Mauvaise prise en compte de l'environnement
Mise en œuvre	Défauts de fabrication moule et outils Défauts d'injection des thermoplastiques Défauts d'extrusion des thermoplastiques Défauts d'élastomères Défauts de composites Défauts de peintures
Mise en œuvre particulière	Fabrication de produits moussés
Traitement de surface	Traitement anti-adhérent de l'usage des silicones
Facteurs humains et économiques en exploitation	Augmentation des cadences Problèmes liés à un poste de travail
Stockage/transport	Conditions climatiques Humidité Vibration
Tableau 2-1 : Types de problèmes rencontrés selon l'étape d'élaboration d'une pièce en composites.	

2.6.2 Défaillances liées à l'utilisation

En fonctionnement, les pièces peuvent être soumises à diverses sollicitations mécaniques dont les effets peuvent être aggravés par le facteur temps ou par un environnement plus ou moins agressif.

Les pièces peuvent être amenées à s'endommager et se rompre en service de manière prématurée. Les cassures en deux ou plusieurs morceaux sont le résultat d'un processus de déformation non homogène favorisant la propagation d'un endommagement au sien du

matériau à partir d'une ou plusieurs zones d'amorçage (zones plus faibles ou contenant des défauts initiaux par exemple)

D'une manière générale la fissuration peut résulter :

- de contraintes mécaniques excessives ou mal prises en compte au niveau du cahier des charges
- d'un environnement non adapté (température importante, milieu oxydant...)
- d'une combinaison de ces différents paramètres (fissuration en environnement sous contraintes).

2.7 Modélisation par éléments finis de poutres stratifiées

2.7.1 Introduction :

Le calcul des structures en matériaux composites est sensiblement différent de celui des structures en matériaux isotropes. Du fait de leur anisotropie et de leur stratification, le volume des données à introduire est conséquent et nécessite des outils de prétraitement évolués et adaptés à ce type de matériaux. Pour certains éléments, une phase d'homogénéisation initiale est indispensable pour déterminer les caractéristiques anisotropes équivalentes globales de l'élément.

Il existe plusieurs procédés d'élaboration des matériaux composites et donc plusieurs types de composites. Les composites à fibres courtes peuvent être macroscopiquement considérés comme isotropes ou anisotropes « classiques » (sans stratification) dans les cas où les fibres sont orientées, ils ne nécessitent pas de modélisation spécifique. Les composites à fibres longues se prêtent assez bien au calcul, moyennant quelques hypothèses simplificatrices qui seront développées dans ce chapitre.

2.7.2 Energie potentielle de déformation d'une poutre de TIMOSHENKO

Pour le cas d'une poutre plane chargée dans son plan, les déplacements d'un point quelconque sont : déplacement longitudinal $u_1(x)$ suivant l'axe de la poutre x , un transversal suivant l'axe z $u_3(x)$ et une rotation $\gamma(x)$ caractérisant la flexion autour de l'axe y . (Figure 2-15)

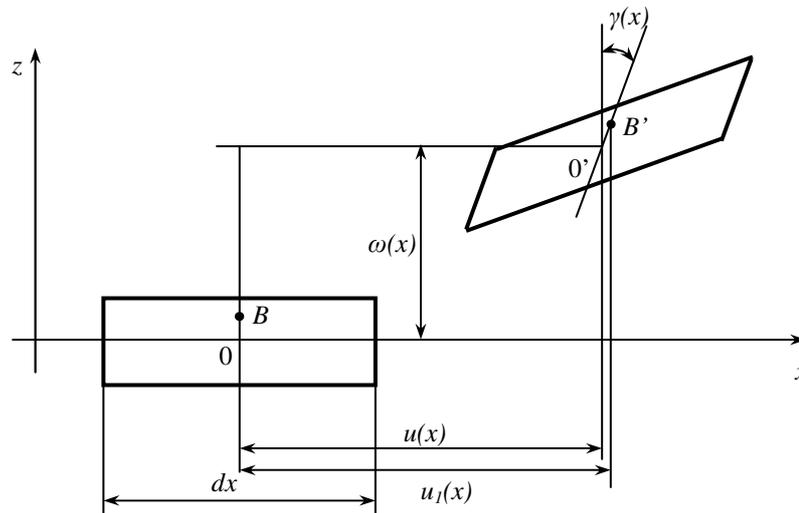


Figure 2-15 : Déformation d'une poutre (théorie de TIMOSHENKO).

2.7.2.1 Les déplacements

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

Note :

Cette approximation peut être appliquée aux poutres homogènes et aux poutres multicouches. [54]

2.7.2.2 Les déformations

On a :

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

Donc :

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u_1}{\partial x_j}, & \varepsilon_y &= 0 & \varepsilon_z &= 0 \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial u_1}{\partial z} + \frac{\partial u_3}{\partial x}, & \gamma_{yz} &= 0, & \gamma_{xy} &= 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Substituant les expressions (2.1) dans (2.2) :

$$\varepsilon_{x1} = \varepsilon_x + zk_x, \quad \gamma_{xz} = 2\varepsilon_x = \gamma_x + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad k_x = \frac{\partial \gamma_x}{\partial x} \quad (2.4)$$

2.7.2.3 Energie potentielle de la poutre s'écrit :

$$U = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_x \varepsilon_{x1} + \sigma_{xz} \gamma_{xz}) dV \quad (2.5)$$

Substituant les expressions (2.3) dans l'équation (2.5)

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L (N_x \varepsilon_{x1} + M_x k_x + 2Q_x \varepsilon_x) dx \quad (2.6)$$

L : la longueur de la poutre.

Les résultantes des efforts sont données par :

$$N_x = \int_S \sigma_x dS, \quad M_x = \int_S \sigma_x z dS, \quad Q_x = \int_S \sigma_{xz} dS \quad (2.7)$$

S : section transversale de la poutre. $dS = dZdy$.

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

$$N_x = Q_{11} \varepsilon_x + B_{11} k_x, \quad M_x = B_{11} \varepsilon_x + D_{11} k_x, \quad Q_x = 2k Q_{55} \varepsilon_{xz} \quad (2.8)$$

k : facteur de correction de cisaillement

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

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

b : largeur de la poutre.

z_k : la coordonnée de la k^{eme} couche. (Figure 2.16)

$$A_{ij}^{(k)} = E_x^{(k)}, \quad A_{ij}^{(k)} = G_{xz}^{(k)} \quad (2.10)$$

$E_x^{(k)}$: Module de Young de la k^{eme} couche dans la direction de l'axe x.

$G_{xz}^{(k)}$: Module de cisaillement transversal de la k^{eme} couche de la poutre

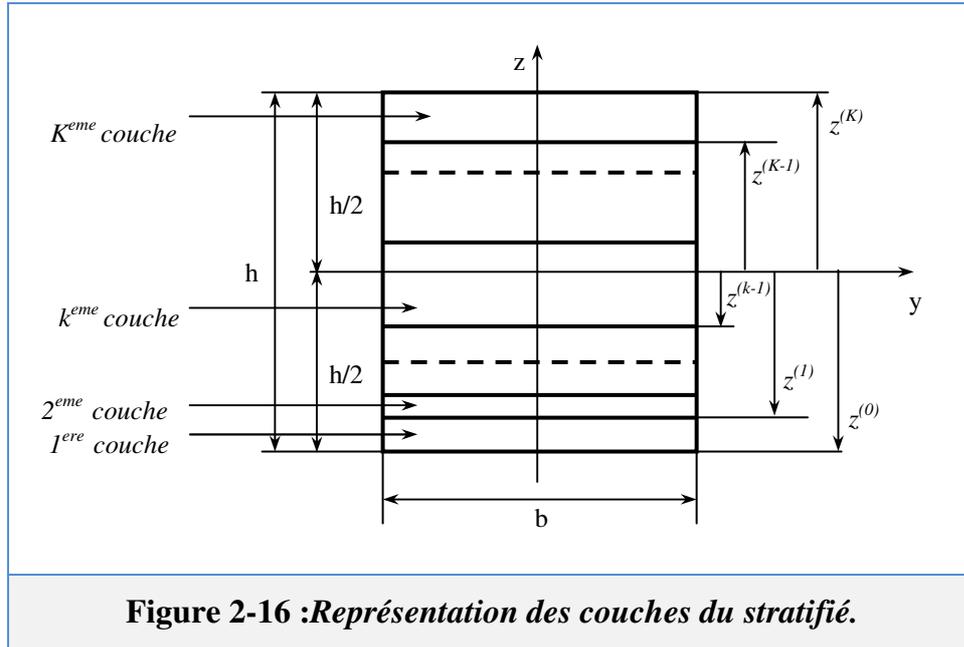


Figure 2-16 : Représentation des couches du stratifié.

Substituant 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 :

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

Dans le cas de 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 :

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

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 *SI8*, *SI12* et *SI20*, ainsi qu'une proposition de modélisation d'un défaut de délaminage.

2.7.3 Élément fini *SI8*

Considérons la flexion pure d'une poutre en matériau composite stratifié unidirectionnelle avec ordre des couches symétriques. Chaque nœud de l'élément fini *SI8* (Figure 2.17) 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.

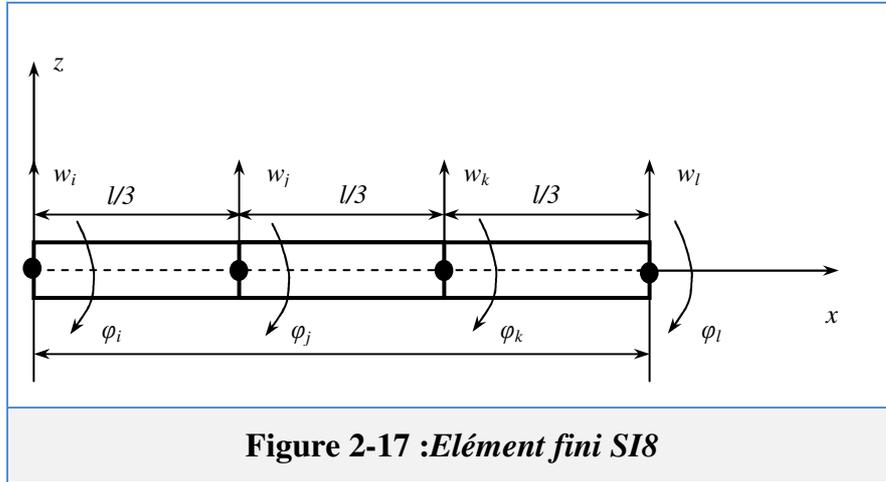


Figure 2-17 :Elément fini SI8

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

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L [D_{11}k_x^2 + kQ_{55}\gamma_{xz}^2] dx \quad (2.13)$$

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

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \varepsilon^T D \varepsilon dx \quad (2.14)$$

Les matrices ε et D sont définies comme suit :

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} k_x \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & kQ_{55} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

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

$$\varepsilon = Lu \quad (2.16)$$

Les matrices u et L sont données par :

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

- **Déplacements nodaux**

Pour l'élément fini SI8 les déplacements nodaux sont w_i et γ_x^i donc le vecteur déplacement nodal est défini comme suit :

$$v_i = \begin{bmatrix} w_i \\ \gamma_x^i \end{bmatrix} \text{ Vecteur déplacements de nœud } i \quad (2.18)$$

$$v_e^T = \{v_i^T, v_j^T, v_k^T, v_l^T\}$$

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) :

$$u = Nv_e \quad (2.19)$$

N : Matrice des fonctions de forme,

$$N = [N_i I_2, N_j I_2, N_k I_2, N_l I_2] \quad (2.20)$$

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 domaine. Pour assurer la continuité de la flèche w et de la rotation γ , par l'interpolation de la déformée en flexion, les fonctions de formes N , doivent être au moins du troisième degré [55]:

$$\begin{aligned} N_i &= 1 - \frac{11x}{2l} + 9\left(\frac{x}{l}\right)^2 - \frac{9}{2}\left(\frac{x}{l}\right)^3 \\ N_j &= 9\frac{x}{l} - \frac{45}{2}\left(\frac{x}{l}\right)^2 + \frac{27}{2}\left(\frac{x}{l}\right)^3 \\ N_k &= -\frac{9x}{2l} + 18\left(\frac{x}{l}\right)^2 - \frac{27}{2}\left(\frac{x}{l}\right)^3 \\ N_l &= \frac{x}{l} - \frac{9}{2}\left(\frac{x}{l}\right)^2 + \frac{9}{2}\left(\frac{x}{l}\right)^3 \end{aligned} \quad (2.21)$$

La **Figure 2.18** montre la variation des fonctions de forme en fonction des coordonnées des nœuds i, j, k et l .

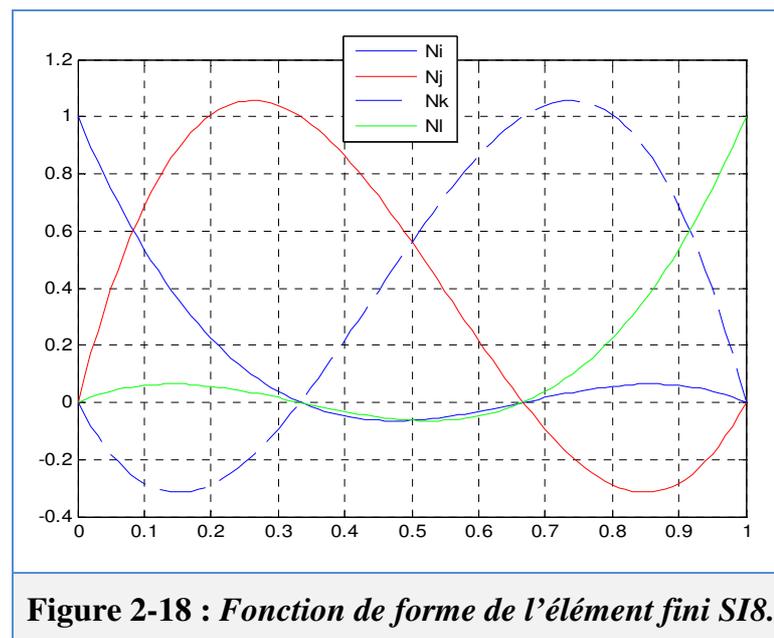


Figure 2-18 : Fonction de forme de l'élément fini SI8.

2.7.3.1 Calcul de la matrice de rigidité de l'élément fini SI8

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

$$\varepsilon = B v_e \text{ avec } B = LN \quad (2.22)$$

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

$$U_e = \frac{1}{2} \int_0^L \varepsilon^T D \varepsilon dx = \frac{1}{2} v_e^T K_e v_e \quad (2.23)$$

K_e : matrice de rigidité de l'élément fini SI8

$$K_e = \frac{1}{2} \int_0^L B^T D B dx \quad (2.24)$$

2.7.3.2 Calcul de la matrice de masse de l'élément fini SI8

L'énergie cinétique T_e voir **Figure 2.18** est donnée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{1}{2} \int_{V_e} \rho \dot{u}_i^2 dV = \frac{1}{2} \int_0^l \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{z_0}^{z_k} \rho (\dot{u}_1^2 + \dot{u}_3^2) dx dy dz \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l \int_{z_0}^{z_k} \rho (\dot{u}^2 + 2z \dot{u} \dot{\gamma}_x + z^2 \dot{\gamma}_x^2) dx dz \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l [\rho_0 (\dot{u}^2 + \dot{w}^2) + 2\rho_1 \dot{u} \dot{\gamma}_x + \rho_2 \dot{\gamma}_x^2] dx \end{aligned} \quad (2.25.a)$$

Les densités massiques généralisées ρ_0, ρ_1 et ρ_2 sont données par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \rho_0 &= b \sum_{k=1}^K \rho_k [z_k - z_{k-1}] \\ \rho_1 &= b \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \rho_k [z_k^2 - z_{k-1}^2] \\ \rho_2 &= b \frac{1}{3} \sum_{k=1}^K \rho_k [z_k^3 - z_{k-1}^3] \end{aligned} \quad (2.25.b)$$

ρ_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 :

$$T_e = \frac{1}{2} \int_0^L [\rho_0 \dot{w}^2 + \rho_2 \dot{\gamma}_x^2] dx = \frac{1}{2} \int_0^L \dot{u}^T R_0 \dot{u} dx \quad (2.26)$$

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

$$R_0 = \begin{bmatrix} \rho_0 & 0 \\ 0 & \rho_2 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

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

$$T_e = \frac{1}{2} \dot{v}_e^T M_e \dot{v} \quad (2.28)$$

Où M_e est la matrice de masse de l'élément fini *SI8*.

M_e s'écrit :

$$M_e = \int_0^l N^T R_0 N dx \quad (2.29)$$

2.7.3.3 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.

Le principe est basé sur le fait que pour un nœud obtenu par assemblage de deux nœuds appartenant à deux éléments adjacents, la force est égale à la somme des forces des deux nœuds et ses déplacements sont identiques à ceux de chaque nœud composant l'ensemble.

2.7.4 Élément fini *SI12*

L'élément fini *SI12* présenté sur la **Figure 1.19** est généralisé par l'élément fini *SI8* avec la prise en considération des déplacement longitudinales.

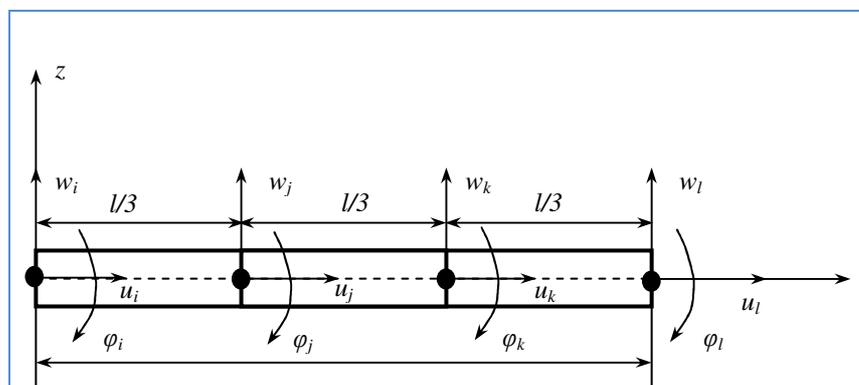


Figure 2-19 : Élément fini *SI12*.

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

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

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

ε_x, k_x : sont donnés par la relation (2.4)

γ_{xz} : est donnée par la relation (2.3)

Les matrices ε et D de la relation (2.30) sont définis comme suit :

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

Dans la relation (2.16) les matrices u et L sont données par :

$$u = \begin{bmatrix} u \\ w \\ \gamma_x \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

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

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

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 :

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

Avec :

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

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

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

$$T_e = \frac{1}{2} \int_0^L [\rho_0(\dot{u}^2 + \dot{w}^2) + 2\rho_1\dot{u}\dot{\gamma}_x + \rho_2\dot{\gamma}_x^2] dx \quad (2.35)$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^L \dot{u}^T R_0 \dot{u} dx$$

D'où R_0 :

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

2.7.5 Élément fini *SI20*

Considérons une poutre stratifiée constituée de trois couches **Figure 2.20**, chacune d'elles peut être représentée comme étant élément fini *SI12*.

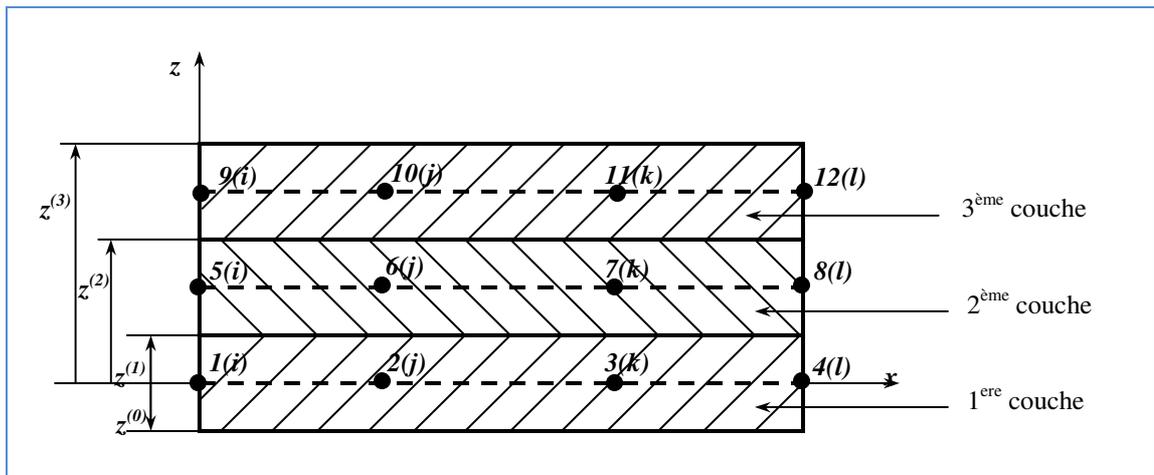


Figure 2-20 :Elément fini *SI20*.

Les déplacements des nœuds de chaque couche sont définis comme suit :

$$u_1^{(k)}(x, z) = u_{(k)}(x) + z\gamma_x^{(k)}(x), \quad u_3^{(k)}(x, z) = w(x) \quad k = 1, 2, 3 \quad (2.37)$$

Les couches sont définies par les ordonnées des nœuds **Figure 2.20** :

- la première couche : $-\frac{h_1}{2} \leq z \leq \frac{h_1}{2}$
- la deuxième couche : $\frac{h_1}{2} \leq z \leq \frac{h_1}{2} + h_2$
- la troisième couche : $\frac{h_1}{2} + h_2 \leq z \leq \frac{h_1}{2} + h_2 + h_3$

En tenant compte des relations (2.37), les déplacements de la première couche peuvent être représentés par :

$$u_1^{(1)}(x, z) = u_{(1)}(x) + z\gamma_x^{(1)}(x), \quad u_3^{(1)}(x, z) = w(x) \quad (2.38)$$

u_1, w : sont les déplacements par rapport à l'axe de référence.

$\gamma_x^{(1)}$: La rotation de la section transversale de la première couche autour de y . (figure 2.21).

Les déplacements de la troisième couche peuvent être représentés par :

$$u_1^{(3)}(x, z) = u_{(3)}(x) + z\gamma_x^{(3)}(x), \quad u_3^{(3)}(x, z) = w(x) \quad (2.39)$$

Tel que :

$u_{(3)}, w$: sont les déplacements de la troisième couche par rapport à l'axe de référence.

$\gamma_x^{(3)}$: La rotation de la section transversale de la troisième couche autour de y . **Figure 2.21.**

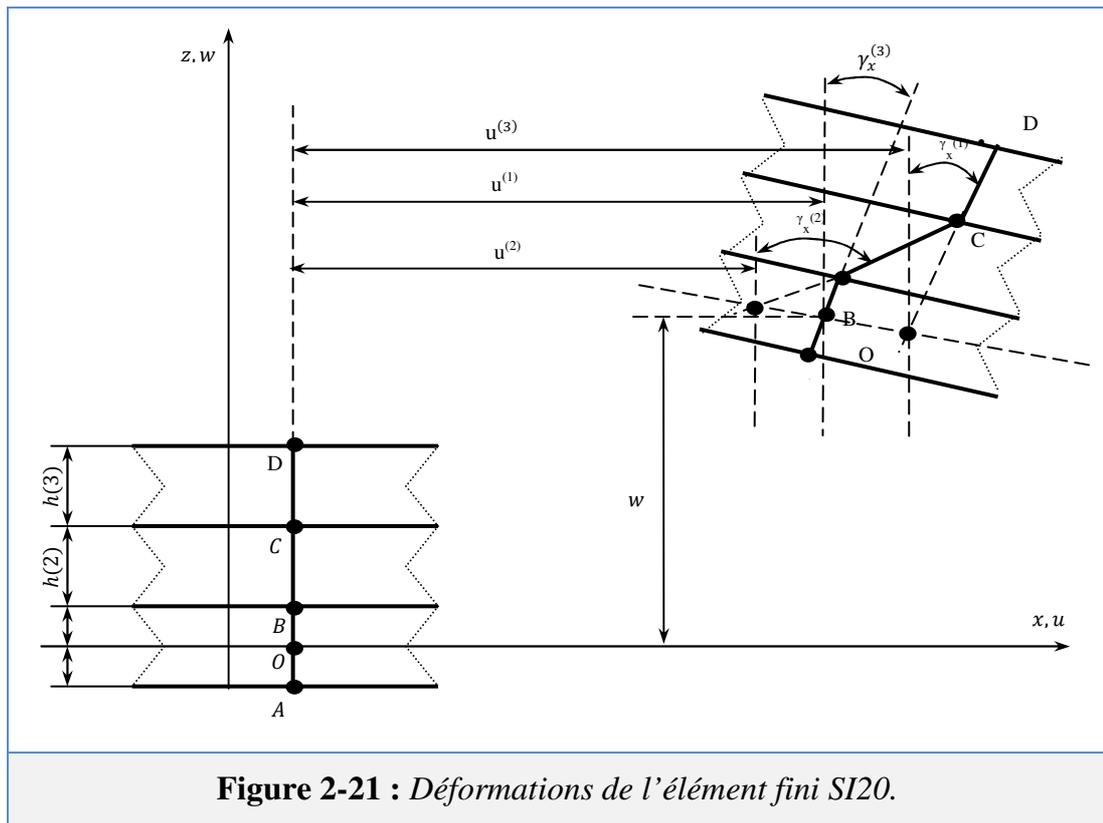


Figure 2-21 : Déformations de l'élément fini SI20.

Les conditions de continuité de déplacements entre les couches peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{aligned} u_1^{(1)}(x, z) &= u_1^{(1)}(x, z) \Big|_{z=z_1} & u_1^{(2)}(x, z) &= u_1^{(3)}(x, z) \Big|_{z=z_2} \\ u_3^{(1)}(x, z) &= u_3^{(1)}(x, z) \Big|_{z=z_1} & u_3^{(2)}(x, z) &= u_3^{(3)}(x, z) \Big|_{z=z_2} \end{aligned} \quad (2.40)$$

Tenant compte des relations (2.37) et (2.40), les déplacements de la deuxième couche sont donnés par :

$$u_1^{(2)}(x, z) = u_{(2)}(x) + z\gamma_x^{(2)}(x), \quad u_3^{(2)}(x, z) = w(x) \quad (2.41)$$

$u_2(x)$ et $\gamma^{(2)}(x)$: sont définies en tant que variables dépendantes :

$$\begin{aligned} u_{(2)} &= F_1 u_{(1)} + F_2 u_{(3)} + F_3 \gamma_x^{(1)} + F_3 \gamma_x^{(3)} \\ \gamma_x^{(2)} &= -F_4 u_{(1)} + F_4 u_{(3)} + F_2 \gamma_x^{(1)} + F_1 \gamma_x^{(3)} \end{aligned} \quad (2.42)$$

Avec :

$$F_1 = 1 + F_2, \quad F_2 = -\frac{h_1}{2h_2}, \quad F_3 = F_1 \frac{h_1}{2}, \quad F_4 = \frac{1}{h_2}$$

L'élément fini *SI20*, figure 2.20, à 36 ddl c'est-à-dire chacune des trois couches a 12 ddl. Le vecteur déplacement u comporte les variables de base c'est-à-dire les déplacements indépendants :

$$u^T = [u_{(1)}, w, \gamma_x^{(1)}, u_{(3)}, \gamma_x^{(3)}] \quad (2.43)$$

u : Vecteur déplacement de base.

Nous utilisons les mêmes fonctions de formes, N_i, N_j, N_k et N_l pour l'approximation des déplacements dans l'élément fini *SI20*.

$$u = N v_e \quad (2.44)$$

v_e : Le vecteur des déplacements de l'élément *SI20*

$$v_e^T = [v_i^T, v_j^T, v_k^T, v_l^T] \quad (2.45)$$

v_i^T : sont les déplacements des nœuds ($m = i, j, k, l$)

$$u^T = [u_m^{(1)}, w_m, \gamma_m^{(1)m}, u_m^{(3)}, \gamma_m^{(3)m}] \quad (2.46)$$

N : Matrice des fonctions de forme :

$$N = [N_i I_5, N_j I_5, N_k I_5, N_l I_5] \quad (2.47)$$

I_5 : matrice unité 5x5

Pour chacune des trois couches les déplacements et les rotations sont fonction du vecteur de déplacement de base u , qui est définie par la relation (2.44) :

$$u^{(k)} = \begin{bmatrix} u^{(k)} \\ w \\ \gamma_x^{(k)} \end{bmatrix} = H^{(k)} u \quad (2.48)$$

Les matrices $H^{(k)}$ sont données par :

$$H^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, H^{(2)} = \begin{bmatrix} F_1 & 0 & F_3 & F_2 & -F_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -F_4 & 0 & F_2 & F_4 & F_1 \end{bmatrix}, H^{(3)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

L'énergie de déformation U_e de l'élément fini *SI20* est la somme des énergies de déformation $U_e^{(k)}$ de chacune des trois couches :

$$U_e = \sum_{k=1}^3 U_e^{(k)} = \sum_{k=1}^3 \frac{1}{2} \int_0^l \varepsilon^{(k)T} D^{(k)} \varepsilon^{(k)} dx \quad (2.49)$$

Les matrices $\varepsilon^{(k)}$ et $D^{(k)}$ sont définies pour chaque couche par les formules (2.31).

NB :

- La matrice d'élasticité $D^{(k)}$ doit être calculée pour chaque couche par les relations (2.9) en tenant compte que l'axe de référence est l'axe de la couche inférieure (la première couche).
- Pour chaque couche, les déformations $\varepsilon^{(k)}$ définies par la relation (2.31) peuvent être calculées par l'expression (2.16) :

$$\varepsilon^{(k)} = L u^{(k)} \quad (2.50)$$

La matrice L est donnée par la formule (2.32).

Le vecteur $u^{(k)}$ est défini par la formule (2.48).

Substituant les expressions (2.48) et (2.44) dans (2.50), on obtient :

$$\begin{aligned} \varepsilon^{(k)} &= L u^{(k)} \\ &= L H^{(k)} u = L H^{(k)} N v_e \\ &= B^{(k)} v_e \end{aligned} \quad (2.51)$$

2.7.5.1 Calcul de la matrice de rigidité élémentaire

La substitution de l'équation (2.51) dans l'expression de l'énergie de déformation (2.49) nous donne :

$$U_e = \frac{1}{2} v_e^T K_e v_e \quad (2.52)$$

K_e : est la matrice de rigidité de l'élément fini $SI20$:

$$K_e = \sum_{k=1}^3 \int_0^l B^{(k)T} D^{(k)} B^{(k)} dx \quad (2.53)$$

2.7.5.2 Calcul de la matrice de masse élémentaire

L'énergie cinétique de l'élément fini $SI20$ est :

$$\begin{aligned} T_e &= \sum_{k=1}^3 T_e^{(k)} \\ &= \sum_{k=1}^3 \int_0^l \dot{u}^{(k)T} R_0^{(k)} \dot{u}^{(k)} dx \end{aligned} \quad (2.54)$$

Avec :

- $R_0^{(k)}$ est défini par la relation (2.36).
- $\rho_0^{(k)}, \rho_1^{(k)}$ et $\rho_2^{(k)}$ sont les densités de masse généralisées des couches. Ces densités sont calculées par les formules (2.25.a). Nous utilisons l'axe de la première couche comme axe de référence pour le calcul des densités généralisées de chaque couche **Figure 2.20**.

Substituant les expressions (2.48) dans la fonction (2.54), on obtient :

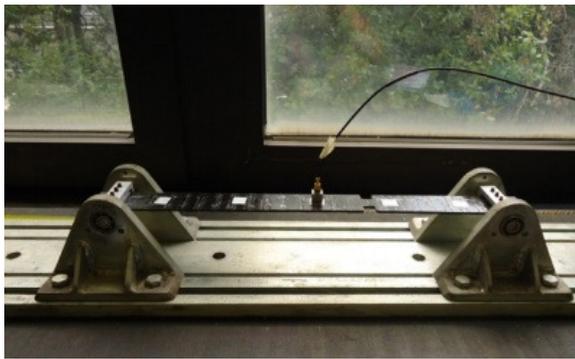
$$T_e = \dot{v}_e^T M_e \dot{v}_e \quad (2.55)$$

M_e : est la matrice de masse de l'élément fini $SI20$:

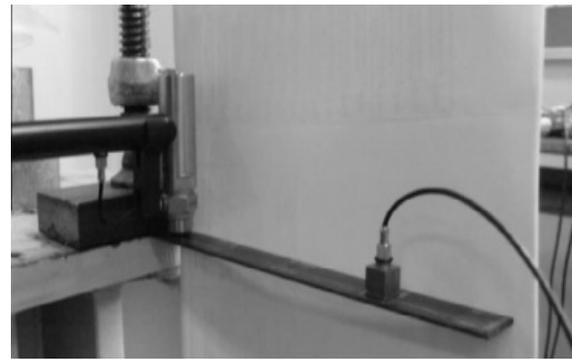
$$M_e = \sum_{k=1}^3 \int_0^l N^T H^{(k)T} R_0^{(k)} H^{(k)} N dx \quad (2.56)$$

2.7.6 Validation expérimental du modèle numérique

Les fréquences naturelles d'une poutre stratifiée CFRP (CarbonFiberReinforcedPolymer) encastrée libre et doublement encastrée (figure2-22) sont mesurées par R.Capozucca[56, 57].



(a)



(b)

Figure 2-22 : Poutre stratifiée CFRP (a) Encastrée des deux côtés (b) Encastrée libre [56, 57].

Les propriétés mécaniques et géométriques de la poutre CFRP sont représentées dans le tableau suivant :

Propriété mécaniques et géométriques	Valeurs
longueur de la poutre (m)	0.2
Largeur de la poutre (m)	0.002
Epaisseur des couches (m)	0.00017
Module d'Young longitudinale (GPa)	133e10
Module de cisaillement dans le plan xz (GPa)	0.414e10
Masses volumique Kg/m ³	1376

Tableau 2-2 : Propriétés mécaniques et géométriques d'une poutre CFRP.

Les fréquences naturelles mesurées [56, 57] et calculées en utilisant les éléments finis SI12 sont données par :

Poutre encadrée libre		
N°	F [Hz] FEM SI12	F [Hz] Expérimentale [56]
1	61.64	65.00
2	247.45	267.00
3	564.51	544.00
Poutre sur deux appuis		
Mode Number	F [Hz] FEM SI12	F [Hz] Expérimentale [57]
1	67.49	67.49
2	422.89	423.00
3	1188.78	1184.53

Tableau 2-3 : Fréquences mesuré et numérique.

Les résultats obtenus montrent que l'écart entre les fréquences naturelles calculées, en utilisant la modélisation en éléments finis SI12, et celle mesurées est très faible.

2.7.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les différents mécanismes d'endommagements dans les structures poutres stratifiés, les différents types d'éléments finis utilisés dans notre travail pour la et les étapes à suivre pour la modélisations des poutres stratifiées et unidirectionnelle, afin de calculer les paramètres dynamiques nécessaires à l'application des méthodes de détection et de localisation d'endommagement basée sur des données modale présentées dans les chapitres suivants.

Chapitre 3 : Intelligence artificielle pour l'identification d'endommagement

3 Intelligence artificielle pour l'identification d'endommagement

3.1 Introduction :

Le terme d'optimisation se réfère à la résolution d'un problème de la meilleure façon possible. Dans la plupart des cas, l'objectif est de minimiser ou de maximiser une fonction objective en choisissant des valeurs de ses variables dans une plage acceptable.

Les techniques d'optimisation ont contribué très largement à la résolution aisée de problèmes inverses, par rapport aux méthodes de recherche classiques, dont le nombre de paramètres pris en charge est limité, à l'exemple des techniques de balayage du champ de paramètre.

Dans le cas général, la solution d'un problème d'optimisation comprend les étapes suivantes:

- Formulation mathématique du problème d'optimisation (définitions de la fonction objective, les variables de conception et les contraintes possibles du problème).
- Sélection de l'algorithme d'optimisation approprié.
- Application de l'algorithme d'optimisation sélectionné pour résoudre le problème.

En ce qui concerne le choix d'un algorithme approprié, le développement rapide de la technologie de programmation a contribué à l'élaboration d'une grande variété d'algorithmes d'optimisation qui peuvent résoudre les problèmes, chaque algorithme d'optimisation présentant des avantages et des inconvénients dans son fonctionnement.

3.2 Les algorithmes génétiques

3.2.1 Définition :

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes informatiques inspirés de la théorie darwinienne. Cette théorie repose sur deux postulats simples :

- " Dans chaque environnement, seul les espèces les mieux adaptées perdurent au cours des temps, les autres étant condamnées à disparaître ".
- " Au sein de chaque espèce, le renouvellement des populations est essentiellement dû aux meilleurs individus de l'espèce ".

Les algorithmes génétiques sont un moyen de recherche d'optimum applicable à de nombreux problèmes. L'idée consiste à faire évoluer une population de solutions possibles par analogie aux mécanismes de l'évolution et de la génétique que sont la reproduction par croisement et les mutations.

Les algorithmes génétiques permettent à une population de solutions de converger vers les solutions optimales. Pour ce faire, ils vont utiliser un mécanisme de sélection des individus de la population (les solutions potentielles). Les individus sélectionnés vont être croisés entre eux (exploitation), et certains vont être mutés (exploration). Ces mécanismes d'exploitation et d'exploration vont permettre de converger vers les bonnes solutions en évitant, autant que faire se peut, les optima locaux[58].

3.2.2 Principes généraux

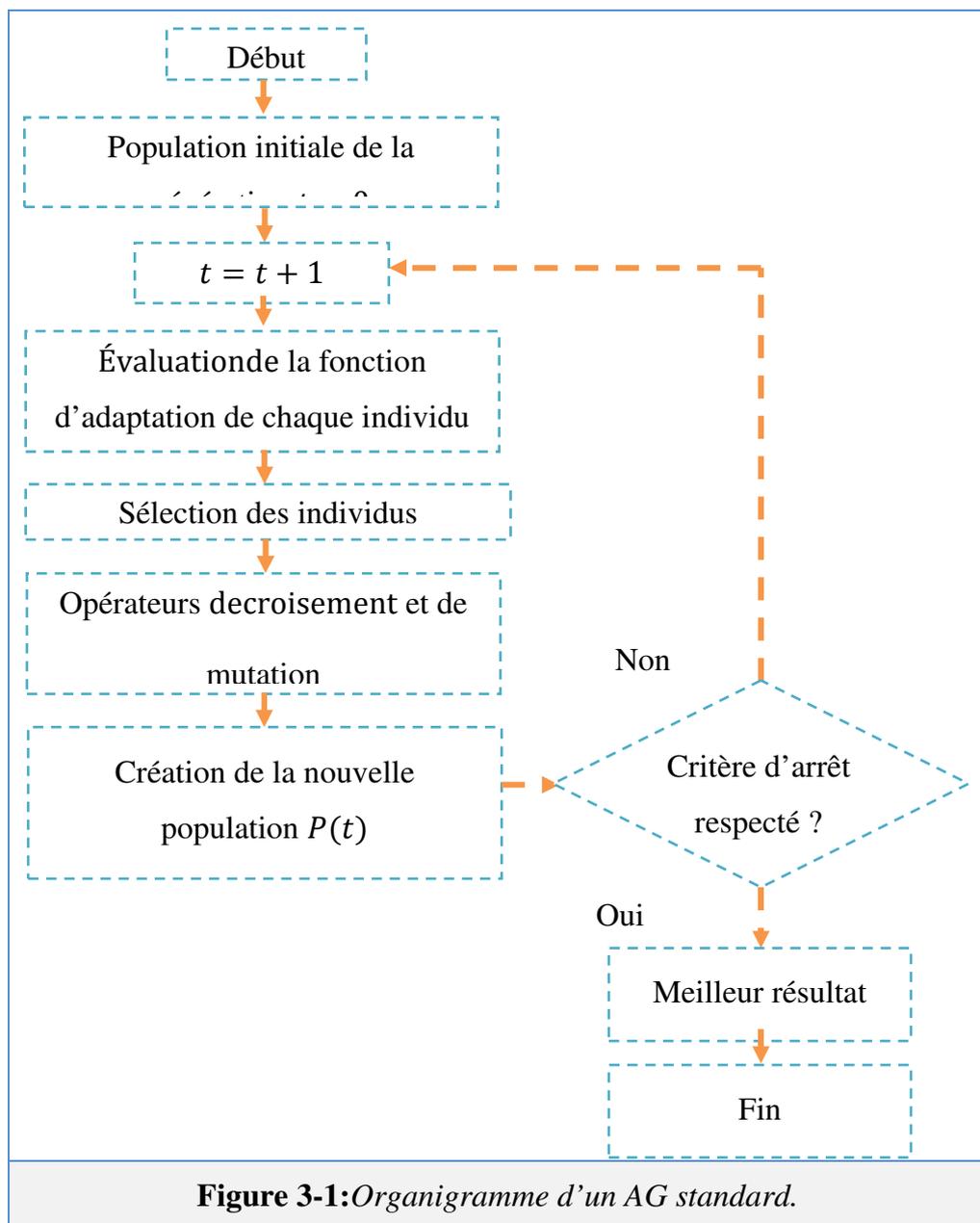
Un algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer des cinq éléments suivants[59] :

1. *Un principe de codage de l'élément de population.* Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité.
2. *Un mécanisme de génération de la population initiale.* Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il

peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.

3. Une fonction d'évaluation de l'individu à optimiser.
4. Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état.
5. Des paramètres de dimensionnement : Taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

Les algorithmes génétiques dits "canoniques" qui s'inspirent de cette théorie consistent en une succession chronologique d'opérations élémentaires qui sont l'initialisation, l'évaluation, la sélection, le croisement et la mutation (figure 3-1)



3.2.3 Différentes étapes de l'algorithme génétique

On commence par générer une population d'individus de façon aléatoire. Pour passer d'une génération k à la génération $k + 1$, les trois opérations suivantes sont répétées pour tous les éléments de la population k . Des couples de parents P_1 et P_2 sont sélectionnés en fonction de leurs adaptations. L'opérateur de croisement leur est appliqué avec une probabilité P_c et génère des couples d'enfants C_1 et C_2 . D'autres éléments P sont sélectionnés en fonction de leur adaptation. L'opérateur de mutation leur est appliqué avec la probabilité P_m (P_m est généralement très inférieur à P_c) et génère des individus mutés P' . Le niveau d'adaptation des enfants (C_1, C_2) et des individus mutés P' sont ensuite évalués avant insertion dans la nouvelle population. Différents critères d'arrêt de l'algorithme peuvent être choisis :

- Le nombre de générations que l'on souhaite exécuter peut être fixé a priori. C'est ce que l'on est tenté de faire lorsque l'on doit trouver une solution dans un temps limité.
- L'algorithme peut être arrêté lorsque la population n'évolue plus ou plus suffisamment rapidement.

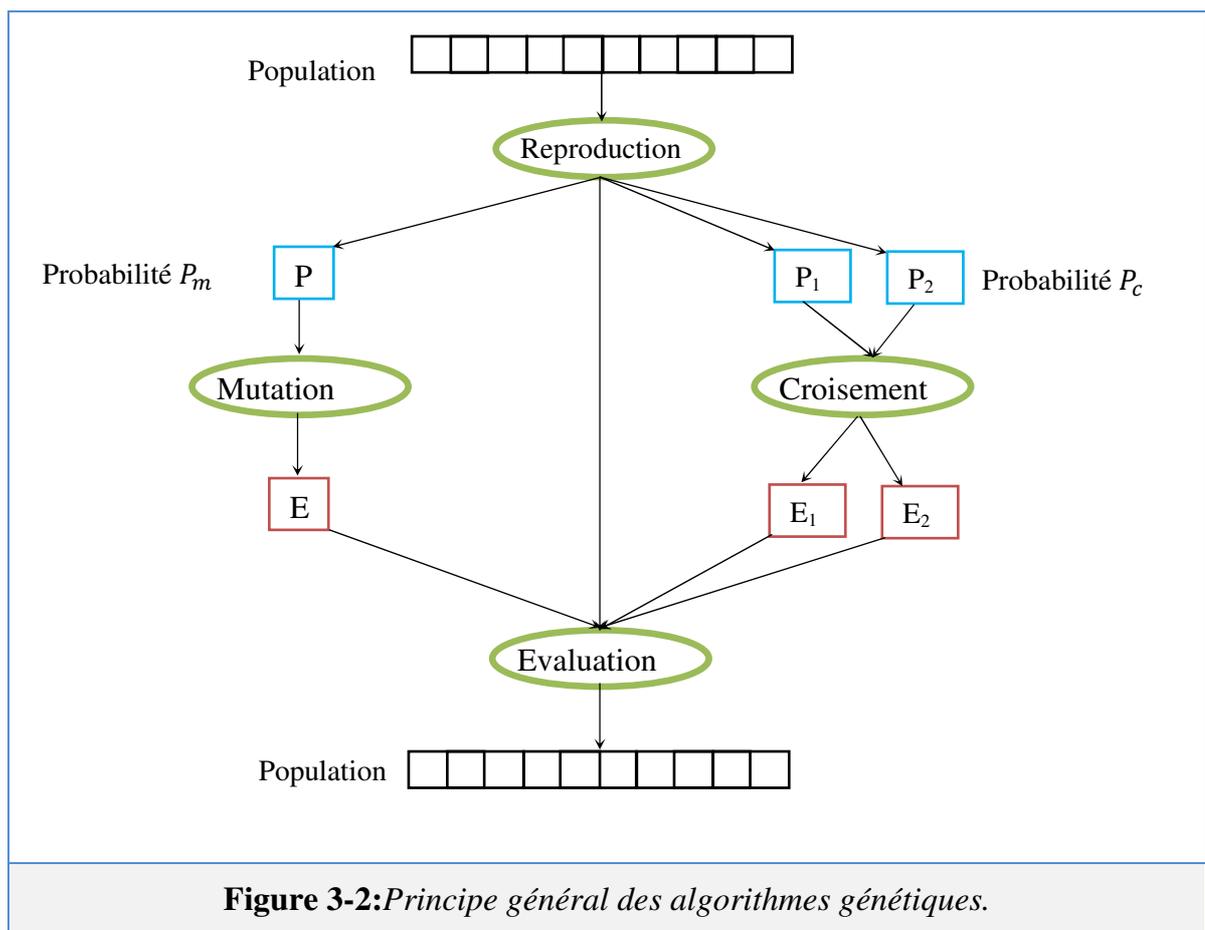


Figure 3-2:Principe général des algorithmes génétiques.

3.2.4 Terminologie propre aux algorithmes génétiques

Avant d'aborder le fonctionnement d'un algorithme génétique, quelques définitions sont données.

- **Individu**: Dans le cadre d'un algorithme génétique canonique, l'individu (Figure 3-3) est réduit à son chromosome constitué d'un ensemble de variables. C'est une solution potentielle au problème que l'algorithme génétique traite.

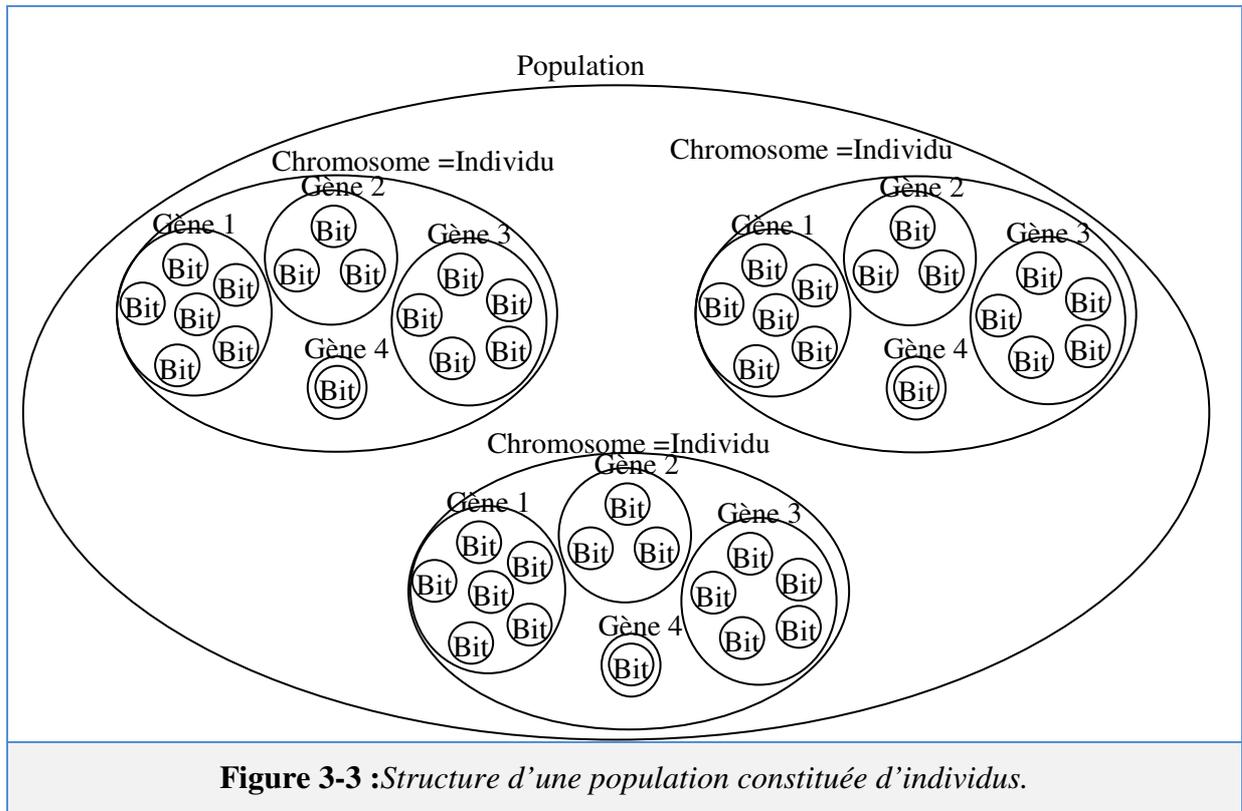


Figure 3-3 : Structure d'une population constituée d'individus.

- **Chromosome** : un algorithme génétique canonique traite des individus constitués d'une seule séquence de gènes (voir Figure IV.3) appelée chromosome, alors que les organismes biologiques peuvent en avoir plusieurs. L'approche informatique idéalise le chromosome en le réduisant à un vecteur de gènes.

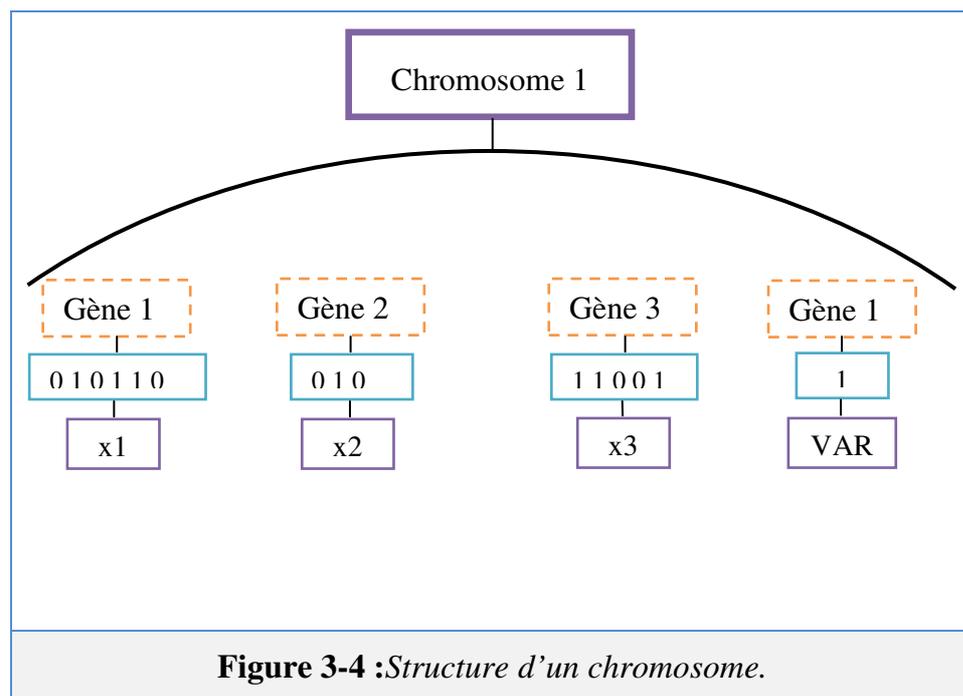


Figure 3-4 : Structure d'un chromosome.

- **Gène** : c'est un segment de base de chromosome. Il caractérise la valeur d'une variable de la solution au problème que traite l'algorithme génétique.
- **Locus** : C'est la position du gène dans le chromosome.
- **Allèle** : C'est un symbole attaché à un gène. Alors que l'alphabet du code génétique naturel est composé des quatre lettres ATCG. On peut choisir n'importe quel alphabet pour un algorithme génétique. Toutefois, pour des raisons de commodité, un alphabet binaire est couramment utilisé. Pour un codage binaire, un allèle renvoie à "1" ou "0".
- **Population** : Ensemble d'individus artificiels ou naturels.
- **Mutation** : Changement aléatoire d'un allèle au cours de la phase de reproduction.
- **Croisement** : Echange de position entre des allèles de deux gènes de deux individus différents.
- **Reproduction** : duplication par croisement et mutation des chromosomes pour donner naissance à de nouveaux individus.
- **Fonction objectif** : fonction quantifiant les performances d'un objectif visé : masse minimum, résistance maximum, . . .
- **Fonction d'adaptation ou fonction de performance** : fonction regroupant plusieurs fonctions objectives et quantifiant les performances d'un individu avec une valeur numérique.

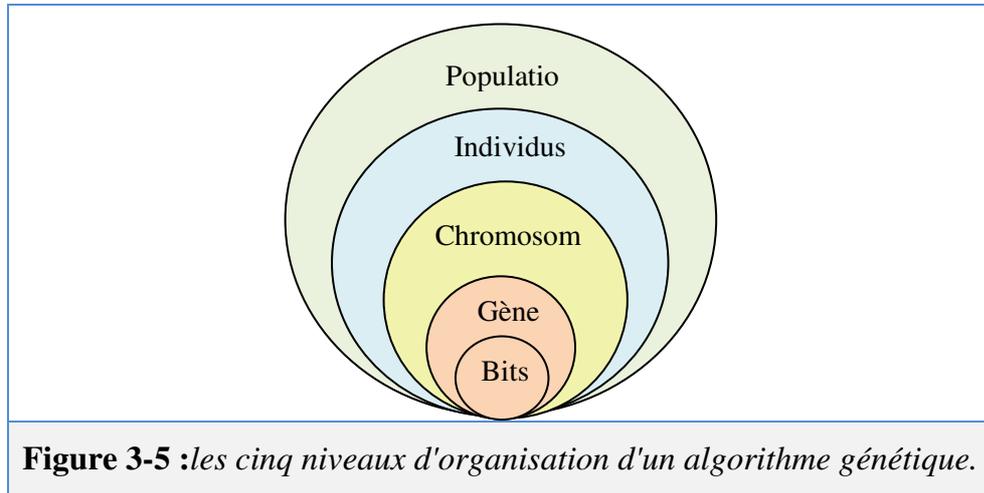
3.2.5 Description détaillée

3.2.5.1 Codage des données

Chaque paramètre d'une solution est assimilé à un gène, toutes les valeurs qu'il peut prendre sont les allèles de ce gène, on doit trouver une manière de coder chaque allèle différent de façon unique (établir une bijection entre l'allèle "réel" et sa représentation codée).

Un chromosome est une suite de gène, on peut par exemple choisir de regrouper les paramètres similaires dans un même chromosome (chromosome à un seul brin) et chaque gène sera repérable par sa position.

Chaque individu est représenté par un ensemble de chromosomes, et une population est un ensemble d'individus.



Il y a trois principaux types de codage utilisables, et on peut passer de l'un à l'autre relativement facilement :

3.2.5.1.1 Codage binaire

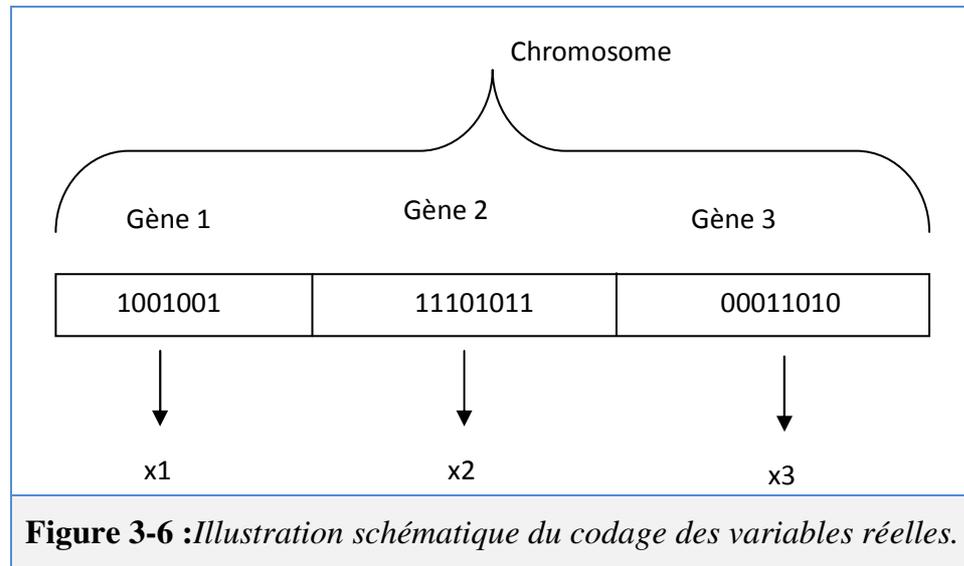
C'est le plus utilisé. Chaque gène dispose du même alphabet binaire $\{0, 1\}$. Si un gène est représenté par un entier long (32 bits), les chromosomes qui sont des suites de gènes sont représentés par des tableaux de gènes et les individus de notre espace de recherche sont représentés par des tableaux de chromosomes.

Le codage binaire est également indépendant des opérateurs génétiques (croisement et mutation) du moment où ces derniers ne nécessitent aucune spécification. En effet, toute manipulation d'un chromosome donne naissance à un nouveau chromosome valide.

3.2.5.1.2 Codage réel

Les premières techniques d'utilisation de l'algorithme génétique utilisaient un codage binaire pour coder les individus. Mais le codage binaire entraîne certains problèmes, et le codage réel est plus précis [60].

Les nombres binaires étant pour nous moins évocateurs que les nombres réels, des difficultés surviennent pour exprimer la fonction objective et traiter les problèmes à plusieurs variables. En outre, les opérations de conversion des solutions potentielles (réelles) en chaînes de bits et des solutions obtenues en une forme réelle facilitant leur interprétation sont coûteuses en temps-machine. De plus, elles sont répétées un grand nombre de fois à chaque génération. La représentation réelle propose un compromis intéressant : elle élimine toutes les opérations de conversion, mais en contrepartie elle rend les algorithmes génétiques plus dépendants des problèmes.



3.2.5.1.3 Codage de Gray :

Dans le cas d'un codage binaire on utilise souvent la "distance de Hamming" comme mesure de la dissimilarité entre deux éléments de population, cette mesure compte les différences de bits de même rang de ces deux séquences. Et c'est là que le codage binaire commence à montrer ses limites. En effet, deux éléments voisins en terme de distance de Hamming ne codent pas nécessairement deux éléments proches dans l'espace de recherche. Cet inconvénient peut être évité en utilisant un "codage de Gray" : le codage de Gray est un codage qui a comme propriété qu'entre un élément n et un élément $n + 1$, donc voisin dans l'espace de recherche, un seul bit diffère.

Il existe deux types de difficultés dans le choix d'un codage. D'une part celui-ci doit pouvoir être adapté au problème de façon à limiter au mieux la taille de l'espace de recherche, et aussi de façon que les nouveaux chromosomes engendrés par les opérateurs de recherche soient significatifs le plus souvent possible, c'est à dire qu'ils puissent coder des solutions valides respectant les contraintes du problème.

3.2.5.2 Génération aléatoire de la population initiale

Le choix de la population initiale d'individus conditionne fortement la rapidité de l'algorithme. Si la position de l'optimum dans l'espace d'état est totalement inconnue, il est naturel de générer aléatoirement des individus en faisant des tirages uniformes dans chacun des domaines associés aux composantes de l'espace d'état en veillant à ce que les individus produits respectent les contraintes. Si par contre, des informations à priori sur le problème sont disponibles, il paraît bien évidemment naturel de générer les individus dans un sous-domaine particulier afin d'accélérer la convergence. Dans l'hypothèse où la gestion des contraintes ne peut se faire directement, les contraintes sont généralement incluses dans le

critère à optimiser sous forme de pénalités. Il est clair qu'il vaut mieux, lorsque c'est possible ne générer que des éléments de population respectant les contraintes.

3.2.5.3 Fonction d'évaluation (fitness) et le hasard

Contrairement à bon nombre de méthodes qui requièrent beaucoup d'informations pour pouvoir fonctionner efficacement, les AGs nécessitent peu d'informations : ils fonctionnent essentiellement de manière aveugle. Pour effectuer une recherche de solutions meilleures, ils n'ont besoin que des valeurs des fonctions objectives associées aux chaînes individuelles. Ces valeurs ont pour but d'évaluer si un individu est mieux adapté qu'un autre à son environnement. Ce qui signifie qu'elle quantifie la réponse fournie au problème pour une solution potentielle donnée. Ainsi les individus peuvent être comparés entre eux.

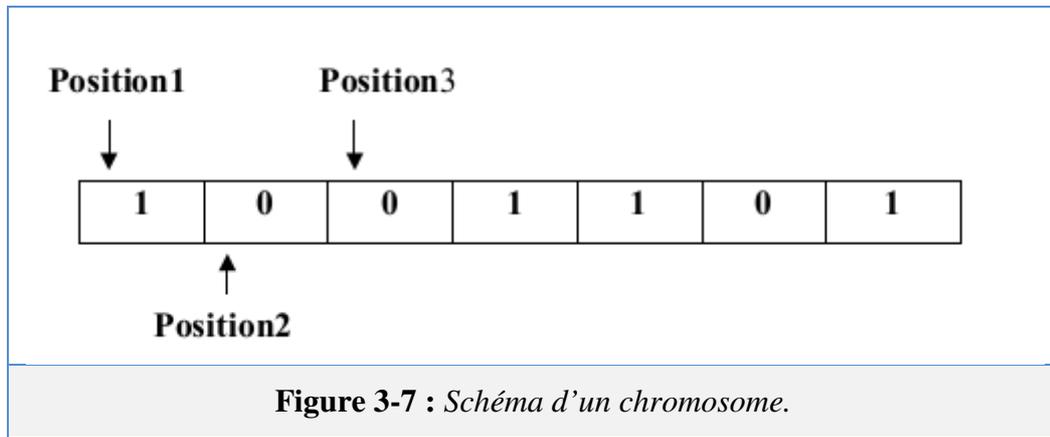
Les individus déterminés par la fonction objective (fitness) vont servir au processus de sélection des candidats aptes à la reproduction et au processus de survie des espèces. Cette fonction, propre au problème, est souvent simple à formuler lorsqu'il y a peu de paramètres.

L'opérateur d'évaluation n'est pas anodin. Il est utilisé par l'opérateur de sélection pour faire son choix des individus à conserver. Ainsi, pour mesurer les performances de chaque individu qui correspond à une solution donnée du problème à résoudre, on introduit une fonction d'évaluation. Elle permet de quantifier la capacité d'un individu à survivre en lui affectant un poids couramment appelé fitness. La force de chaque chromosome de la population est calculée afin que les plus forts soient retenus (étape de sélection) puis modifiés (croisement et mutation). La complexité de la fonction d'évaluation dépend essentiellement du problème et de ses contraintes [58].

Ces deux derniers éléments, codage et évaluation, sont les seuls éléments spécifiques au problème à résoudre. Une fois qu'ils sont fixés, l'algorithme génétique que l'on appliquera sera toujours le même [61].

3.2.6 Concepts et formalismes d'opérateurs génétiques

Les opérateurs génétiques sont appliqués à une population initiale de façon à produire, dans le temps, des populations successives de qualité. Une des représentations génétiques les plus utilisées est la binaire, dans laquelle chaque gène (composant) d'un chromosome est symbolisé par les valeurs zéro ou un. La représentation par nombres entiers associe à chaque gène une valeur entière. La figure III.5 représente une chaîne (un chromosome) composé de 7 bits.



Les opérateurs génétiques de base sont : la sélection, le croisement, la mutation et l'élitisme.

3.2.6.1 Sélection

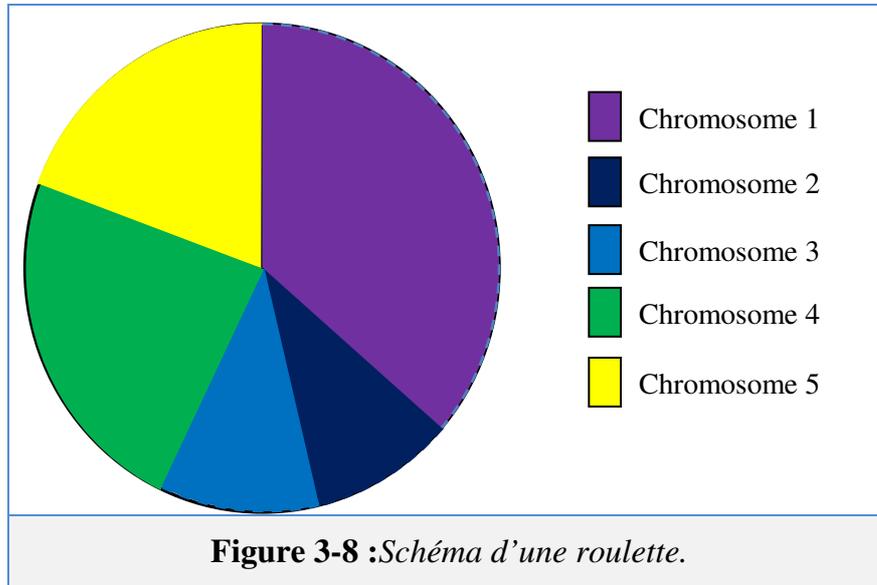
L'opérateur de sélection est chargé de "favoriser" les meilleurs individus [62]. Plus formellement, l'opérateur de sélection va générer à partir de la population courante une nouvelle population par copie des individus choisis de la population courante. La copie des chaînes s'effectue en fonction des valeurs de la fonction d'adaptation. Ce procédé permet de donner aux meilleures chaînes, une probabilité élevée de contribuer à la génération suivante. Cet opérateur est bien entendu une version artificielle de la sélection naturelle, la survie darwinienne des chaînes les plus adaptées [63].

Il existe de nombreuses techniques de sélection, les plus courantes seront évoquées dans la section suivante.

3.2.6.1.1 La Sélection par Roulette

Les parents sont sélectionnés en fonction de leur performance. Meilleur est le résultat codé par un chromosome, plus grandes sont ses chances d'être sélectionné. Il faut imaginer une sorte de roulette de casino sur laquelle sont placés tous les chromosomes de la population, la place accordée à chacun des chromosomes étant en relation avec sa valeur d'adaptation.

Ensuite, la bille est lancée et s'arrête sur un chromosome. Les meilleurs chromosomes peuvent ainsi être tirés plusieurs fois et les plus mauvais ne jamais être sélectionnés. Cela peut être simulé par l'algorithme suivant :



1. On calcule la somme $S1$ de toutes les fonctions d'évaluation d'une population.
2. On génère un nombre r entre 0 et $S1$.
3. On calcule ensuite une somme $S2$ des évaluations en s'arrêtant dès que r est dépassé.
4. Le dernier chromosome dont la fonction d'évaluation vient d'être ajoutée est sélectionné.

3.2.6.1.2 La Selection par Rang

La sélection par rang trie d'abord la population par leur scores. Ensuite, chaque chromosome se voit associé un rang en fonction de sa position. Ainsi le plus mauvais chromosome aura le rang 1, le suivant 2, et ainsi de suite jusqu'au meilleur chromosome qui aura le rang N . La sélection par rang d'un chromosome est la même que par roulette, mais les proportions sont en relation avec le rang plutôt qu'avec la valeur de l'évaluation. Le tableau suivant fournit un exemple de sélection par rang. Avec cette méthode de sélection, tous les chromosomes ont une chance d'être sélectionnés. Cependant, elle conduit à une convergence plus lente vers la bonne solution. Ceci est dû au fait que les meilleurs chromosomes ne diffèrent pas énormément des plus mauvais.

Chromosomes	1	2	3	4	5	6	Total
Probabilités initiales	89%	05%	01%	04%	03%	02%	100%
Rang	6	5	1	4	3	2	21
Probabilités finales	29%	24%	05%	19%	14%	09%	100%

Tableau 3-1 : Exemple de sélection par rang pour 6 chromosomes.

3.2.6.1.3 La Selection par Tournoi

Sur une population de m chromosomes, on forme m paires de chromosomes. Dans les paramètres de l'AG, on détermine une probabilité de victoire du plus fort. Cette probabilité représente la chance qu'a le meilleur chromosome de chaque paire d'être sélectionné. Cette probabilité doit être grande (entre 70% et 100%). A partir des m paires, on détermine ainsi m individus pour la reproduction.

3.2.6.1.4 L'Élitisme

A la création d'une nouvelle population, il y a de grandes chances que les meilleurs chromosomes soient perdus après les opérations d'hybridation et de mutation. Pour éviter cela, on utilise la méthode d'élitisme. Elle consiste à copier un ou plusieurs des meilleurs chromosomes dans la nouvelle génération. Ensuite, on génère le reste de la population selon l'algorithme de reproduction usuel. Cette méthode améliore considérablement les algorithmes génétiques, car elle permet de ne pas perdre les meilleures solutions [64].

3.2.6.2 Les Croisements

Le phénomène de croisement est une propriété naturelle de l'ADN. C'est par analogie qu'ont été conçus les opérateurs de croisement dans les (AG). Le croisement combine les gènes des deux individus parents pour donner deux nouveaux chromosomes d'individus enfants (descendants) possédant des caractéristiques issues des deux parents. La zone de croisement est généralement choisie aléatoirement dans les chromosomes. Les méthodes de croisement sont liées au codage mais leur principe est identique. Il a pour but d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes, il favorise l'exploration de l'espace de recherche et permet d'explorer l'ensemble des solutions possibles. Classiquement, les croisements sont envisagés avec deux parents et génèrent deux enfants. Dans un groupe de parents arbitrairement choisis dans la population chaque paire dans la population formée va subir le croisement avec une probabilité P_c [65].

De nombreux types de croisement existent dans la littérature. Ils préservent plus ou moins l'identité génétique des parents et permettent un déplacement dans tout l'espace des solutions le type de croisement le plus simple est le croisement à un site.

- **Croisement à un site**

Il consiste à échanger les gènes de chacun des parents de longueur l en vérifiant la probabilité P_c . Le site de croisement S doit être choisi entre 1 et $(l - 1)$. Le changement va se

3.2.6.3 La Mutation

La mutation est le processus selon lequel la valeur d'un gène choisi au hasard dans un chromosome est régénérée. C'est un processus qui nesurvient qu'occasionnellement dans un algorithme génétique avec une probabilité P_m très faible. Une mutation consiste simplement l'inversion d'un bit (ou de plusieurs bits, mais vu la probabilité de mutation c'est extrêmement rare) se trouvant en un locus bien particulier et lui aussi déterminé de manière aléatoire.

Parmi les stratégies de mutation utilisées en pratique [66].

- **Mutation unipoint** : Cette mutation se fait par altération d'une seule valeur sur le chromosome.
- **Mutation bipoints et multipoints** : Cette mutation se fait par altération de plusieurs valeurs sur le chromosome.
- **Mutation par valeur** : Avec ce type, la mutation se fait par transformation d'une valeur donnée en une autre valeur déterminée, sur tous les gènes de chromosome.

3.2.7 Paramètre de dimensionnement

Le processus de l'algorithme génétique est guidé par un certain nombre de paramètres fixés à l'avance. La valeur de ces paramètres influence la réussite ou non de l'algorithme. Ces paramètres sont les suivants :

- La taille de la population N , et la longueur du codage de chaque chromosome l . Si N est trop grand, le temps de recherche par l'algorithme devient important. Si N est trop petit, la population peut converger trop rapidement vers un mauvais individu.
- La probabilité de croisement P_c : elle dépend de la forme de la fonction de fitness. Plus elle est élevée, plus la population subit des changements importants. Les valeurs généralement admises sont comprises entre 0,5 et 0,9.
- La probabilité de mutation P_m : ce taux est généralement faible puisqu'un taux élevé risque de conduire à une solution sous-optimale, et à la perte de la population originale.
- Le nombre de générations peut également être défini a priori comme critère d'arrêt. Les paramètres décrits ici sont des paramètres communs, il peut exister plusieurs d'autres selon le modèle de l'algorithme génétique utilisé.

3.2.8 Etapes importantes de l'algorithme génétique

Le principe d'un algorithme génétique consiste à évaluer une population et à générer une autre de façon itérative grâce aux actions opérées par les opérateurs génétiques. Le nombre de chromosomes dans une population reste inchangé à travers les diverses générations. Pour

mettre en œuvre un algorithme génétique, il faut disposer d'un schéma pour coder les solutions du problème, une fonction d'évaluation, une procédure d'initialisation, un ensemble d'opérateurs et un ensemble de paramètres qui gouvernent l'élaboration de la population initiale, l'exécution des opérateurs et l'arrêt de génération de nouvelles populations. De façon générale, un algorithme génétique fonctionne selon les étapes suivantes :

- **Étape 1:** On génère une population initiale de taille n , représentant le nombre de chromosomes. Puis on choisit au hasard les gènes qui composent chaque chromosome. La qualité de la population initiale est très importante pour la génération de meilleures solutions. La diversité de la population est très importante pour éviter la convergence prématurée vers des minimums locaux. Cette diversité de population se définit initialement et se maintient en combinant diverses stratégies de croisement et de mutation.
- **Étape 2:** On évalue chaque chromosome par la fonction objective, ce qui permet de déduire sa valeur d'aptitude.
- **Étape 3:** On exécute les cycles de génération de populations. Chaque nouvelle génération remplace la précédente. Le nombre de cycle x est déterminé au départ. Dans chaque cycle, n chromosomes sont choisis pour reproduction et croisement deux à deux. Après la création de la $x^{\text{ème}}$ population, les chromosomes vont évoluer de façon telle que cette dernière génération contient des chromosomes qui sont meilleurs que ceux des générations précédentes.

3.2.9 Conclusion :

Ce chapitre a établi les fondations nécessaires à la compréhension des algorithmes génétiques, de leurs mécanismes et de leur puissance. Ces algorithmes classés parmi les méthodes stochastiques, s'inspirent de l'évolution génétique des espèces, plus précisément du principe de la sélection naturelle. Le domaine d'application des algorithmes génétiques est assez large. En effet, depuis leur adaptation, ces méthodes connaissent une expansion considérable. Les algorithmes génétiques dans les applications qu'on leur a soumis ont montré leur grande souplesse et leur simplicité d'utilisation. Cette science à part entière a trouvé des applications pratiques que ce soit dans l'industrie ou dans d'autres.

Dans le 5ème chapitre, cet algorithme sera appliqué à la résolution d'un problème de quantification d'endommages dans les structures poutres stratifiées en utilisant les données dynamique.

Chapitre 4 : Localisation d'endommagements basée sur les données vibratoires.

4 Localisation d'endommagements basée sur les données vibratoires

4.1 Introduction :

De nombreuses méthodes, utilisant les paramètres modaux comme indicateurs d'endommagement, ont été développées ces dernières années. L'idée de base de ces techniques est que les paramètres modaux sont fonctions des propriétés physiques de la structure (masse, amortissement et de rigidité). Par conséquent, des changements dans les propriétés physiques provoquent des changements dans les propriétés modales.

Dans ce chapitre nous allons présenter deux méthodes d'identification d'endommagements basées sur les données vibratoires, la première est basée sur l'énergie de déformation modale et la deuxième sur la réponse fréquentielle.

4.2 Méthode basée sur l'énergie de déformation modale :

4.2.1 Introduction :

Dans cet travail, un indicateur d'endommagement, basé sur l'énergie de déformation modale, est utilisé pour identifier d'éventuels endommagements dans les structures en matériaux composites renforcées par des fibres longues. Deux types de structures, poutres unidirectionnelle et stratifiée, et plusieurs scénarios d'endommagements ont été considérés afin de vérifier l'efficacité de cet indicateur.

4.2.2 Présentation de la méthode :

L'équation aux valeurs propres d'une structure à *nddl* s'écrit sous la forme :

$$([K] - \lambda_i [M]) \{\phi\}_i = 0 \quad (4.11)$$

Où:

$[K]$ et $[M]$ sont les matrices de rigidité et de masse de la structure, respectivement.

λ_i et $\{\phi\}_i$ sont respectivement les valeurs et vecteurs propres.

Les énergies de déformation modale MSE_i^{eu} et MSE_i^{ed} des structures respectivement saine et endommagée sont distribuées dans chaque élément sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} MSE_i^{eu} &= \frac{1}{2} \{\phi\}_i^T [K]^e \{\phi\}_i \\ MSE_i^{ed} &= \frac{1}{2} \{\phi\}_i^{dT} [K]^e \{\phi\}_i \end{aligned} \quad (4.12)$$

Avec :

n est le nombre d'éléments finis de la structure,

m est le nombre de modes,

$[K]^e$ est la matrice de rigidité élémentaire de la structure saine.

L'énergie modale totale de la structure peut être calculée en additionnant le MSE de chaque élément, alors on peut écrire :

$$\begin{aligned}
 MSE_i^u &= \sum_{e=1}^n MSE_i^{eu} \\
 MSE_i^d &= \sum_{e=1}^n MSE_i^{ed}
 \end{aligned}
 \tag{4.13}$$

Pour normaliser le MSE_i^{eu} et MSE_i^{ed} on divisera chaque énergie élémentaire sur l'énergie totale, donc l'énergie normalisée s'écrit :

$$\begin{aligned}
 NMSE_i^{eu} &= \frac{MSE_i^{eu}}{MSE_i^s} \\
 NMSE_i^{ed} &= \frac{MSE_i^{ed}}{MSE_i^d}
 \end{aligned}
 \tag{4.14}$$

Après normalisation du MSE , on peut choisir les premiers m modes comme paramètres efficaces, et on peut écrire :

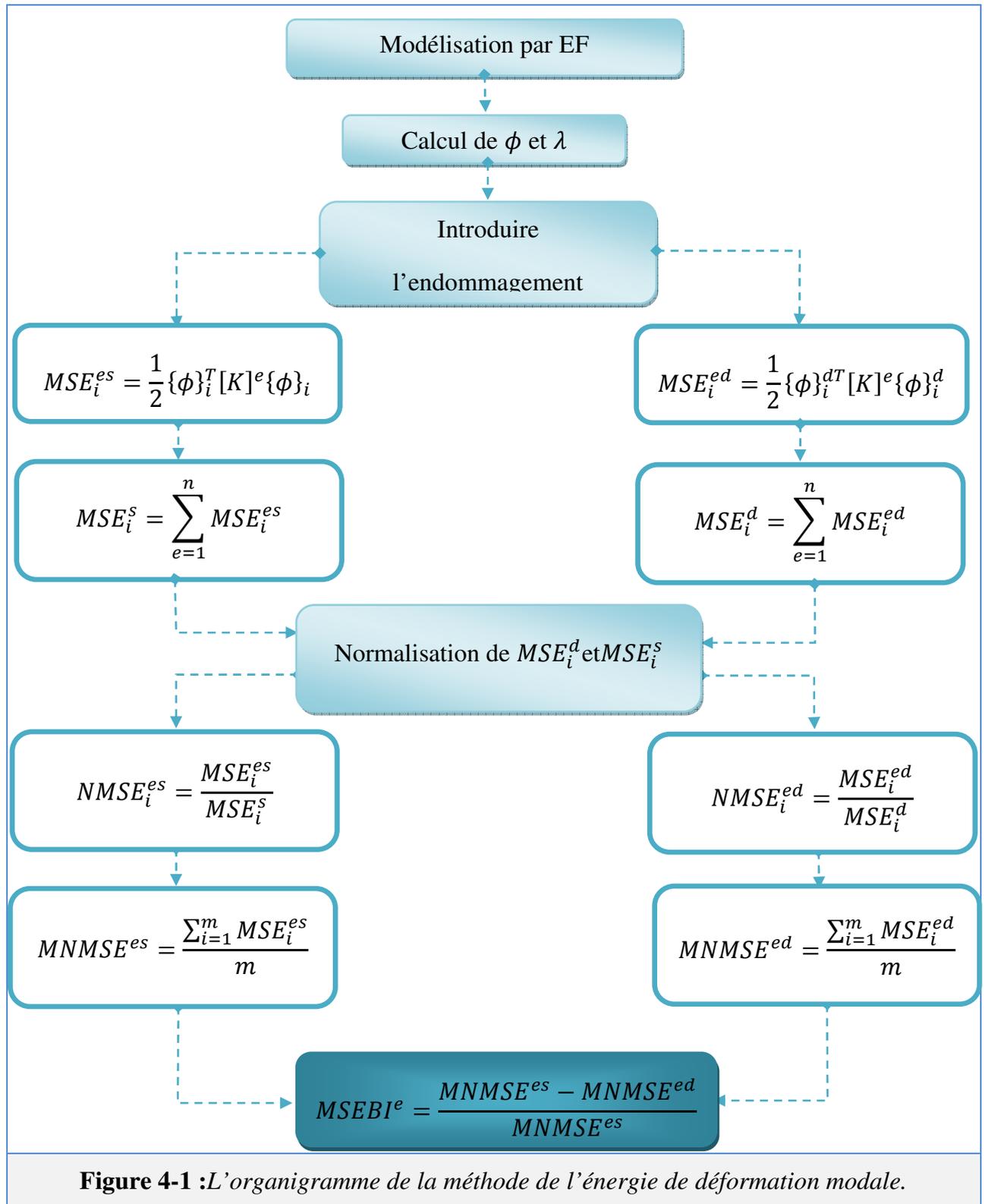
$$\begin{aligned}
 MNMSE^{eu} &= \frac{\sum_{i=1}^m MSE_i^{eu}}{m} \\
 MNMSE^{ed} &= \frac{\sum_{i=1}^m MSE_i^{ed}}{m}
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

L'indicateur nommé l'indice de base d'énergie de déformation modale $MSEBI$ s'écrit sous la forme suivante :

$$MSEBI^e = \frac{MNMSE^{eu} - MNMSE^{ed}}{MNMSE^{eu}}
 \tag{4.16}$$

Pour localiser les endommagements, il suffit juste de prendre les e indices $MSEBI$ non nuls et les éléments correspondants, sachant que l'indice des éléments sains sera nul[67].

L'organigramme ci dessous illustre les différentes étapes de la méthode de détection d'endommagements basée sur la variation de l'énergie de déformation modale.



4.2.3 Applications et tests numériques :

Afin de vérifier la robustesse de la méthode proposée, nous avons considéré deux types de structures, poutre unidirectionnelle (un pli en graphite/époxy orientation des fibres suivant l'axe x) et une poutre stratifiée (quatre plis en graphite/époxy), $[0^\circ \quad 90^\circ_2 \quad 0^\circ]$.

4.2.3.1 Poutre unidirectionnelle :

Soit une structure poutre unidirectionnelle en matériau composite graphite/époxyde encastree-libre discrétisée en 20 éléments finis SI12, dont les caractéristiques sont comme suit : $L = .5m, b = 0.05m, h = 0.05$.

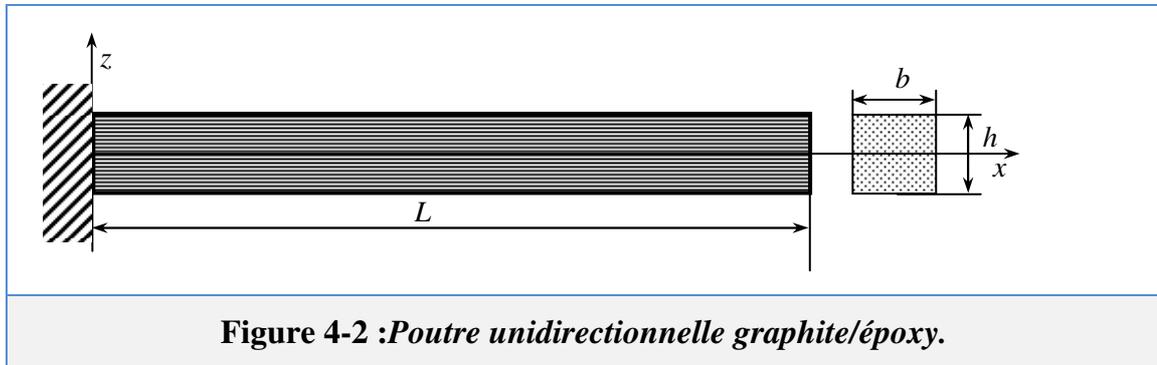


Figure 4-2 :Poutre unidirectionnelle graphite/époxy.

Le récapitulatif des cas test est résumé dans le tableau suivant :

<i>Nbre d'éléments Endommagés</i>	<i>N° Cas test</i>	<i>Element endommagé</i>	<i>% d'endommagement</i>
<i>1 elt</i>	<i>Test N° 01</i>	<i>5</i>	<i>25 %</i>
	<i>Test N° 02</i>	<i>15</i>	<i>35 %</i>
<i>2 elts</i>	<i>Test N° 03</i>	<i>3 et 12</i>	<i>25 et 40 %</i>
<i>3 elts</i>	<i>Test N° 04</i>	<i>2, 10 et 15</i>	<i>45, 35, et 20 %</i>
<i>4 elts</i>	<i>Test N° 05</i>	<i>2, 6, 11 et 16</i>	<i>25, 20, 40 et 35 %</i>

Tableau 4-1 :Récapitulatif des cas test sur la structure unidirectionnelle.

Le taux d'endommagement représenté dans la quatrième colonne du tableau 4-2 correspond au pourcentage de réduction de module d'Young dans la zone considérée endommagée.

Les cinq premières fréquences naturelles des structures saines et endommagées (cas de test 3) sont présentées dans le tableau 4-3.

Tableau 4-2 :Fréquences naturelles des structures saines et endommagées (cas de test 3).

<i>Fréquence Hz</i>	<i>1^{ere}</i>	<i>2^{ieme}</i>	<i>3^{ieme}</i>	<i>4^{ieme}</i>	<i>5^{ieme}</i>
<i>Structure saine</i>	<i>32.90</i>	<i>205.50</i>	<i>570.80</i>	<i>1106.00</i>	<i>1802.30</i>
<i>Structure endommagée</i>	<i>32.10</i>	<i>198.00</i>	<i>564.30</i>	<i>1089.20</i>	<i>1751.70</i>

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures ci-dessous :

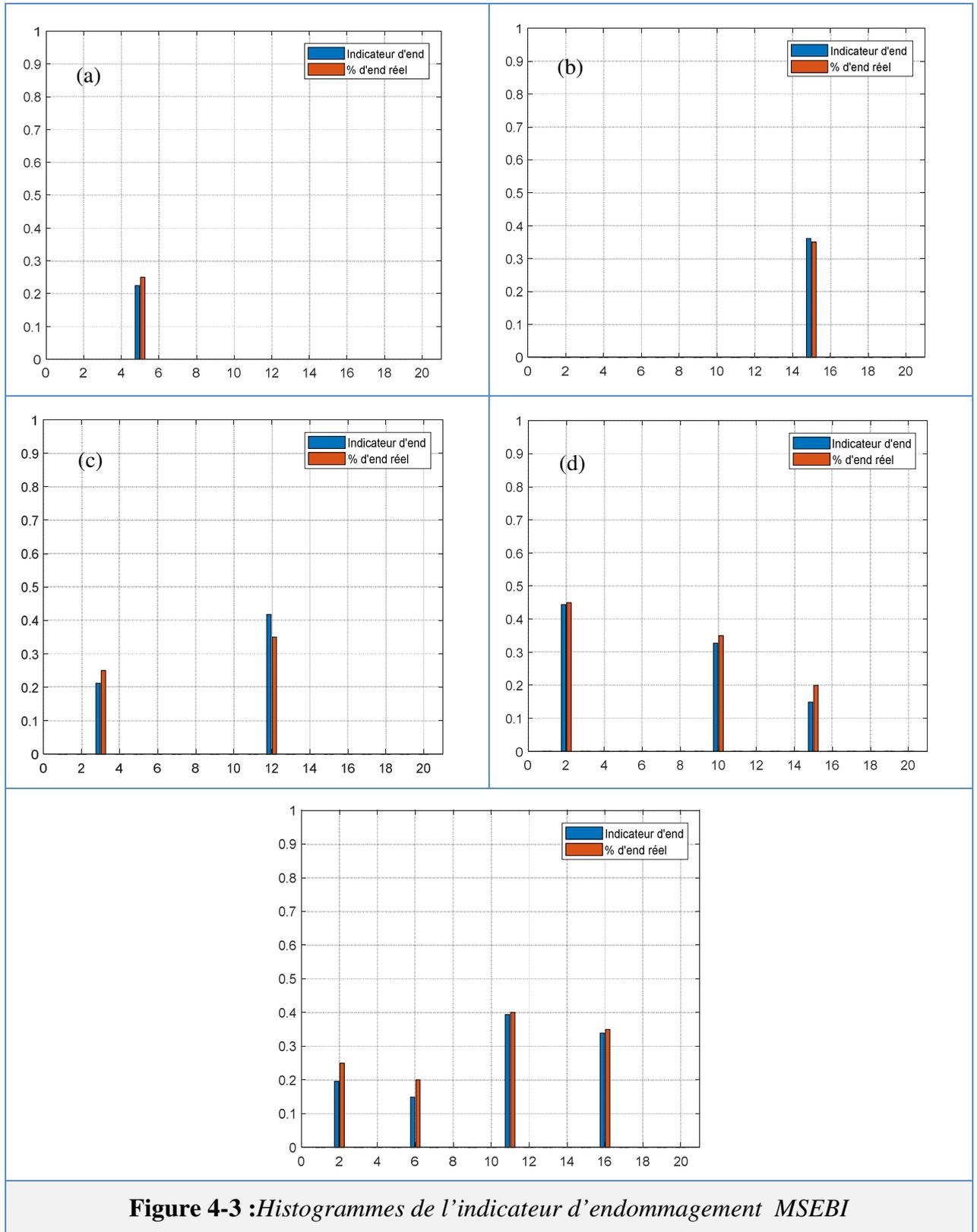


Figure 4-3 : Histogrammes de l'indicateur d'endommagement *MSEBI*

D'après les figures 4-3, nous constatons que la valeur de l'indicateur d'endommagement *MSEBI*, de l'élément endommagé, est la plus grande et cela quelque soit sa position sur la poutre et quelque soit le pourcentage d'endommagement. La valeur de l'indicateur d'endommagement calculée est différente du % d'affectation réel.

4.2.3.2 Poutre stratifiée :

Soit une structure poutre encastree-libre stratifiée quatre couches en matériau composite graphite/époxyde discrétisée en 20 éléments finis SI12. Les propriétés mécaniques et géométriques de cette dernière sont : $E_x = 14,48.10^{10} Pa$; $E_y = 0,965.10^{10} Pa$; $G_{yz} = 0,345.10^{10} Pa$; $\rho = 1390 Kg/m^3$ $G_{xy} = G_{xz} = 0,414.10^{10} Pa$; $\nu_{xy} = 0.25$; $L = 1m$; $b = 0.05m$; $h = 0.04m$.

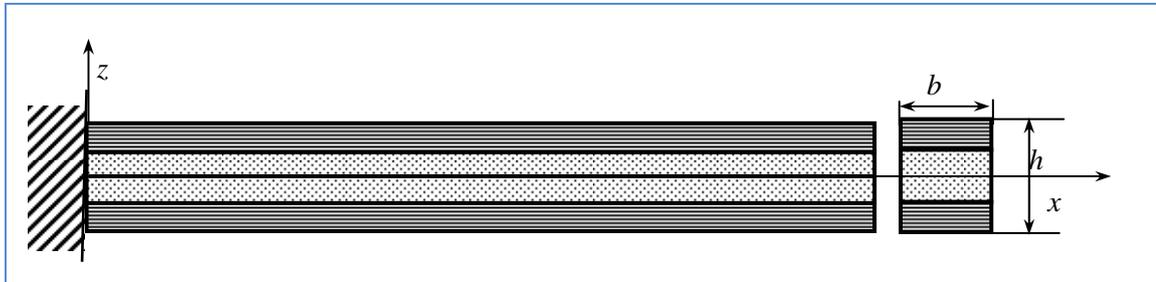


Figure 4-4 :Poutre stratifiée graphite/époxy (0°/90°/0°).

Le récapitulatif des cas test est résumé dans le tableau suivant :

Nbre d'éléments Endommagés	N° Cas test	Element endommagé	% d'endommagement
1 elt	Test N° 01	5	25 %
2 elts	Test N° 02	4 et 16	35 et 25%
3 elts	Test N° 03	3, 18 et 24	25, 40 et 25 %
4 elts	Test N° 04	2, 10, 22 et 28	25, 40, 25 et 40 %
5 elts	Test N° 05	2, 12, 21, 26 et 30	40, 35, 25, 25 et 20 %

Tableau 4-3 :Récapitulatif des cas test sur la poutre stratifiée.

Le taux d'endommagement représenté dans la quatrième colonne du tableau correspond au pourcentage de réduction de module d'Young dans la zone considérée endommagée.

Les cinq premières fréquences naturelles des structures saines et endommagées (cas de test 2) sont présentées dans le tableau 4-5.

Fréquence Hz	1 ^{ere}	2 ^{ieme}	3 ^{ieme}	4 ^{ieme}	5 ^{ieme}
Structure saine (u)	61.20	357.70	911.80	1599.9	1863.4
Structure endommagée(d)	59.60	352.30	910.9	1587.8	1822.6

Tableau 4-4: fréquences naturelles des structures saines et endommagées (cas de test 2).

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures ci-dessous :

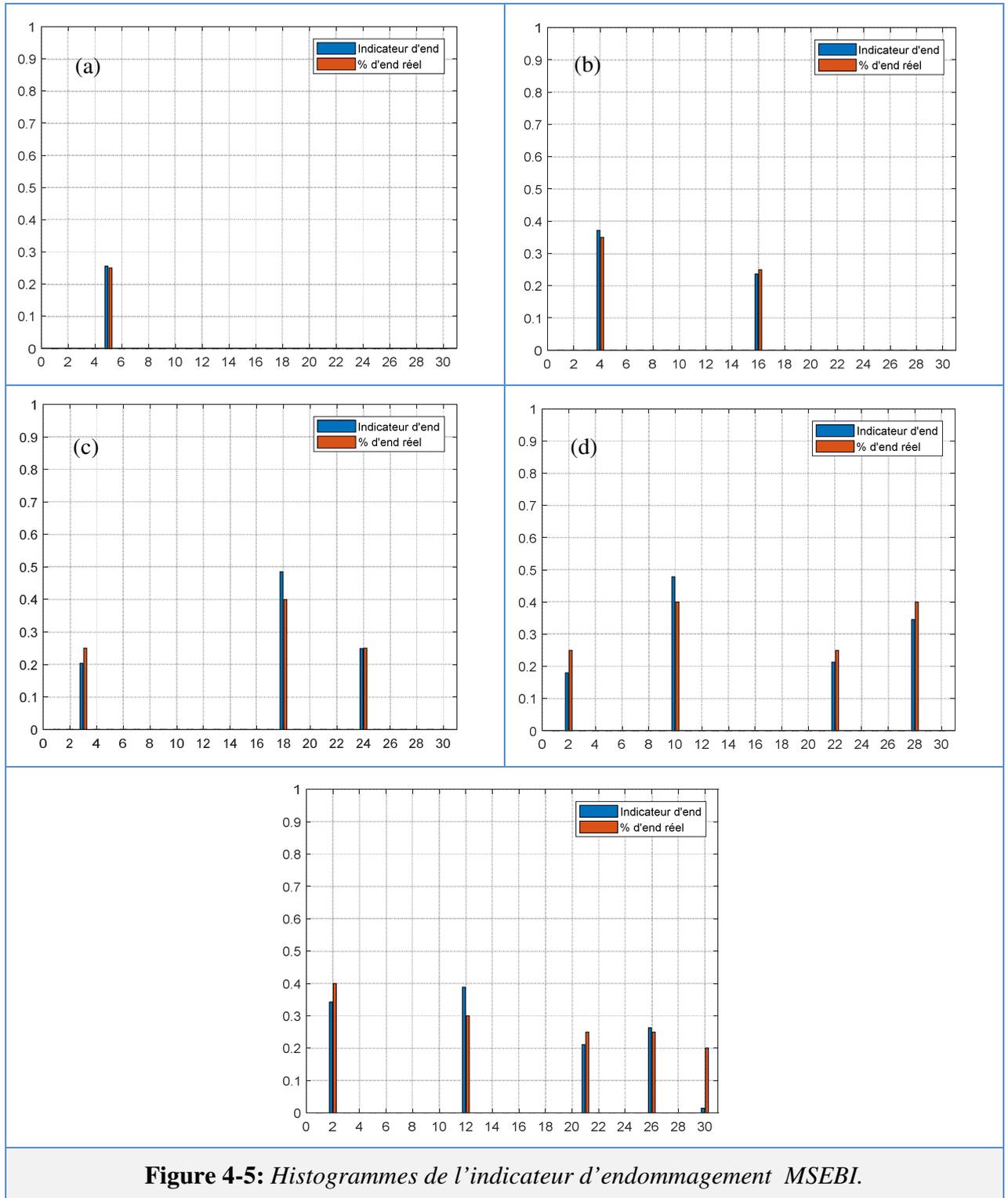


Figure 4-5: Histogrammes de l'indicateur d'endommagement *MSEBI*.

Les figures 4-5, montrent que la valeur de l'indicateur d'endommagement *MSEBI*, de l'élément endommagé, est la plus grande et cela quelque soit sa position sur la poutre et quelque soit le pourcentage d'endommagement. La valeur de l'indicateur d'endommagement calculée est différente du % d'affectation réel.

D'après les résultats obtenus dans cette application, nous pouvons conclure que la méthode basée sur l'énergétique de déformation modale permet de détecter et de localiser les endommagements dans le cas de structures poutres stratifiées.

4.3 Méthode basée sur la fonction réponse fréquentielle (FRF) :

La méthode utilisée dans cette partie du travail se divise en deux parties bien distinctes. La première étape est de déterminer s'il y a présence d'un défaut et cela en utilisant la réponse fréquentielle de la structure a une force excitatrice de type harmonique. La deuxième étape consiste à localiser les endommagements.

4.3.1 Détection de défauts en utilisant les FRF

La présence d'un défaut dans une structure présente une flexibilité locale qui affecte la réponse dynamique. Le principe de cette étape est que la réponse d'une structure endommagée à une sollicitation vibratoire diffère de celle d'une structure saine, donc nous n'avons qu'à comparer les deux réponses afin de déterminer s'il y a présence d'un défaut dans la structure.

Les équations de mouvement d'une structure saine et endommagée sont données par les équations (4.1). Dans notre étude, on prend le système forcé non amorti :

$$\begin{cases} [M]_u \{\ddot{X}(t)\} + [K]_u \{X(t)\} = F(t) \\ [M]_d \{\ddot{X}(t)\} + [K]_d \{X(t)\} = F(t) \end{cases} \quad (4.1)$$

On suppose que la force $F(t)$ soit harmonique, alors la force extérieure s'écrit comme suit :

$$F(t) = \{F\}e^{j\omega t} = \{F\}(\cos(\omega t + \varphi)) \quad (4.2)$$

Et pour le déplacement :

$$X(t) = \{X\}(\cos(\omega t + \varphi)) = \{X\}e^{j\omega t} \quad (4.3)$$

Si on remplace (4.2) et (4.3) dans les équations (4.1), on aura :

$$\begin{cases} \{-\omega^2[M]_u + [K]_u\}\{X\}_u e^{j\omega t} = \{F\}e^{j\omega t} \\ \{-\omega^2[M]_d + [K]_d\}\{X\}_d e^{j\omega t} = \{F\}e^{j\omega t} \end{cases} \quad (4.4)$$

Après simplification par $e^{j\omega t}$ le résultat obtenu est :

$$\begin{cases} \{X_u(\omega)\} = \left\{ \left(-\omega^2[M]_u + [K]_u \right)^{-1} \right\} \{F(\omega)\} \\ \{X_d(\omega)\} = \left\{ \left(-\omega^2[M]_d + [K]_d \right)^{-1} \right\} \{F(\omega)\} \end{cases} \quad (4.5)$$

Pour une même force d'excitation, la réponse fréquentielle varie suivant l'état de la structure. De là, nous dégageons l'indicateur de détection d'endommagement en comparant $\{X_d(w)\}$ et $\{X_u(w)\}$.

La comparaison avec la méthode graphique donne un résultat direct et facile à interpréter. Le décalage entre la réponse nous renseigne sur l'endommagement ou non d'une des deux structures.

L'organigramme de la première partie de la méthode FRF est donné sur la figure suivante :

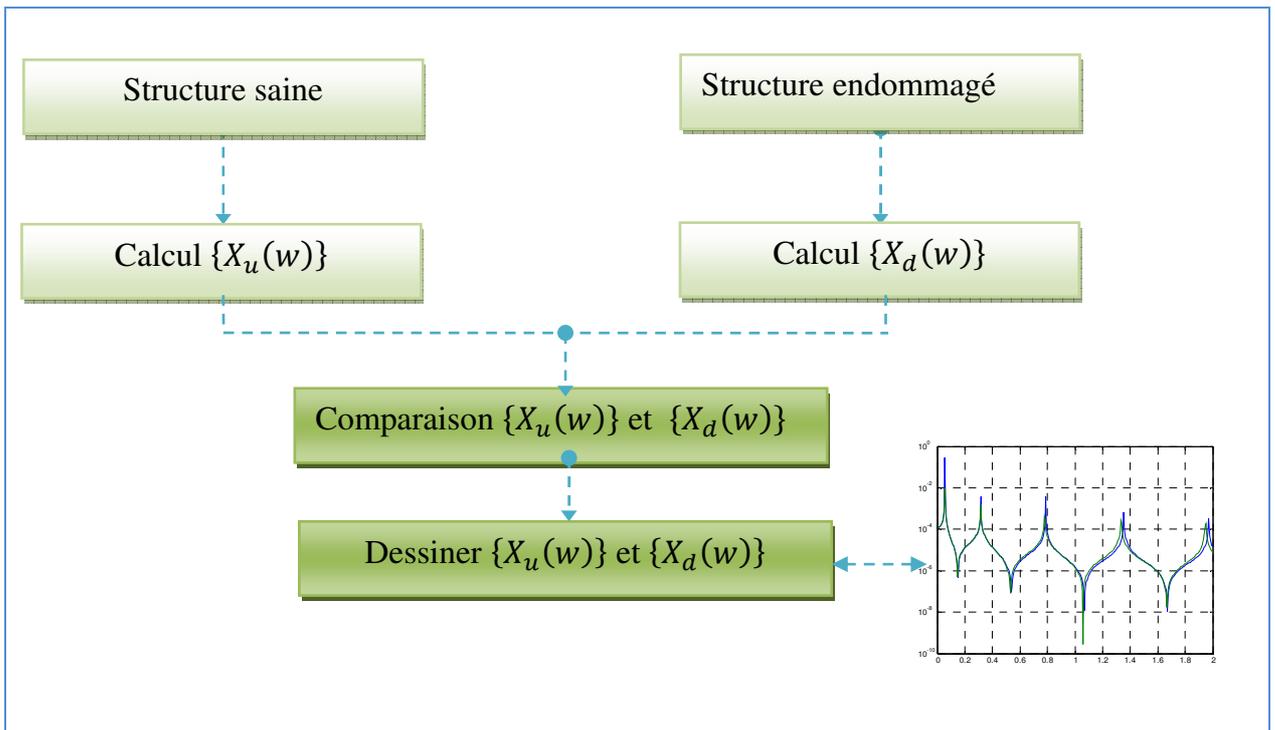


Figure 4-6 : Organigramme de la méthode FRF (détection).

4.3.1.1 Application de la méthode

Dans cette application nous considérons une structures en matériaux composite stratifiée $[0^\circ/90^\circ_2/0^\circ]$ graphite/époxy, encastrée libre, en appliquant une force d'excitation harmonique verticalement, à l'extrémité de la poutre. Cette dernière est sollicitée par une force harmonique d'amplitude $10N$ à son extrémité libre.

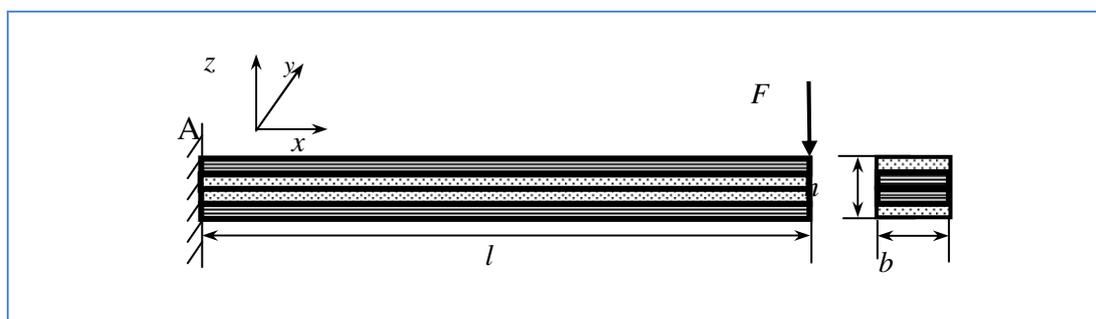


Figure 4-7: Poutre encastrée- Libre en matériau composite stratifiée $[0^\circ/90^\circ_2/0^\circ]$ graphite/époxyde.

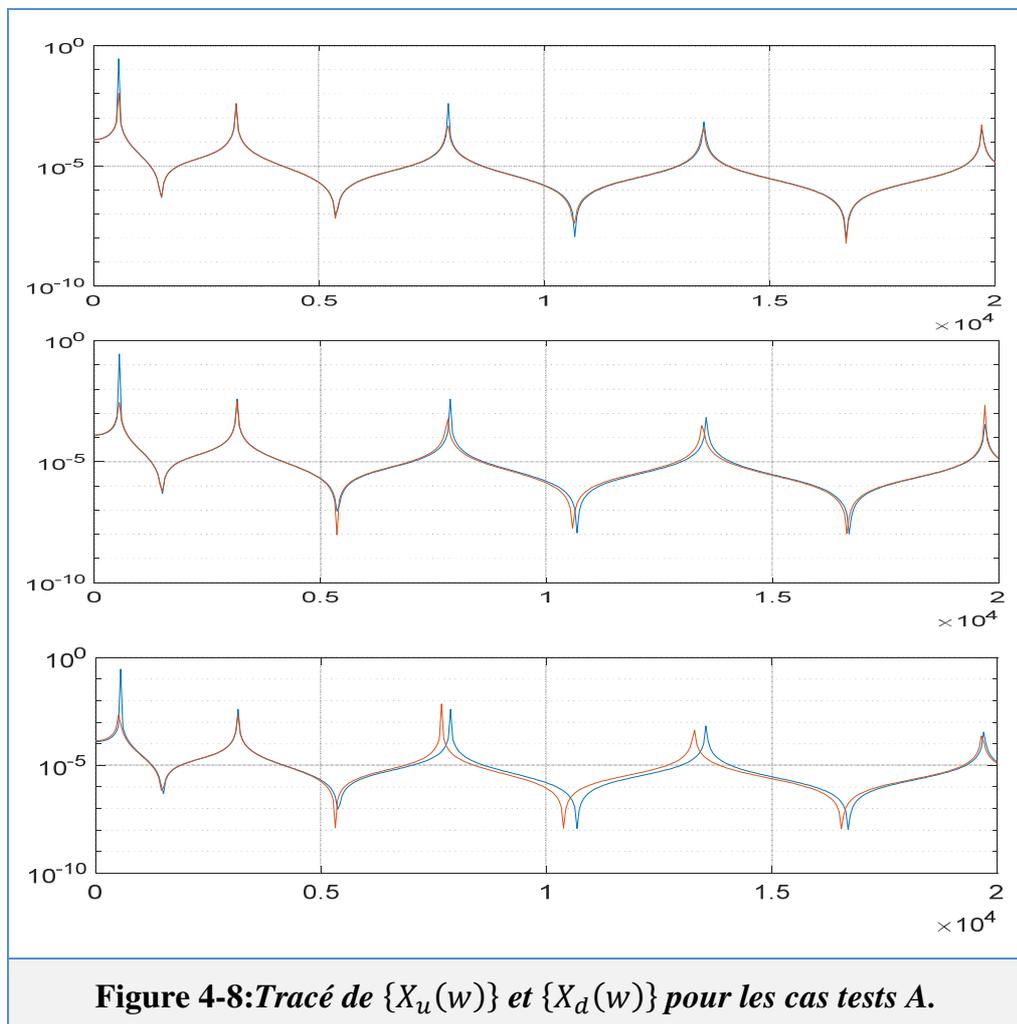
Les cas test considérés sont donnés sur le tableau suivant :

Scenario	Eléments endommagés	% d'endommagement
A	5	10 , 30 et 60%
B	10	5, 25 et 50%
C	5 et 10	5, 20% et 25, 25%
D	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 et 20	25%

Tableau 4-5: Cas test étudiés.

Pour plus de clarté nous allons présenter les résultats sous forme de graphiques afin de visualiser directement le décalage entre la réponse fréquentielle de la poutre saine et celle de la poutre endommagée.

les représentations graphique de $\{X_u(w)\}$ et $\{X_d(w)\}$ pour les cas test considérés sont données sur les figures suivantes :



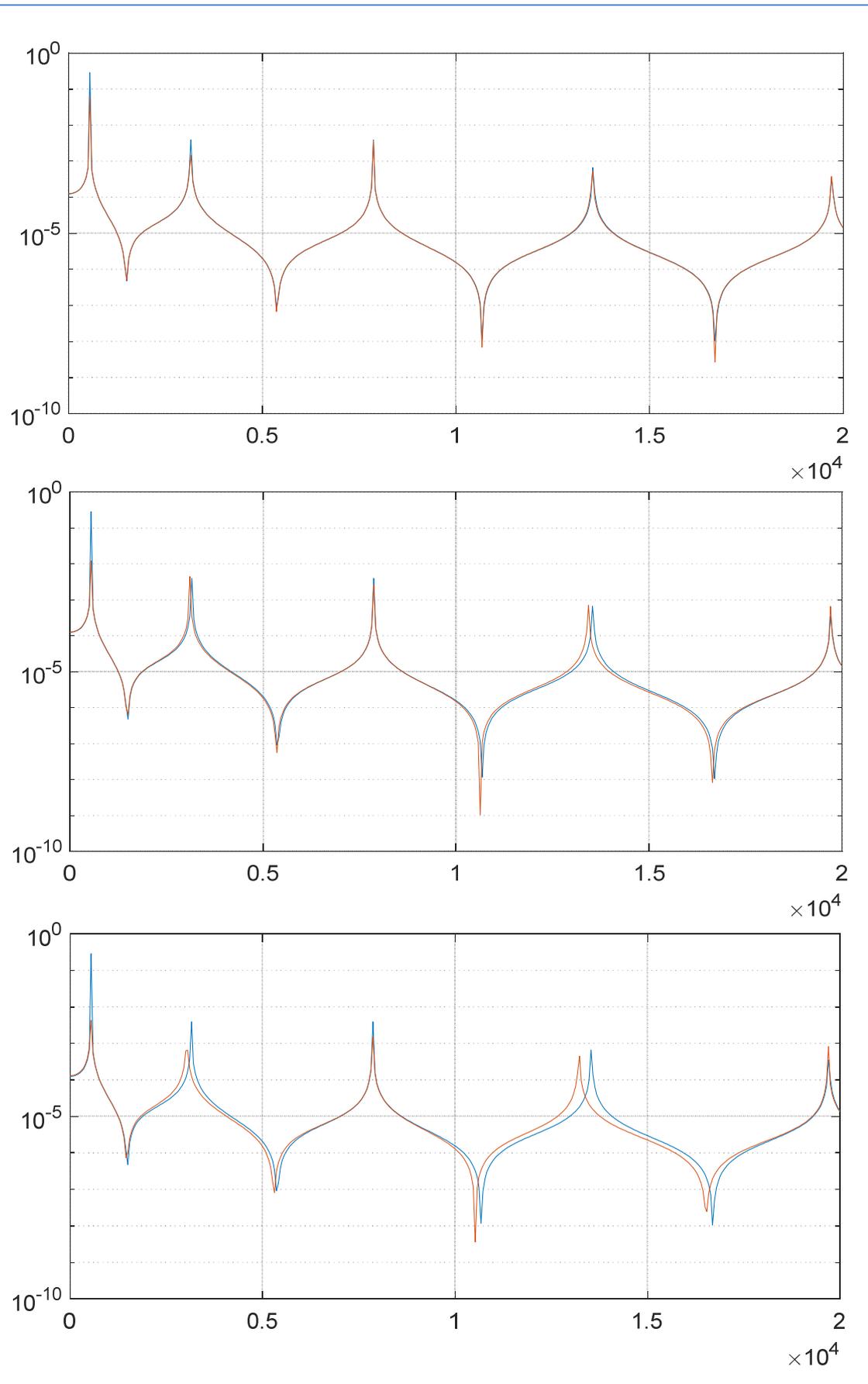


Figure 4-9 : Tracé de $\{X_u(w)\}$ et $\{X_d(w)\}$ pour les cas tests B.

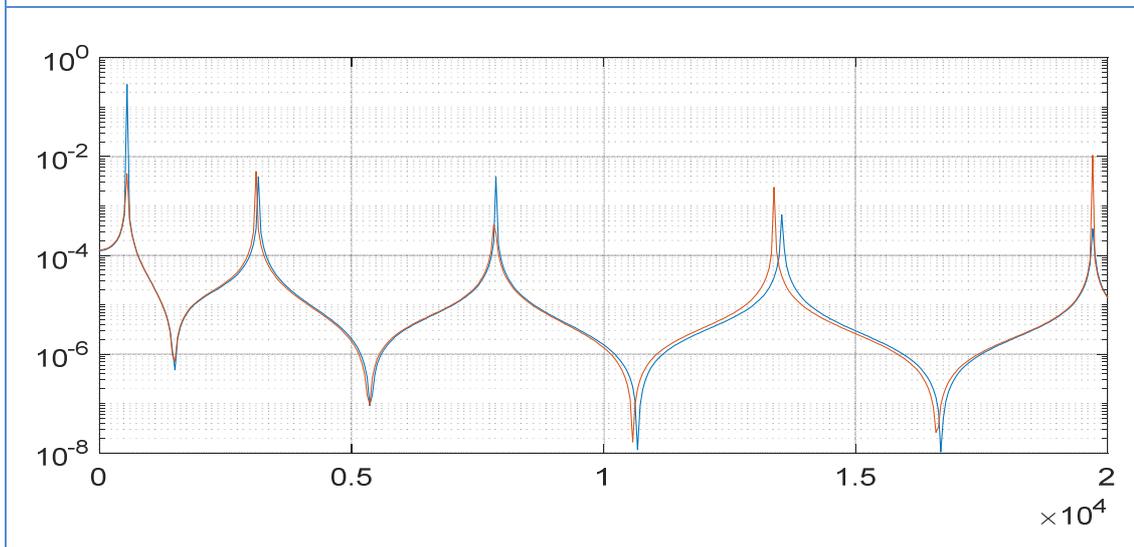
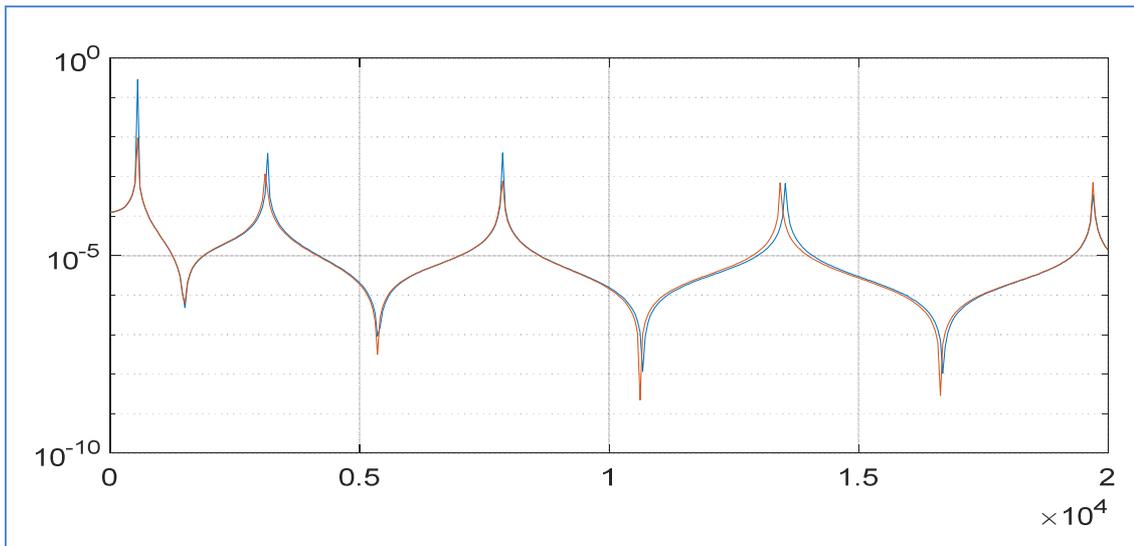


Figure 4-10 : *Tracé de $\{X_u(w)\}$ et $\{X_d(w)\}$ pour les cas tests C.*

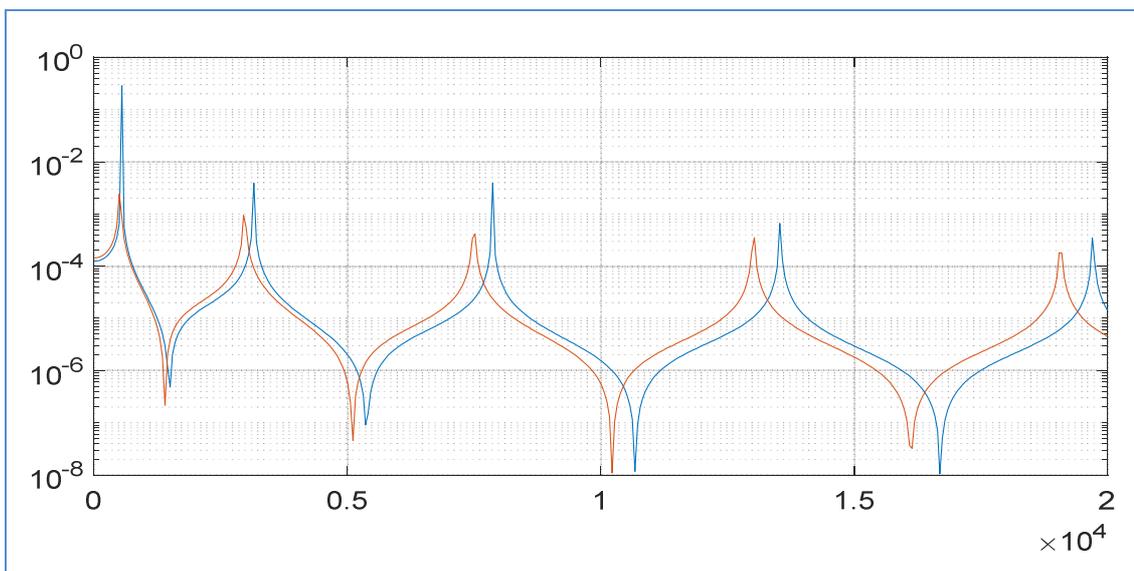


Figure 4-11 : *Tracé de $\{X_u(w)\}$ et $\{X_d(w)\}$ pour les cas tests D.*

4.3.1.2 Interprétation des résultats :

Nous remarquons une variation de la réponse fréquentielle entre la structure saine et les différentes structures endommagées, soit avec un endommagement ou plusieurs endommagements figures 4-8, 4-9, 4-10 et 4-11; Cette variation se traduit par une diminution des fréquences de résonances des poutres endommagées sollicitées par le même chargement harmonique que la poutre saine. Cet amoindrissement de la fréquence de résonance est principalement causé par la perte de rigidité liée aux défauts.

On remarque que le graphe de $\{X_u(w)\}$ et le graphe de $\{X_d(w)\}$ sont décalés, ce décalage peut être interprété par la présence d'éventuelles endommagements.

On peut noter que le décalage des deux graphes est plus important à chaque fois que le nombre d'éléments endommagé ou taux d'endommagements augmentent.

4.3.2 Localisation des endommagements:

Après avoir détecté l'existence de défauts dans une structure en comparant le graphe de $\{X_u(w)\}$ à celui de $\{X_d(w)\}$ on passe maintenant à la localisation de la position du défaut et donc au calcul de l'indicateur d'endommagement. Pour cela nous avons opté pour l'utilisation de la méthode d'énergie de déformation modale. Dans l'expression de l'énergie de déformation modale nous proposons l'utilisation de la réponse fréquentielle à la place des vecteurs propres.[55]

$$\left. \begin{aligned} Reu_j^i &= \frac{1}{2} \{X_u\}_i^T [Keu(j)] \{X_u\}_i \\ Red_j^i &= \frac{1}{2} \{X_d\}_i^T [Keu(j)] \{X_d\}_i \end{aligned} \right\} \quad i = 1:n_r, \quad et j = 1:n \quad (4.6)$$

Avec :

n_r : nombre de réponses fréquentielles,

n : nombre d'éléments

En additionnant le Reu et le Red de chaque élément, on aura alors :

$$\left. \begin{aligned} RTU_j &= \sum_{i=1}^{nr} Reu_j^i \\ RTD_j &= \sum_{i=1}^{nr} Red_j^i \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

Maintenant on les normalise :

$$\left. \begin{aligned} NRU_j &= \frac{Reu_i^{es}}{RTU_i^s} \\ NRD_i^{es} &= \frac{Red_i^{es}}{RTD_i^s} \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

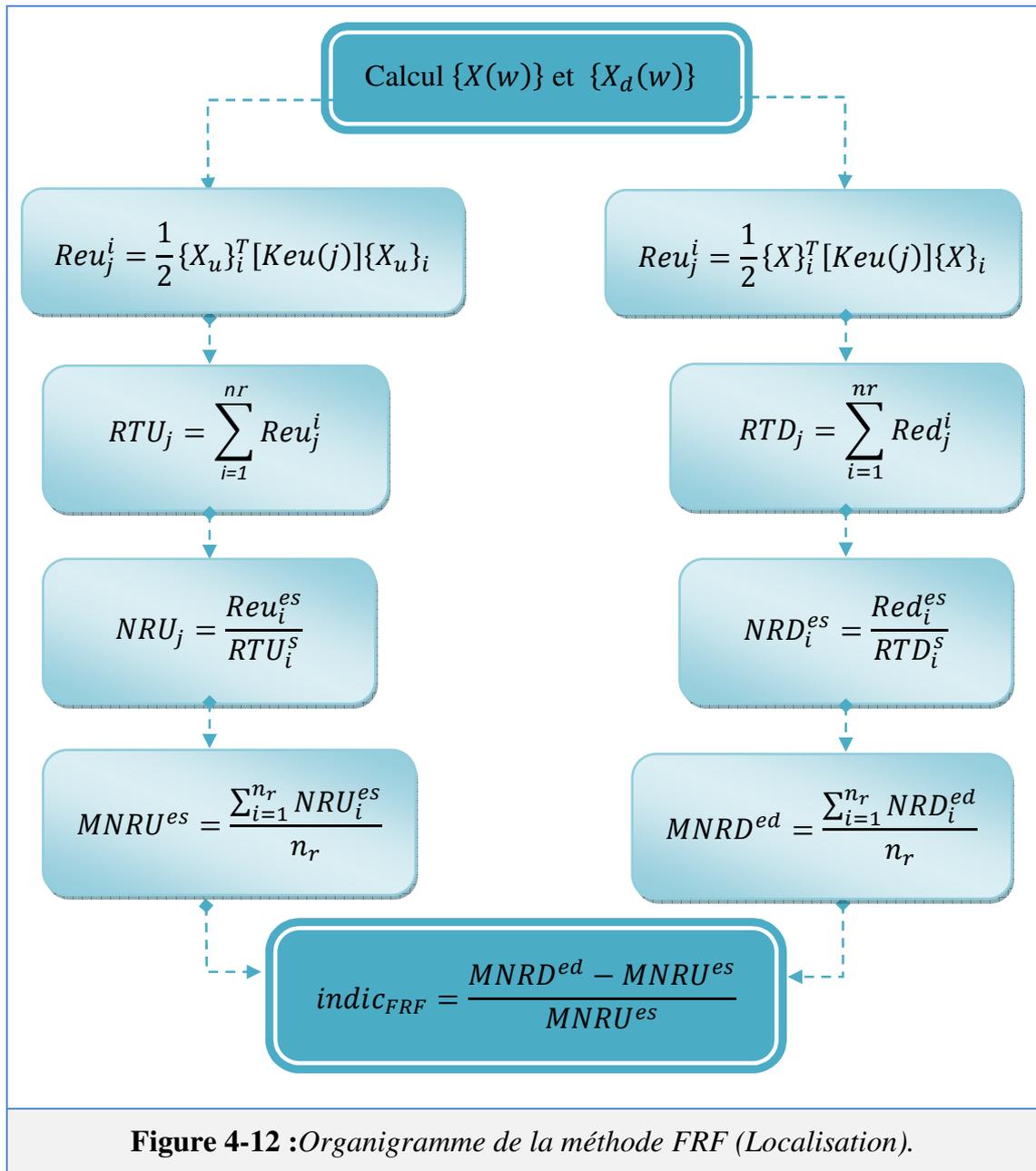
Après normalisation de NRU_i^{es} et NRD_i^{ed} , on choisit les premières réponses fréquentielles comme paramètres efficaces.

$$\left. \begin{aligned} MNRU^{es} &= \frac{\sum_{i=1}^{n_r} NRU_i^{es}}{n_r} \\ MNRD^{ed} &= \frac{\sum_{i=1}^{n_r} NRD_i^{ed}}{n_r} \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Nous calculons l'indicateur $indic_{FRF}$, basé sur l'énergie de déformation et FRF par :

$$indic_{FRF} = \frac{MNRD^{ed} - MNRU^{es}}{MNRU^{es}} \quad (4.10)$$

L'organigramme de la deuxième partie de la méthode FRF est donné sur la figure suivante :



4.3.2.1 Application de la méthode pour la localisation :

Nous avons appliqué cette méthode pour localiser les défauts. Les valeurs de l'indicateur < 0 sont des valeurs non significatifs, donc nous avons négligé ces valeurs dans notre application.

Les résultats obtenus sont représentés graphiquement sur les figures 13 à 16.

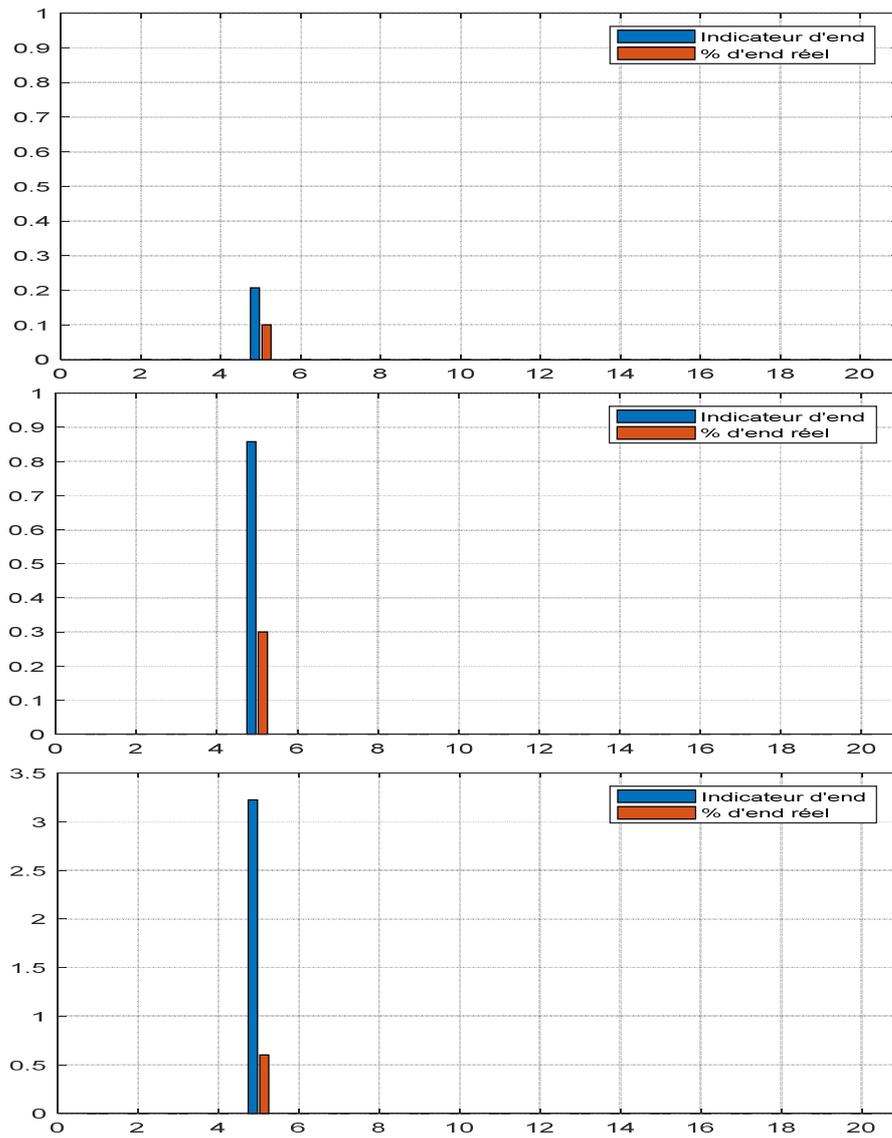


Figure 4-13 : Histogrammes de l'indicateur d'endommagement pour le cas test A.

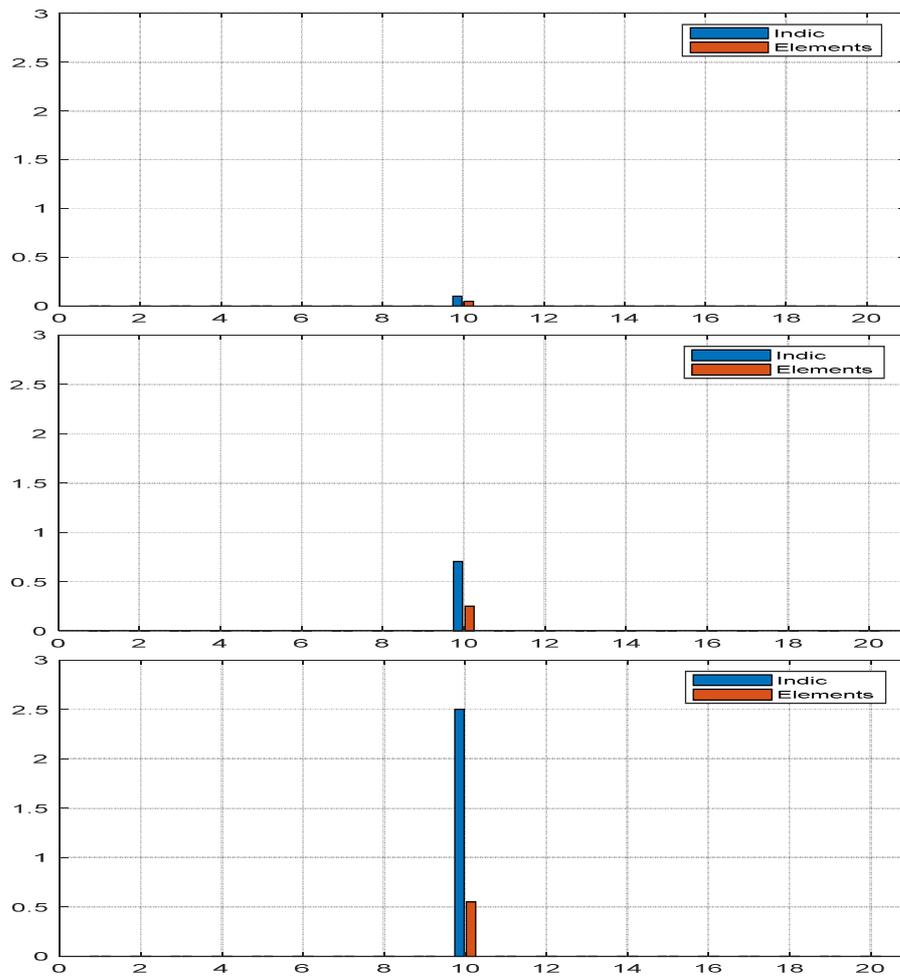


Figure 4-14 : Histogrammes de l'indicateur d'endommagement pour le cas test B.

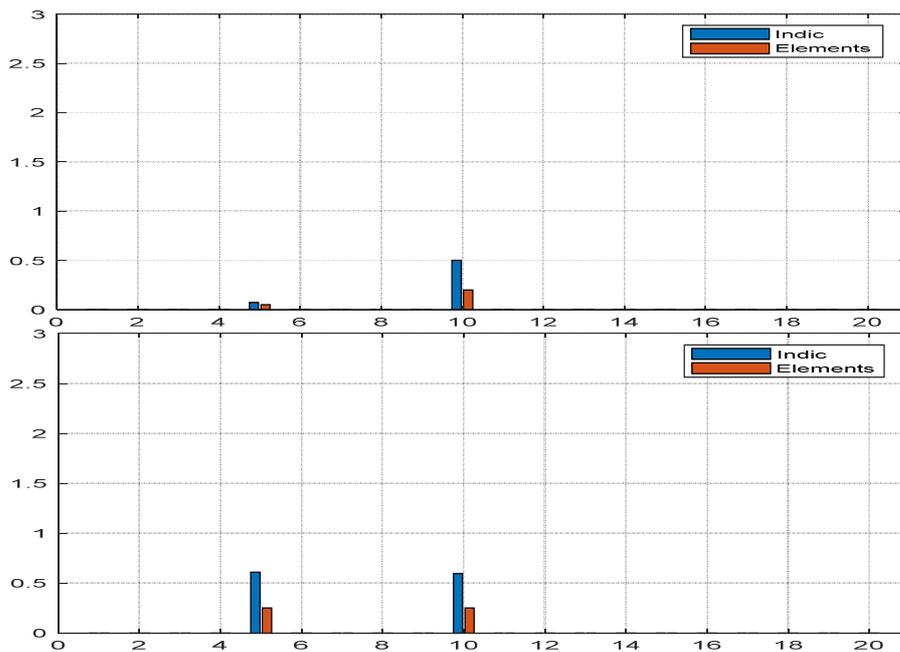


Figure 4-15 : Histogrammes de l'indicateur d'endommagement pour le cas test C.

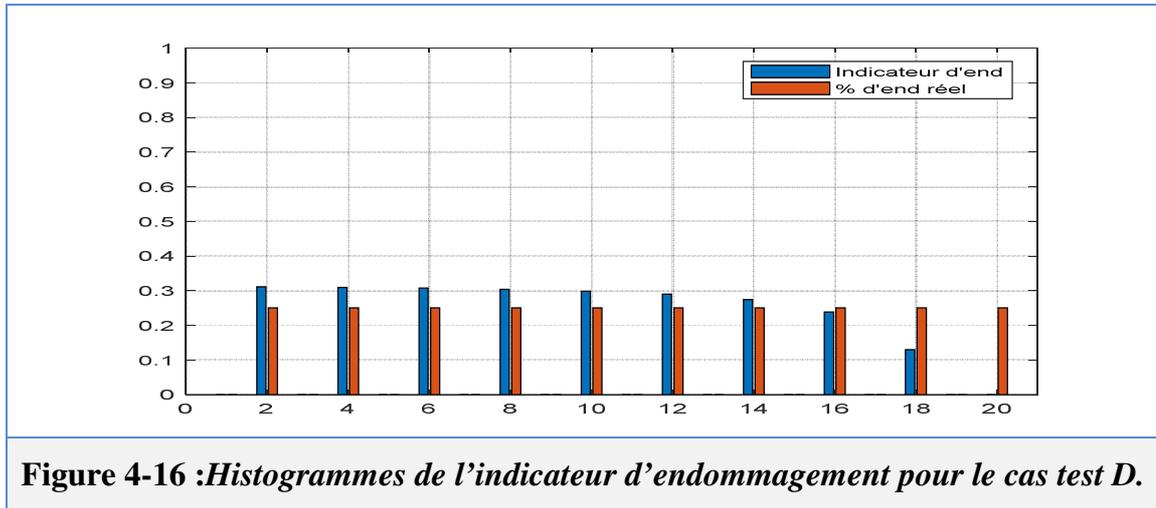


Figure 4-16 :Histogrammes de l'indicateur d'endommagement pour le cas test D.

4.3.2.2 Interprétations des résultats :

Nous constatons que les valeurs de l'indicateur 'indic' des éléments endommagés sont plus importantes, et que l'ampleur de ces valeurs dépend essentiellement du pourcentage de réduction de la rigidité.

Les résultats obtenus montrent que la réponse fréquentielle permet de manière très simple de déterminer si la structure comporte des défauts, l'indicateur d'endommagement basé sur l'énergie de déformation modale couplée avec la réponse fréquentielle est efficace pour la détection et la localisation de défauts dans les structures poutres unidirectionnelles et les poutres stratifiées. Les limites de ces méthodes résident dans leurs incapacités à quantifier l'ampleur de ces derniers.

4.3.2.3 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié deux méthodes d'identification de défauts dans les structures poutres en matériaux composites : la première est basée sur l'énergie de déformation modale et la deuxième sur la réponse fréquentielle.

Les résultats obtenus montrent que la réponse fréquentielle permet de manière très simple de déterminer si une structure comporte des défauts. Les indicateurs d'endommagements basés sur l'énergie de déformation modale couplée avec la réponse fréquentielle sont efficaces pour la détection et la localisation de défauts dans les structures poutres unidirectionnelles et les poutres stratifiées et ce même dans le cas de plusieurs endommagements de différents types. Les limites de ces méthodes résident dans leurs incapacités à quantifier l'ampleur de ces derniers.

**Chapitre 5 : Localisation et quantification
d'endommagements avec la méthode de la
force résiduelle modale couplée avec
l'algorithme génétique.**

5 Localisation et quantification d'endommagements avec la méthode de la force résiduelle modale couplée avec l'algorithme génétique.

5.1 Introduction :

La capacité à contrôler une pièce mécanique sans l'abimer, ce qui n'était qu'un souhait il y a quelques décennies, est devenu aujourd'hui une réalité. Dans ce travail, nous proposons le couplage entre la méthode d'identification de défauts basée sur la force résiduelle modale et les algorithmes génétiques dans le but de quantifier la sévérité des endommagements. L'indicateur d'endommagements utilisé dans ce chapitre pour détecter et localiser des endommagements dans les structures en matériaux composites renforcées par des fibres longues est basé sur le concept de la force résiduelle modale [68]. Cette méthode s'appuie sur la base de l'analyse de l'état initial et final de la structure à savoir la matrice de masse et de rigidité et des données d'essai modal (Fréquences et modes propres) [69-71]. La méthode a été aussi bien considérée dans le cas d'un seul comme dans le cas de plusieurs endommagements.

5.2 Etude théorique :

L'équation aux valeurs propres d'une structure mécanique à n ddl s'écrit sous la forme suivante [6] :

$$([K] - \lambda_i[M])\{\varphi\}_i = 0 \text{ avec } i = 1, \dots, n \quad (5.1)$$

où $[K]$ et $[M]$ sont respectivement les matrices de rigidité et de masse globale.

$\lambda_i = \omega_i^2$; ω_i et $\{\varphi\}_i$; $i^{\text{ème}}$ fréquence naturelle et mode propre de la structure.

n : est le nombre total des modes propres de la structure.

Quand la structure présente des endommagements l'équation aux valeurs propres qui caractérisent la structure devient :

$$([K]_d - \lambda_{di}[M]_d)\{\varphi\}_{di} = 0 \text{ avec } i = 1, \dots, n \quad (5.2)$$

où : $[K]_d$ et $[M]_d$ sont respectivement les matrices de rigidité et de masses globale inconnues de la structure endommagée.

$\lambda_{di} = \omega_{di}^2$, λ_{di} $i^{\text{ème}}$ fréquence naturelle de la structure endommagée.

φ_{di} : $i^{\text{ème}}$ mode propre de la structure endommagée.

Nous supposons que la matrice de rigidité et la matrice de masse de la structure endommagée sont définies respectivement comme suit:

$$[K]_d = [K] + [\Delta K], \quad [M]_d = [M] + [\Delta M]$$

où $[\Delta K]$ et $[\Delta M]$ sont les variations inconnues de la matrice de rigidité et de la matrice de masse, qui résultent de l'endommagement. L'équation aux valeurs propres de la structure endommagée peut être écrite comme suit :

$$([K] - \lambda_{di}[M])\{\varphi\}_{di} = -([\Delta K] - \lambda_{di}[\Delta M])\{\varphi\}_{di} \text{ avec } i = 1, \dots, n \quad (5.3)$$

Le second membre de l'équation est défini comme étant le vecteur force résiduelle modale pour le $i^{\text{ème}}$ mode de la structure endommagée, désignée par :

$$\{R\}_i = -([\Delta K] - \lambda_{di}[\Delta M])\{\varphi\}_{di} \quad (5.4)$$

Le premier membre de l'équation 5.3 est défini comme étant la force résiduelle modale. Il est clair que la force résiduelle modale est nulle si et seulement si les λ_{di} et $\{\varphi\}_{di}$ sont égaux aux valeurs de base non endommagées λ_i et $\{\varphi\}_i$.

La force résiduelle modale $\{R\}_i$ peut être utilisée pour localiser l'emplacement de l'endommagement. Cette force est fondamentalement causée par le changement des paramètres structuraux dû à l'occurrence d'endommagements.

5.3 Indicateur d'endommagement :

L'index d'endommagement du $j^{\text{ème}}$ élément est ici exprimé comme le changement partiel de la rigidité de l'élément.

$$\Delta [k]_j^e = ([k]_j^e - [k]_{dj}^e) = \alpha_j [k]_j^e \quad (5.5)$$

où $[k]_j^e$ et $[k]_{dj}^e$ sont respectivement les $j^{\text{ème}}$ élément de la matrice élémentaire de la structure non endommagée et endommagée, $\Delta [k]_j^e$ est la variation de raideur de $j^{\text{ème}}$ élément.

Pour une valeur de $\alpha_j \in [0,1]$ qui indiquera une perte de la rigidité du $j^{\text{ème}}$ élément est non endommagé pour $\alpha_j = 0$ et complètement endommagé pour $\alpha_j = 1$.

Nous considérons que la masse de la structure endommagée n'est pas affectée, et que la rigidité de l'élément endommagé change, cela nous donne :

$$[\Delta M] = 0 \quad (5.6)$$

$$\Delta [k]_j^e = \alpha_j [k]_j^e \quad \text{Avec } j = 1, \dots, m \quad (5.7)$$

où l'indice j représente le $j^{\text{ème}}$ élément tandis que m est le nombre d'éléments.

Ainsi le vecteur force résiduelle modale dans l'équation 5.4 du $i^{\text{ème}}$ mode peut être écrit comme étant :

$$\{R\}_i = [\Delta K]\{\varphi\}_{di} = \{\Delta F\}_i = \left[\begin{matrix} \{F\}_1^e \\ \{F\}_2^e \\ \{F\}_m^e \end{matrix} \right] \left\{ \begin{matrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \alpha_m \end{matrix} \right\} = [F]_i \{\alpha\} \quad (5.8)$$

L'équation 5.8 peut être écrite sous la forme matricielle :

$$[F]\{\alpha\} = \{R\} \quad (5.9)$$

où le coefficient de la matrice $[F]$ est :

$$\{F\}_{ij} = [k]_j^e [\varphi]_{dij}^e \quad (5.10)$$

$\{F\}_{ij}$ est le $i^{\text{ème}}$ mode du vecteur modal du $j^{\text{ème}}$ élément dans les coordonnées globales.

Le vecteur force résiduelle modale [53] de l'équation 5.9 est donné par équation 5.4

$$\{R\}_i = ([K] - \lambda_{di}[M])\{\varphi\}_{di} \quad (5.11)$$

L'équation 5.9 peut être réécrite sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \{F\}_{11} & \{F\}_{12} & \dots & \{F\}_{1m} \\ \{F\}_{21} & \{F\}_{22} & \dots & \{F\}_{2m} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \{F\}_{n1} & \{F\}_{n2} & \dots & \{F\}_{nm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \alpha_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{R\}_1 \\ \{R\}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \{R\}_n \end{Bmatrix} \quad (5.12)$$

où n est le nombre des modes alors que m est le nombre d'éléments. La résolution du système d'équation 5.12 nous permet de déterminer les valeurs de l'indicateur d'endommagement.

$$\begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \alpha_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \{F\}_{11} & \{F\}_{12} & \dots & \{F\}_{1m} \\ \{F\}_{21} & \{F\}_{22} & \dots & \{F\}_{2m} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \{F\}_{n1} & \{F\}_{n2} & \dots & \{F\}_{nm} \end{bmatrix}^+ \begin{Bmatrix} \{R\}_1 \\ \{R\}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \{R\}_n \end{Bmatrix} \quad (5.13)$$

Les différentes étapes de la méthode basée sur la force résiduelle modale sont illustrées dans l'organigrammes ci-dessous:

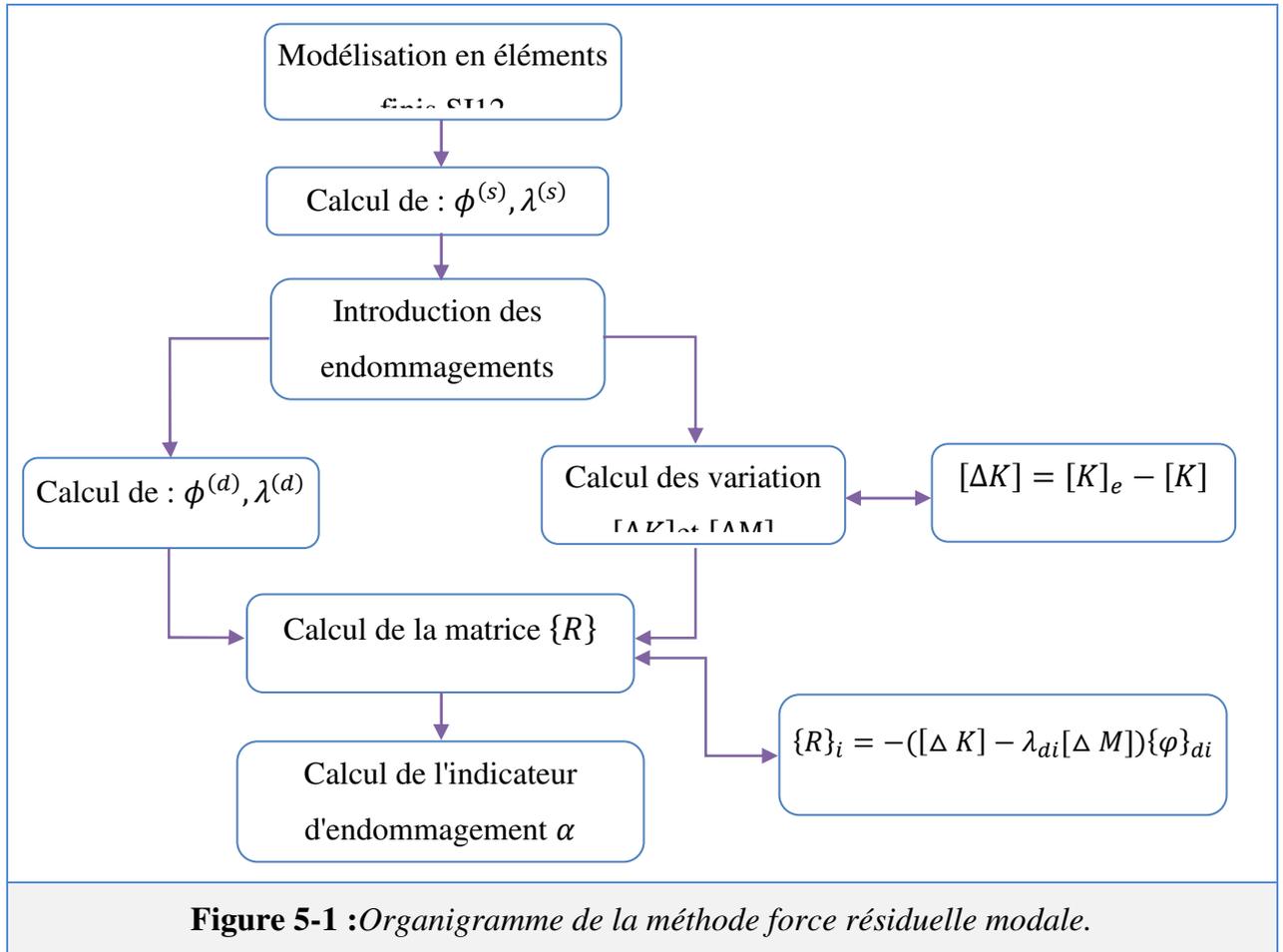


Figure 5-1 : Organigramme de la méthode force résiduelle modale.

5.3.1 Applications et test numériques :

Soit une structure poutre unidirectionnelle en matériau composite CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) encastée-libre discrétisée en 10 éléments fins S112, figure ci-dessous.

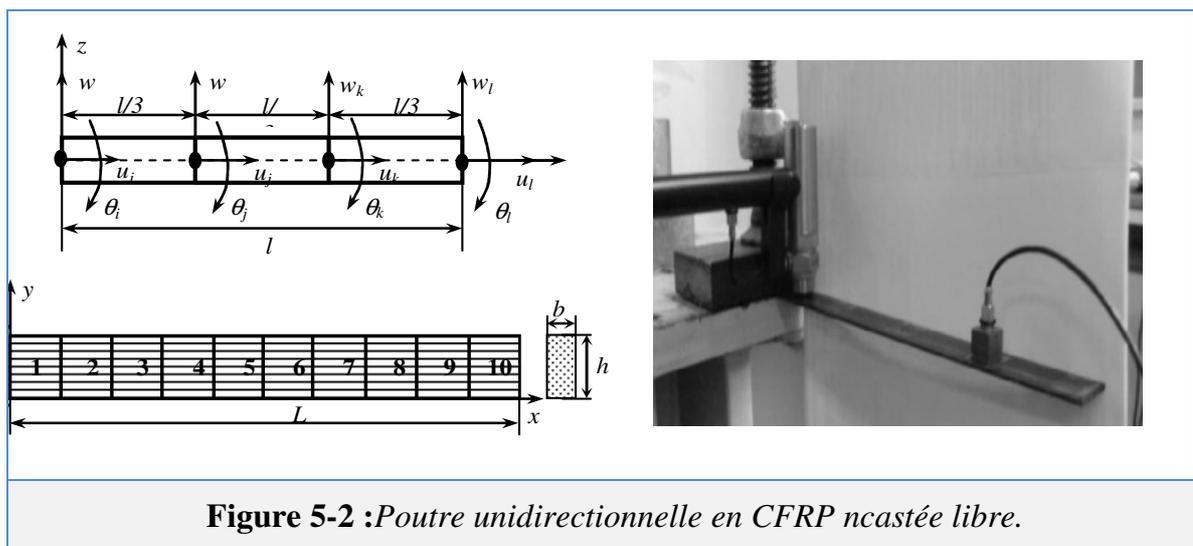


Figure 5-2 : Poutre unidirectionnelle en CFRP ncastée libre.

Sur le tableau 5.1, nous présentons les caractéristiques mécaniques et géométriques de la poutre CFRP [56].

Tableau 5-1: les propriétés de la poutre CFRP.

Longueur (<i>mm</i>)	200
Largeur (<i>mm</i>)	20.253
Epaisseur (<i>mm</i>)	1.7
Module d'Young E_x (N/mm^2)	133000
ρ (Ns^2/mm^4)	1.37610^{-9}

Les différents cas test étudiés dans ce chapitre sont présentés dans le tableau 5-2. La deuxième colonne du tableau 5-2 indique la position des éléments endommagés, tandis que la troisième c'est le pourcentage de réduction de rigidité des éléments endommagés.

Tableau 5-2 : Récapitulatif des cas tests étudiés.

Cas test	EltS endommagés	%
Cas test 1	3	25%
Cas test 2	8	50 %
Cas test 3	3 et 8	25 %
Cas test 4	2, 4, 6 et 8	10, 20, 30 et 40 %
Cas test 5	1 à 10	5, 10,15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50

5.3.2 Détection et localisation d'endommagements

Les fréquences naturelles de la structure saine définies expérimentalement [56] et celles calculées pour les différents cas test sont données sur le tableau 5-3.

Tableau 5-3: Fréquences naturelles de la poutre saine et endommagée.

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
Structure saine ref [56]	67.49	423.00	1184.53	2321.23	-
Structure saine	67.50	422.80	1183.50	2318.60	3833.60
Cas test 1	65.60	422.00	1159.80	2271.10	3806.50
Cas test 2	67.40	408.20	1082.40	2177.30	3749.70
Cas test 3	65.60	417.10	1124.20	2211.10	3773.60
Cas test 4	65.20	392.90	1086.80	2131.00	3627.30
Cas test 5	62.90	367.80	1006.80	1960.80	3234.50

5.3.2.1 Cas test 1: 3^{ème} élément endommagé :

Les valeurs de l'indicateur d'endommagement α_M pour chaque élément fini sont :

$$\alpha_M = [0.0546 \quad 0.0596 \quad 0.3056 \quad 0.0805 \quad 0.0474 \quad 0.0337 \quad 0.0275 \quad 0.0238 \quad 0.0208 \quad 0.0180]$$

Les valeur de l'indicateur d'endommagement (α_M : Damage indicator using residual force) pour le cas test 1 sont données sur la figure 5-2 :

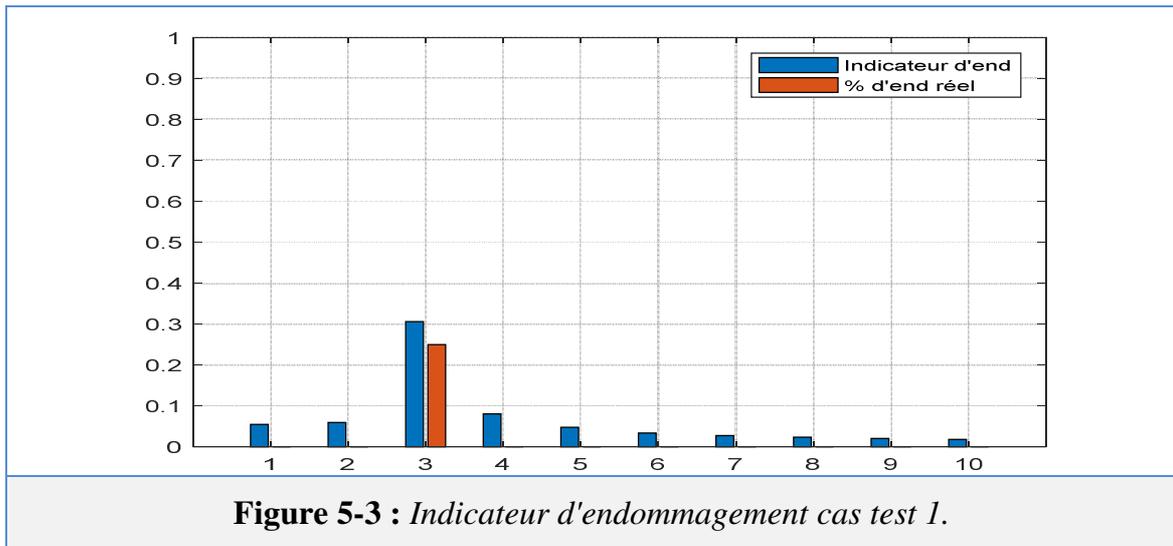


Figure 5-3 : Indicateur d'endommagement cas test 1.

Les résultats de la figure ci-dessus montrant que la valeur de l'indicateur est importante pour l'élément 3.

5.3.2.2 Cas test 2 8^{ième} élément endommagé :

Les valeurs de l'indicateur d'endommagement α_M pour chaque élément fini sont :

$$\alpha_M = [0.0507 \quad 0.0546 \quad 0.0666 \quad 0.0932 \quad 0.1348 \quad 0.1808 \quad 0.2249 \quad 0.6268 \quad 0.2277 \quad 0.1953]$$

Les valeur de l'indicateur d'endommagement (α_M : Damage indicator using residual force) pour le cas test 2 sont représentées sur la figure 5-3 :

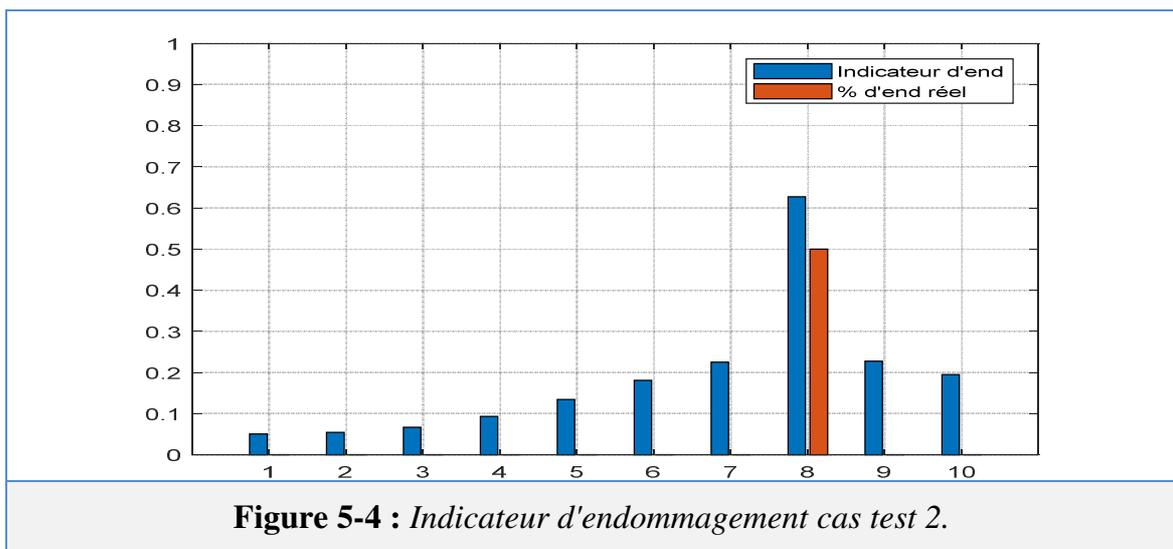


Figure 5-4 : Indicateur d'endommagement cas test 2.

Les résultats de la figure 5-4 montrent que la valeur de l'indicateur est importante pour l'élément 8.

5.3.2.3 Cas test 3 le 3^{ième} et le 8^{ième} élément endommagé

Les valeurs de l'indicateur d'endommagement α_M pour chaque élément fini sont :

$$\alpha_M = [0.0714 \quad 0.0775 \quad 0.3202 \quad 0.1132 \quad 0.0934 \quad 0.0907 \quad 0.0956 \quad 0.3185 \quad 0.0798 \quad 0.0690]$$

Les valeur de l'indicateur d'endommagement (α_M : Damage indicator using residual force) pour le cas test 2 sont représentées sur la figure 5-5 :

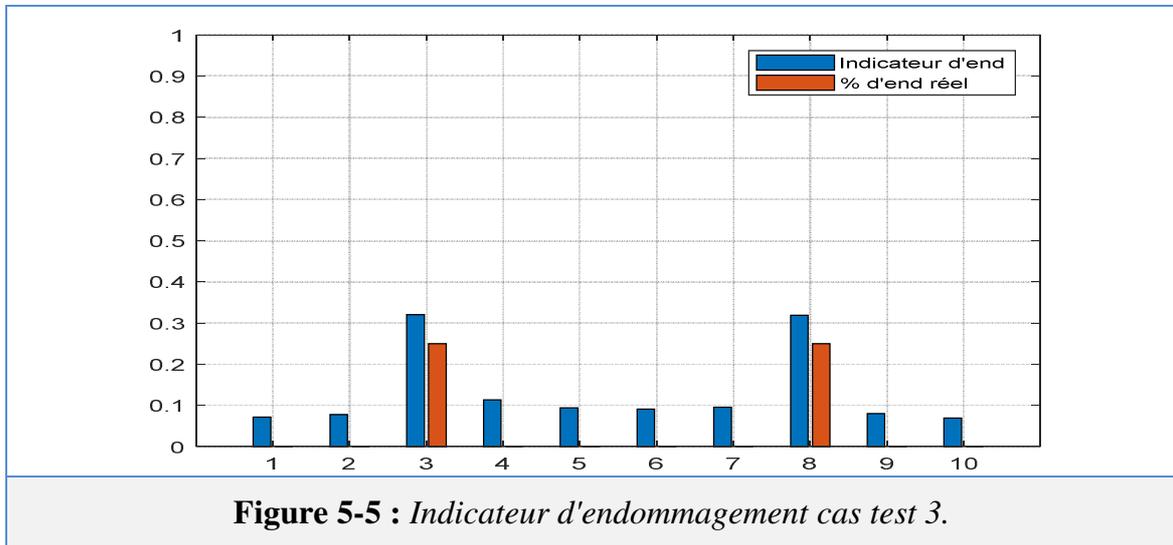


Figure 5-5 : Indicateur d'endommagement cas test 3.

Les résultats de la figure 5-5 montrent que les valeurs de l'indicateur pour les éléments 3 et 8 sont plus importantes.

5.3.2.4 Cas test 4 : 2, 4, 6 et le 8^{ième} élément endommagés

Les valeurs de l'indicateur d'endommagement α_M pour chaque élément fini sont :

$$\alpha_M = [0.1076 \quad 0.1937 \quad 0.1325 \quad 0.3419 \quad 0.2222 \quad 0.4645 \quad 0.2605 \quad 0.5549 \quad 0.2286 \quad 0.1974]$$

Les valeur de l'indicateur d'endommagement (α_M : Damage indicator using residual force) in damage scenario 4 see figure 5-5 :

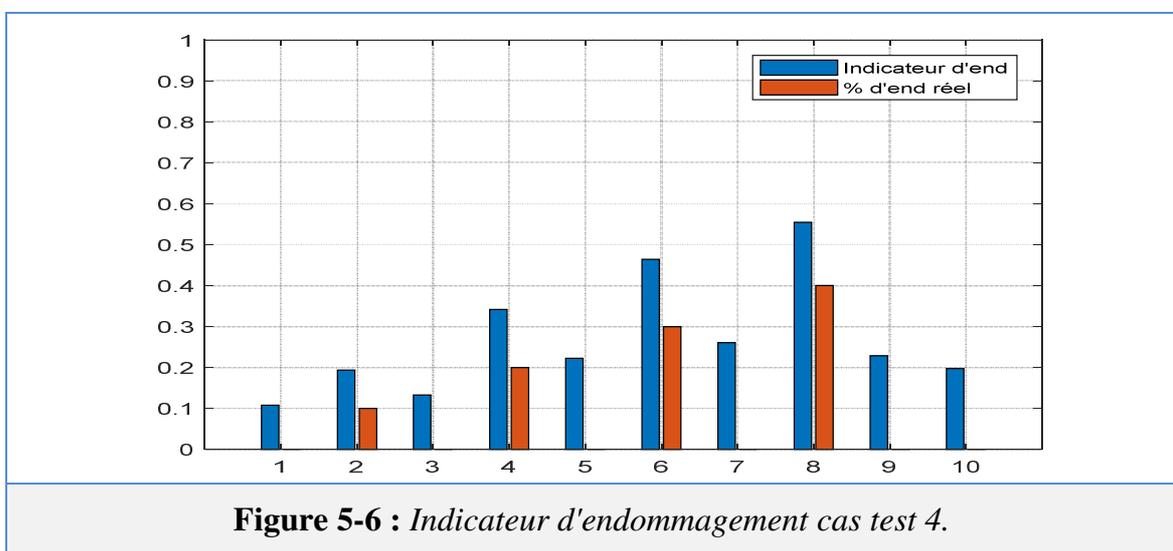


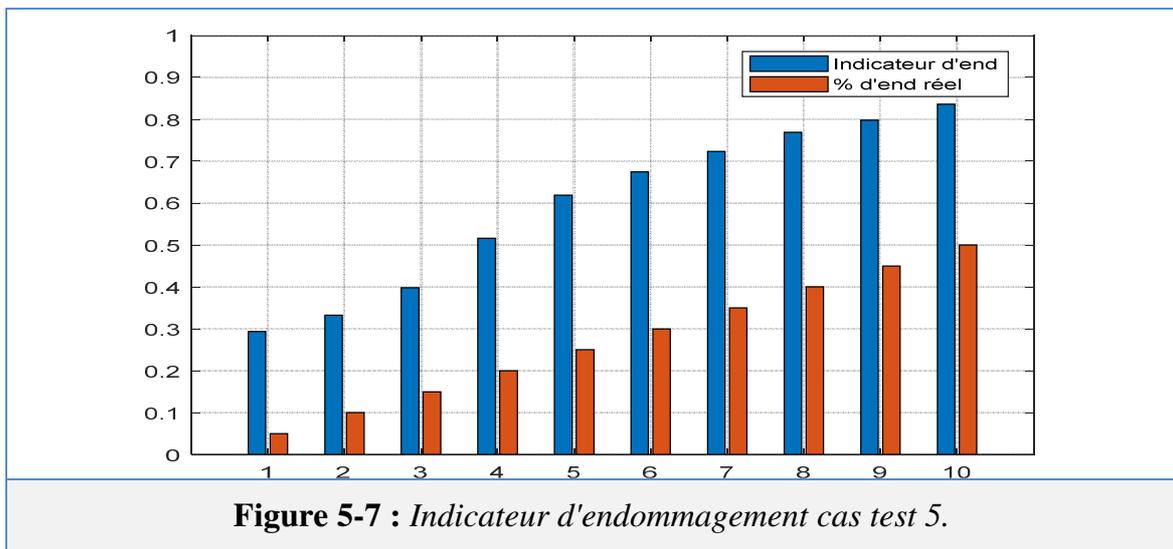
Figure 5-6 : Indicateur d'endommagement cas test 4.

5.3.2.5 Cas test 5 tous les éléments endommagés :

Les valeurs de l'indicateur d'endommagement α_M pour chaque élément fini sont :

$$\alpha_M = [0.2939 \quad 0.3327 \quad 0.3984 \quad 0.5160 \quad 0.6193 \quad 0.6742 \quad 0.7136 \quad 0.7689 \quad 0.7976 \quad 0.8364]$$

Les valeur de l'indicateur d'endommagement (α_M : Damage indicator using residual force) in damage scenario 5 see figure 5-7 :



A partir des résultats obtenus par la méthode de la force résiduelle, on constate que les valeurs de l'indicateur d'endommagement des éléments endommagés sont toujours les plus grandes. Nous pouvons conclure que cette méthode donne des résultats satisfaisant pour la localisation des dommages dans les structures poutres composites unidirectionnelles. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que cette dernière ne peut pas évaluée l'ampleur des dommages.

5.4 Quantification des endommagements :

Un algorithme génétique repose fondamentalement sur la recherche d'un ou des extrema d'une fonction d'adaptation (aussi appelée fonction objectif). Il s'agit donc d'un algorithme itératif de recherche globale dont le but est d'optimiser la fonction d'adéquation. Pour atteindre cet objectif, l'algorithme travaille en parallèle sur une population de chromosomes, distribués dans l'entièreté de l'espace de recherche.

L'algorithme démarre alors avec une population initiale cherchant la combinaison optimale des paramètres correspondant à la meilleure solution. A chaque génération, est créée une nouvelle population avec le même nombre de chromosomes. Au fur et à mesure des générations, les chromosomes vont tendre en général vers l'optimum de la fonction

d'adéquation. Ce dernier montre bien que le cycle est constitué d'un ensemble d'étapes qui serviront de base à l'implémentation de l'algorithme génétique.

Dans le présent travail le chromosome comporte deux variables, la localisation (position) des dommages et le pourcentage d'affectation. La fonction objectif génère la différence entre lesl'indicateur d'endommagement mesuré et calculées.

Le but est de modifier la sortie d'une certaine façon souhaitable, en retrouvant les valeurs correspondantes des variables d'entrée. La Figure 5.8 montre l'organigramme du procédé de d'identification des dommages en utilisant l'indicateur d'endommagement basé sur le force résiduelle modale et les algorithmes génétiques AGs.

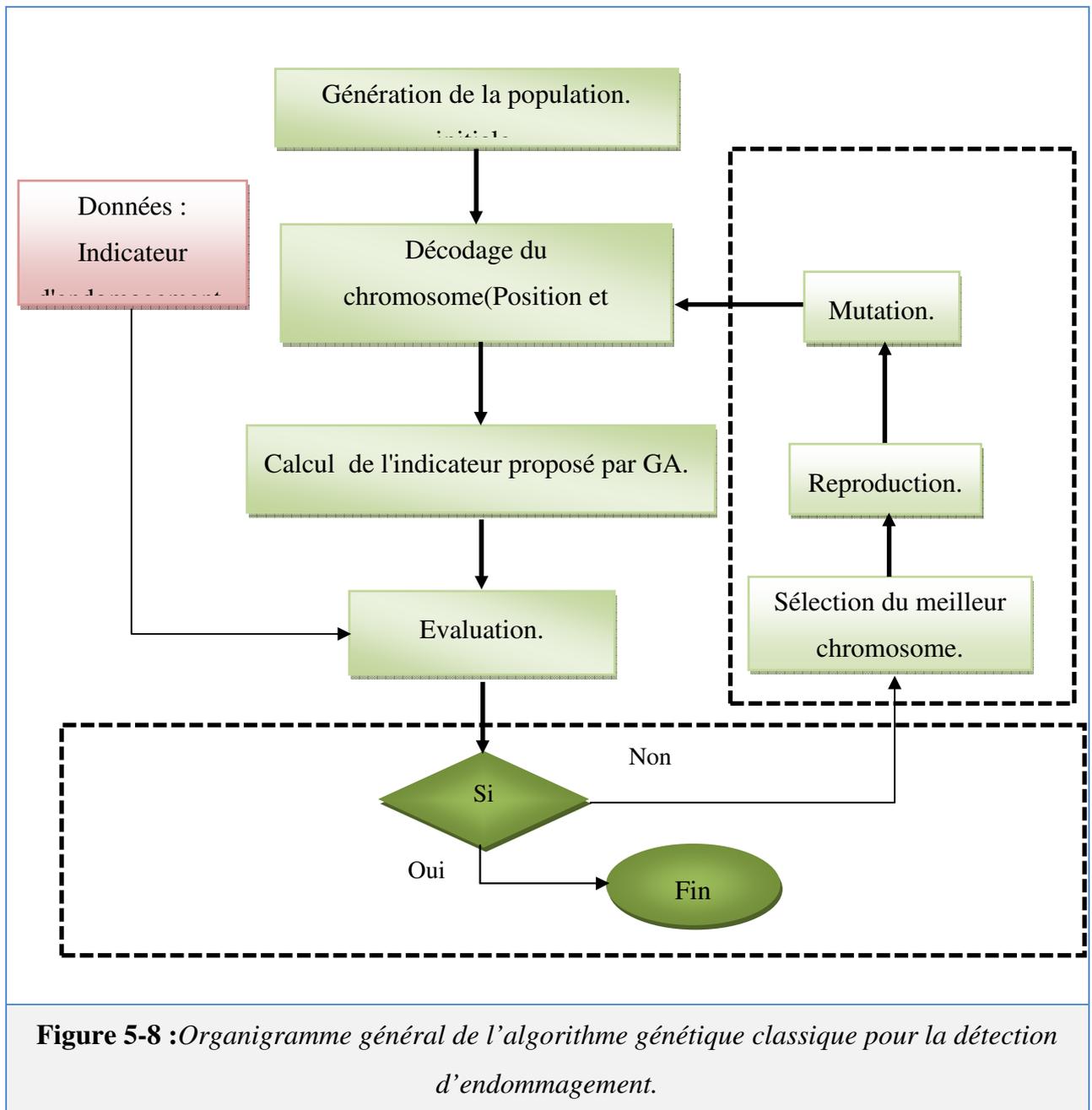


Figure 5-8 : Organigramme général de l'algorithme génétique classique pour la détection d'endommagement.

La Figures 5.9 présente le pseudo code pour la localisation et la quantification d'endommagements en utilisant algorithme génétique à partir des données vibratoires.

```

Début

    Etape 1 : Initialisation de la population initiale

    1- GAPara.MaxGen    =200;
    2- GAPara.SizePop   =40;
    3- GAPara.PCross=[1];
    4- GAPara.PMutation=[0.01];
    5- GAPara.Bound=[0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1];
        Espace de recherche

    jj=[ ];les valeurs de l'indicateur d'endommagement.

    Etape 2 : Décodage du chromosome (position et pourcentage
    d'affectation) Calcul des valeurs de l'indicateur
    d'endommagement proposé par GA.

    Etape 3 : Evaluation (comparer les valeurs de l'indicateur
    proposé par GA et mesuré à l'aide FEM)
    Si les indicateurs sont mêmes.

    Objectif=(jj-indicateur)

    Fin
    Si non
    Sélectionné le meilleur chromosome
    - Reproduction
    - Croissement
    - Mutation

    Retour à l'étape 2.
    Fin

    D= [0 - x; 0 - x; 0
        - x];

    0 - x : Pourcentage d'affectation, D : Nombre des éléments
    
```

Figure 5-9 :Pseudo code pour la localisation et la quantification d'endommagements.

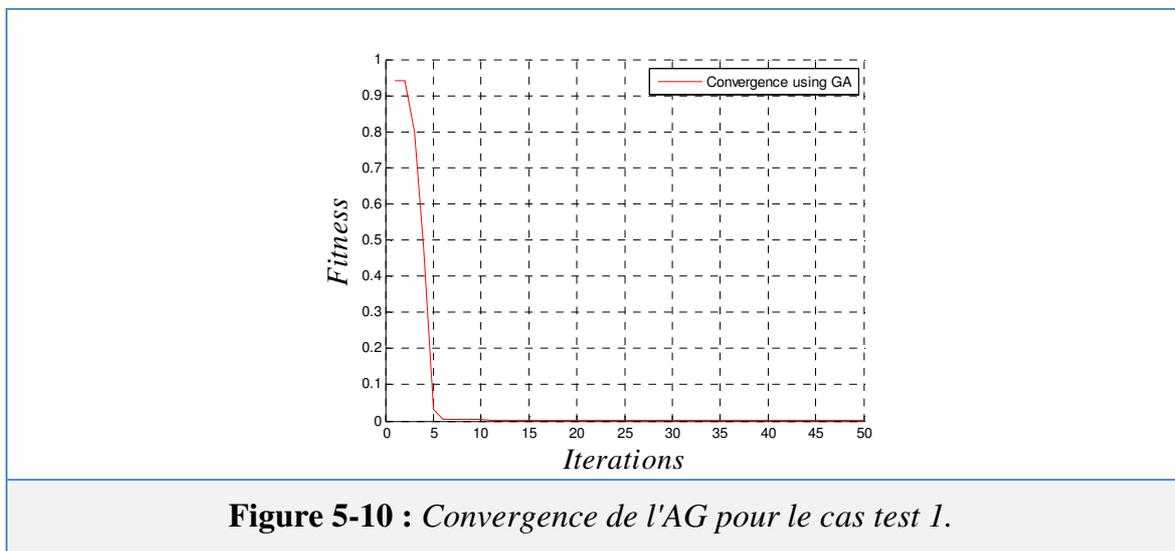
5.4.1 Résultats et discussion :

Nous validons l'approche proposé par des simulations numériques sur la poutre encastree libre de la figure 5-2. Les mêmes scénarios d'endommagement que ceux présentés dans le tableau 5-2 sont étudiés.

Les résultats obtenus sont présentés sur les Fig. 5-9 à 5-18. Pour chaque scénario nous avons présenté trois courbes, la première courbe represente l'évolution de la convergence de la fonction fitness (objectif), la deuxième c'est la convergence des éléments endomagés et la troisième c'est l'histogramme de l'indicateur d'endommagement.

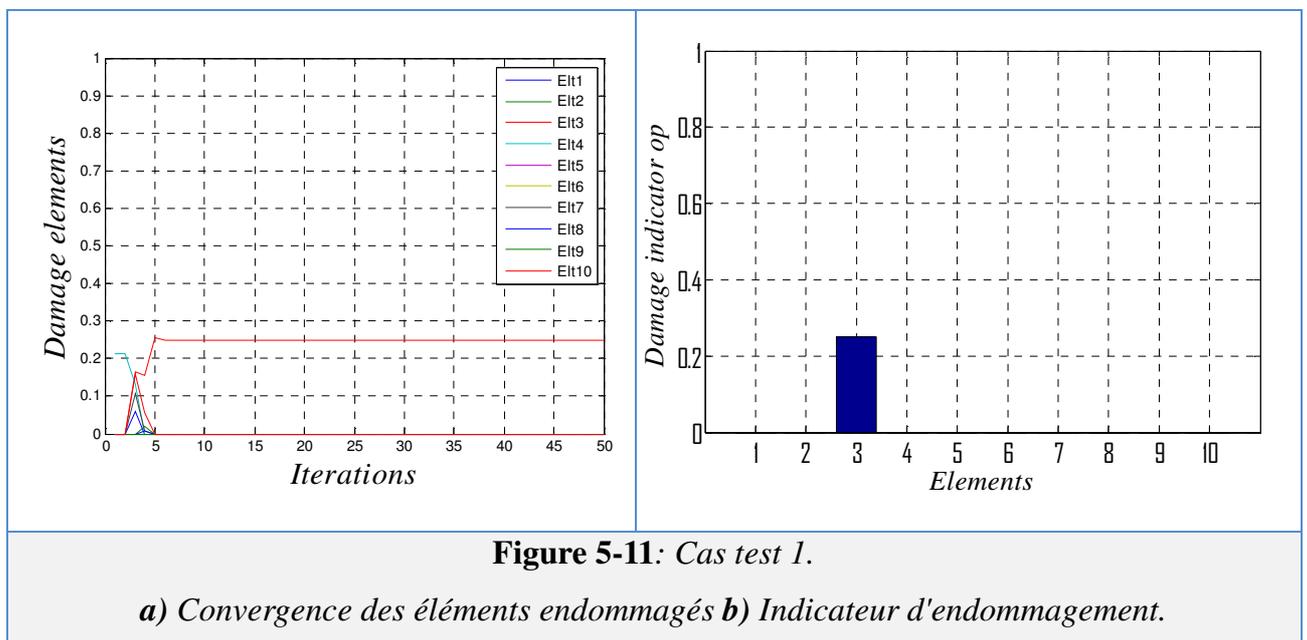
5.4.1.1 Cas test 1: Un endommagement (3^{ième} élément) :

Le toisième élément endommagé, pourcentage d'affectation est de 25%.



Les valeurs de l'indicateur d'endommagement après optimisation est :

$$\alpha_M = [0 \quad 0 \quad 0.25 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$



5.4.1.2 Cas test 2: Un endommagement (8^{ième} élément)

Le huitième élément endommagé, pourcentage d'affectation est de 50%.

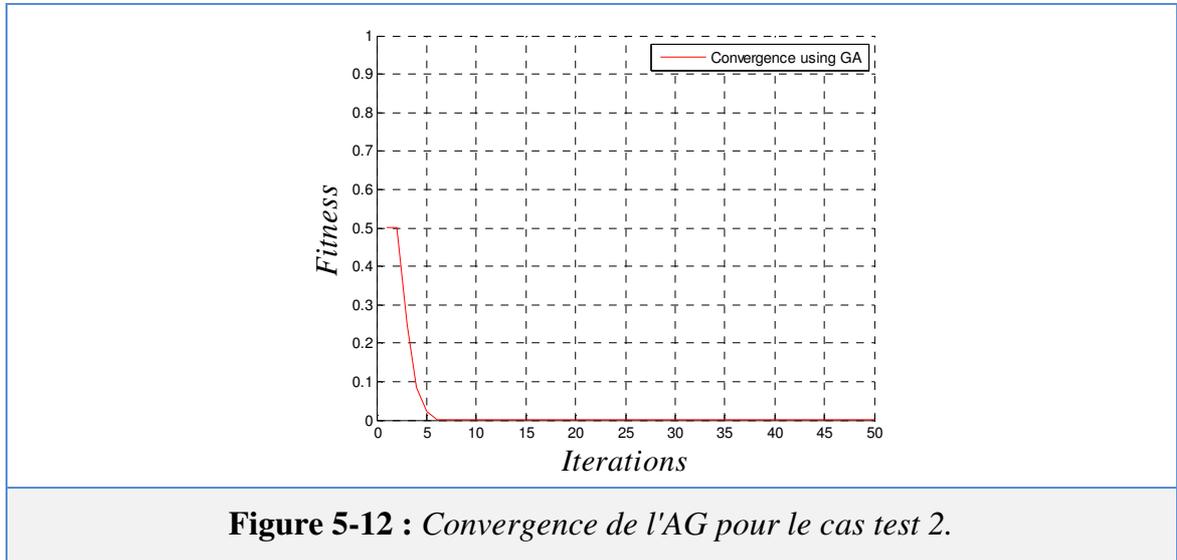


Figure 5-12 : Convergence de l'AG pour le cas test 2.

Les valeurs de l'indicateur d'endommagement après optimisation est :

$$\alpha_M = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.5 \ 0 \ 0]$$

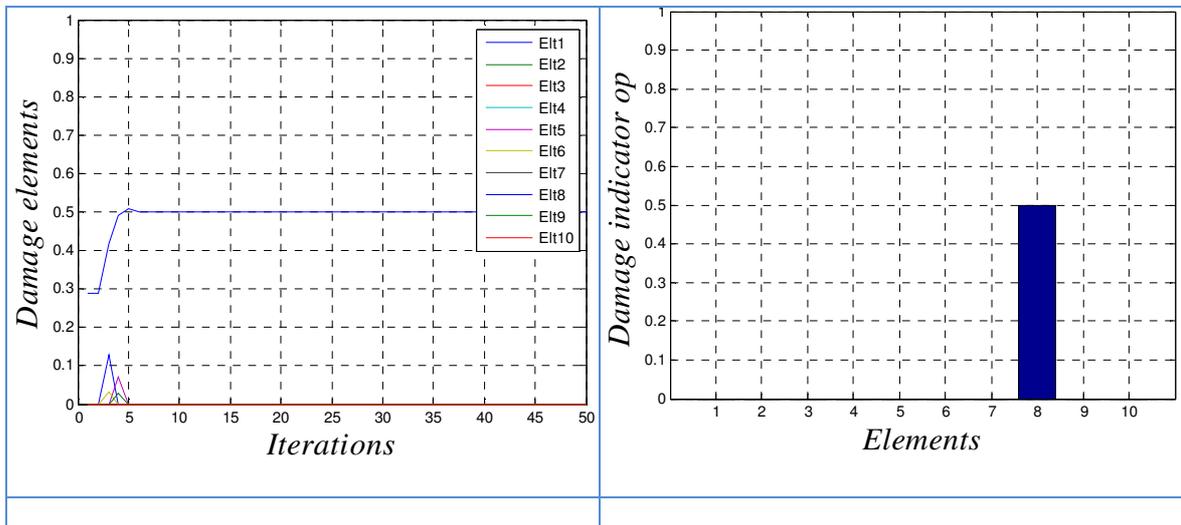
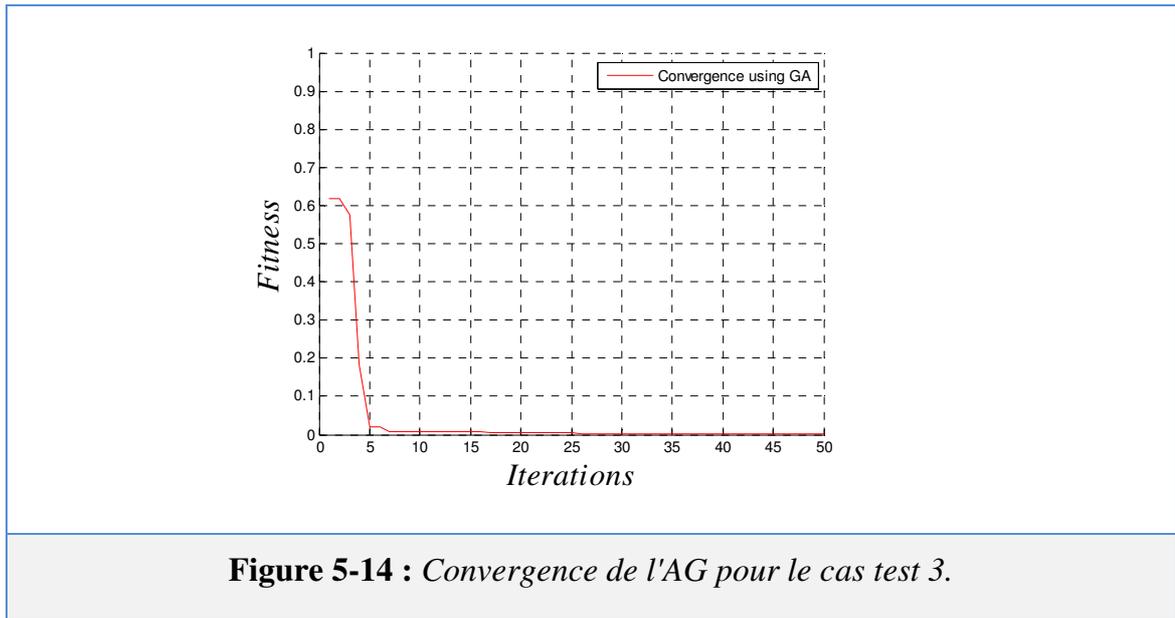


Figure 5-13 : Cas test 2.

a) Convergence des éléments endommagés b) Indicateur d'endommagement.

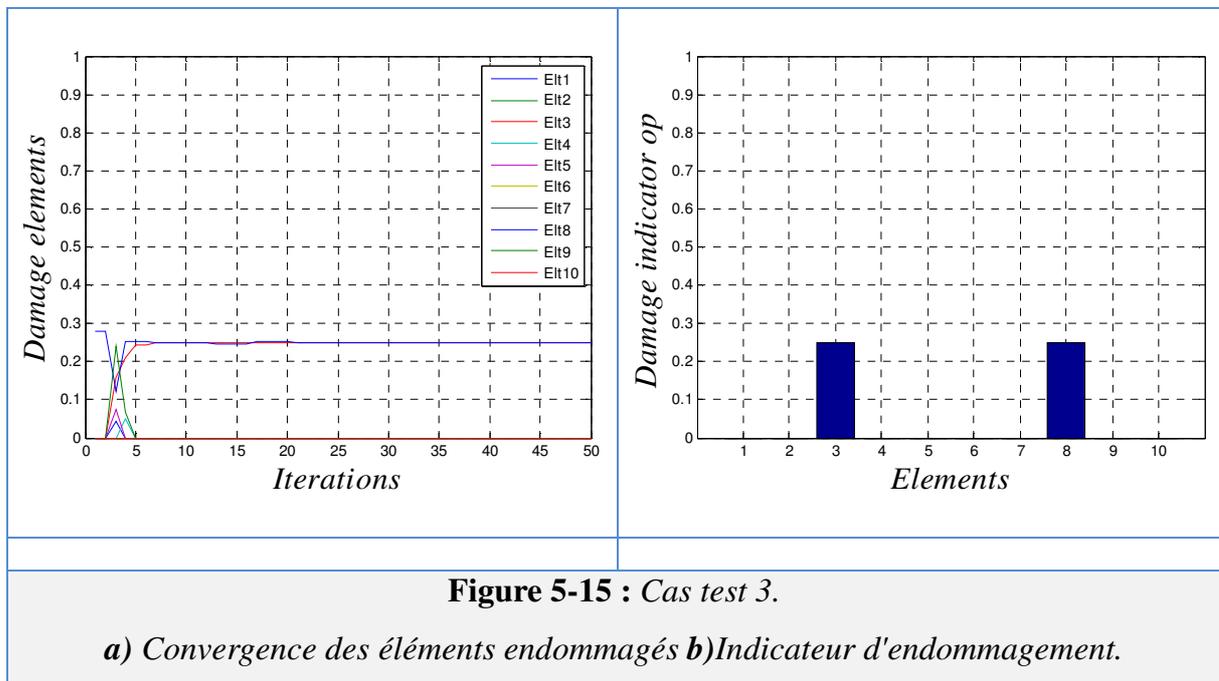
5.4.1.3 Cas test 3: Deux éléments endommagés (3 et le 8)

Troisième et huitième élément endommagés, même pourcentage d'affectation 50%.



Les valeurs de l'indicateur d'endommagement après optimisation est :

$$\alpha_M = [0 \ 0 \ 0.25 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.25 \ 0 \ 0]$$



5.4.1.4 Cas test 4: Plusieurs endommagements (2,4,6 et 8)

Les éléments 2, 4, 6 et 8 endommagés; Les pourcentages d'affectation respectivenet des éléments est : 10, 20, 30,et 40%.

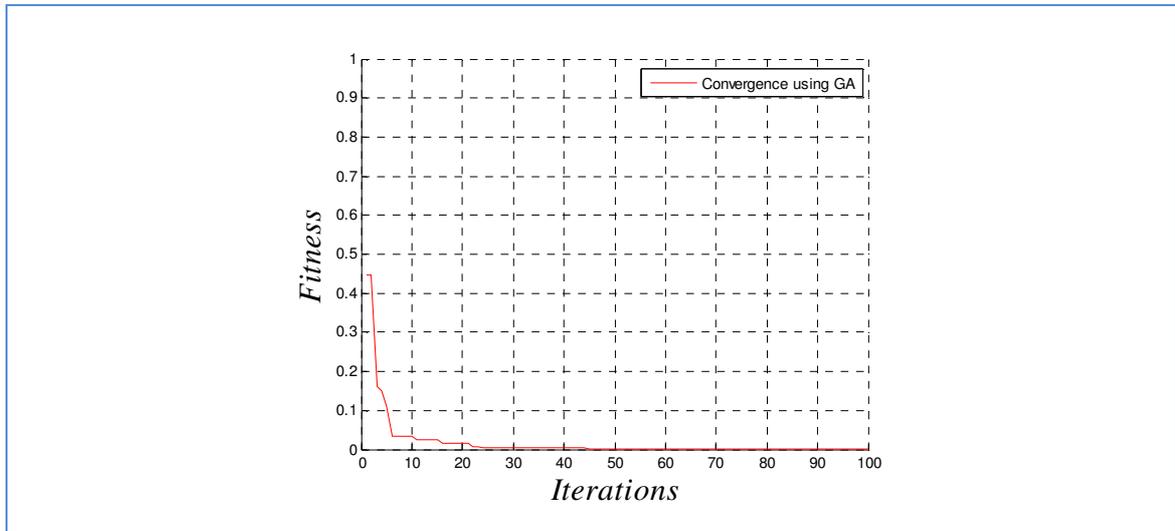


Figure 5-16 : Convergence de l'AG pour le cas test 4.

Les valeurs de l'indicateur d'endommagement après optimisation est :

$$\alpha_M = [0 \quad 0.10 \quad 0 \quad 0.20 \quad 0 \quad 0.30 \quad 0 \quad 0.40 \quad 0 \quad 0]$$

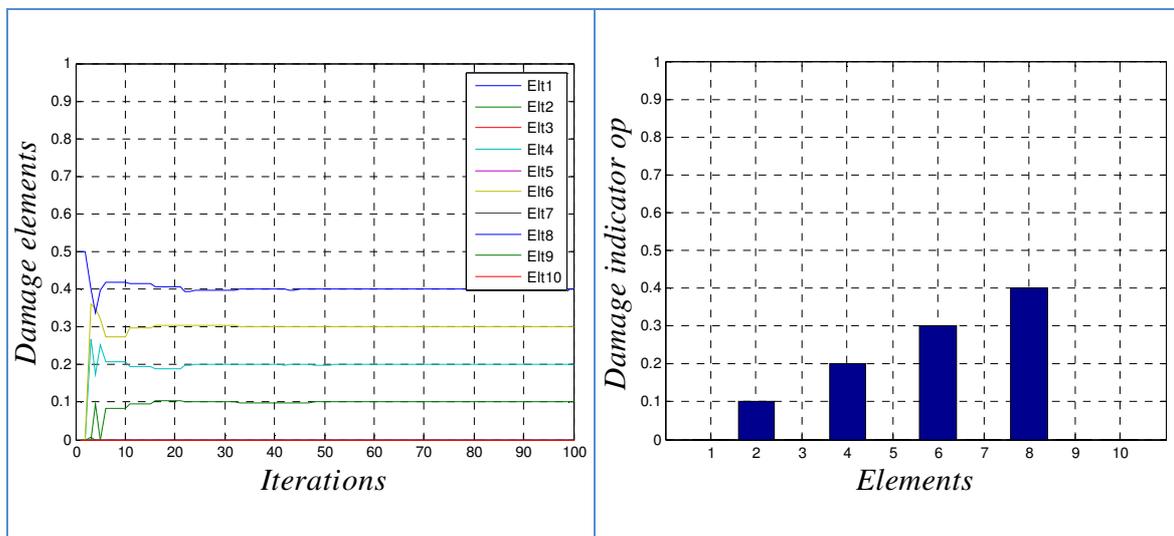
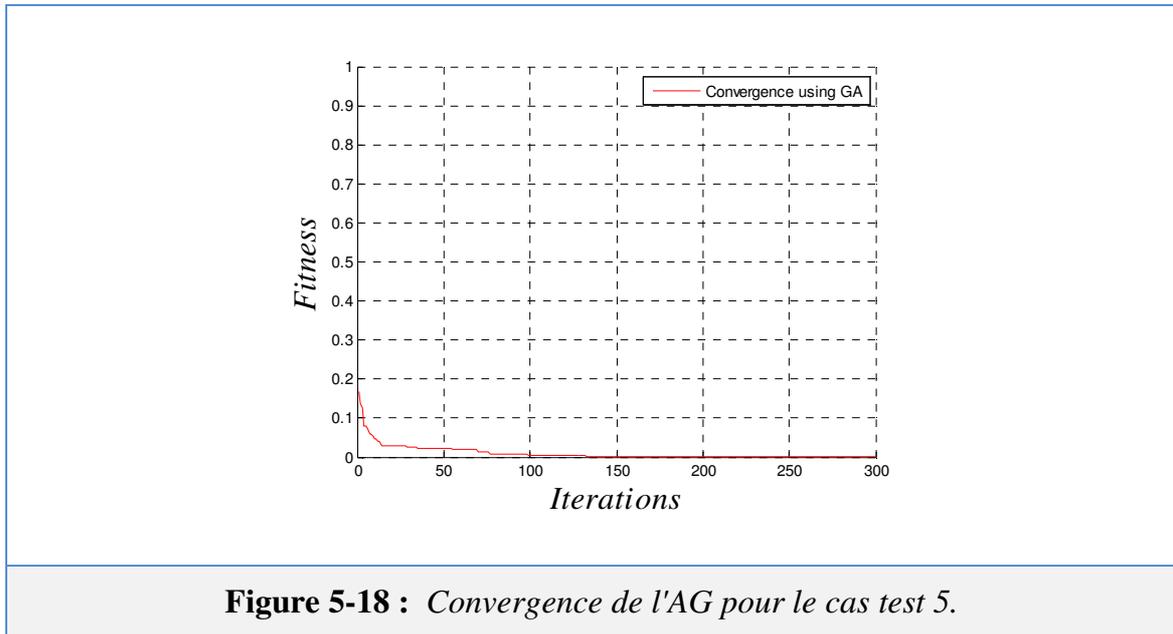


Figure 5-17 : Cas test 4.

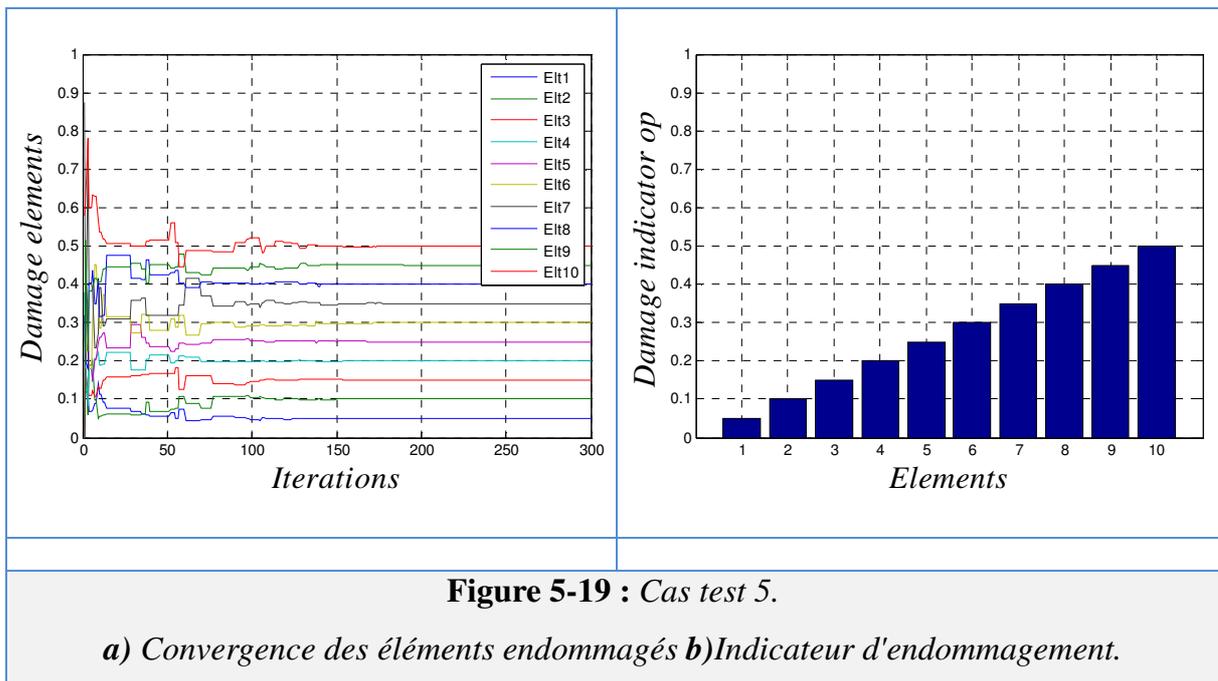
a) Convergence des éléments endommagés b) Indicateur d'endommagement.

5.4.1.5 Cas test 5: Tous les éléments endommagés

Tous les éléments de la poutre sont endommagés, pourcentages d'affectations respectivement des éléments est : 5:5:50%.



$$\alpha_M = [0.0500 \quad 0.1000 \quad .1500 \quad 0.2000 \quad 0.02499 \quad 0.3001 \quad 0.3499 \quad 0.4000 \quad 0.4500 \quad 0.5001]$$



Les résultats obtenus montrent que l'algorithme GA est capable de quantifier les dommages dans tous les scénarios en utilisant les données de la méthode de la force résiduelle dans les premières itérations avec une grande précision par rapport aux résultats de la méthode de la force résiduelle de la première section avec FEM.

5.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, une méthode d'optimisation est proposée afin de quantifier les dommages dans les structures poutres en matériaux composites PRFC. La technique proposée est basée sur l'algorithme génétique (GA) couplé avec la méthode de la force résiduelle modale.

La fonction objectif est basée sur l'indicateur d'endommagements calculées par la méthode de la force résiduelle pour comparer ces données, entre ceux calculées et ceux mesurés par les algorithmes génétiques. Les résultats montrent clairement que l'AG utilisait la force résiduelle comme fonction objective pour localiser et quantifier les dommages en cas de scénarios de dommages uniques, multiples et uniformes. La comparaison entre les dommages estimés et réels illustre l'efficacité de l'algorithme dans l'identification des dommages. Cette approche a été développée à partir des résultats obtenus par la force résiduelle avec FEM car cette approche ne permet pas de quantifier les dommages.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le domaine de contrôle de santé des structures (SHM) est un domaine vaste, où se croisent et interagissent plusieurs disciplines, allant de la science des matériaux, à la mécanique des structures, en passant par la technologie capteur jusqu'au traitement du signal. L'objectif principal du travail de cette thèse est de contribuer aux travaux effectués sur l'identification des défauts et des endommagements dans les structures multicouches en matériaux composites, sans nuire à l'intégrité des structures.

Pour ce faire, trois méthodes d'identification de défauts dans les structures poutres en matériaux composites, basées sur les données vibratoires, ont été proposées pour l'étude. La première (FRF) est basée sur la réponse fréquentielle, la deuxième sur l'énergie de déformation modale, et la troisième sur le concept de la force résiduel modale. La méthode basée sur la FRF se divise en deux parties bien distinctes. Dans la première, on doit détecter s'il y a présence d'un défaut et cela en utilisant la réponse fréquentielle de la structure à une force excitatrice de type harmonique. Par la suite il faut localiser les endommagements, pour cela nous avons opté pour l'utilisation de la méthode d'énergie de déformation modale, dans laquelle nous avons proposé d'utiliser la réponse fréquentielle à la place des vecteurs

propres. Les méthodes ont été validées par des tests de simulation numérique, appliqués sur des structures poutres composites unidirectionnelle et stratifiées.

Les résultats obtenus montrent que la réponse fréquentielle permet, de manière très simple, de déterminer si une structure comporte des défauts ou non. Les indicateurs d'endommagements, basés sur l'énergie de déformation modale couplée avec la réponse fréquentielle, sont efficaces pour la détection et la localisation de défauts dans les structures poutres unidirectionnelles et stratifiées et cela même dans le cas de plusieurs endommagements de différents types. Les limites de ces méthodes résident dans leurs incapacités à quantifier l'ampleur de ces derniers.

Par ailleurs, les indicateurs d'endommagements, basés sur la force résiduelle modale et l'énergie de déformation modale, donnent des résultats satisfaisants pour la détection et la localisation des endommagements. Cependant aucune information sur l'intensité de l'endommagement n'est fournie.

Afin de quantifier les dommages dans les structures poutres, en matériaux composites PRFC, une méthode d'optimisation est proposée. Cette dernière est basée sur les algorithmes génétiques (GAs) couplé avec la méthode de la force résiduelle modale. La fonction objectif est basée sur l'indicateur d'endommagements calculés par la méthode de la force résiduelle pour comparer ces données, entre ceux calculés et ceux mesurés par GAs. Les résultats ont montrés clairement que l'AG utilisait la force résiduelle comme fonction objective pour quantifier les dommages en cas de scénarios de dommages uniques, multiples et uniformes. La comparaison entre les dommages estimés et réels illustre l'efficacité de l'algorithme dans la quantification des dommages.

Enfin, l'identification (localisation et quantification) d'un ou plusieurs défauts, dans les structures poutres par analyse vibratoire, en utilisant des algorithmes GA, a réussi. Les résultats obtenus ont montrés que l'identification de défaut dans le cas des structures poutres est réalisable dans le cas d'un seul ou plusieurs endommagements.

Des perspectives s'ouvrent maintenant devant nous, nous invitant à de nouvelles recherches, visant l'exploitation et l'extension de nos résultats. Nous donnons quelques axes d'orientation qui peuvent être tracés :

- Couplages des autres méthodes, basées sur les données vibratoires, avec les algorithmes génétiques afin de quantifier l'ampleur des défauts.
- Réaliser une modélisation géométrique des défauts.

- Tester le couplage des méthodes, basées sur les données vibratoires, avec d'autres méthodes d'optimisations.
- Validation par des essais pratiques des méthodes de localisations d'endommagements.
- Elargir le champ d'application de ces approches à d'autres types de structures en matériaux composites (panneau sandwich, ...).

Références bibliographiques

- [1] S. W. Doebling, C. R. Farrar, and M. B. Prime, "A summary review of vibration-based damage identification methods," *Shock and vibration digest*, vol. 30, pp. 91-105, 1998.
- [2] A. Rytter, "Vibrational based inspection of civil engineering structures," Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1993.
- [3] R. Adams, P. Cawley, C. Pye, and B. Stone, "A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 20, pp. 93-100, 1978.
- [4] O. Salawu, "Detection of structural damage through changes in frequency: a review," *Engineering structures*, vol. 19, pp. 718-723, 1997.
- [5] P. Cawley and R. D. Adams, "The location of defects in structures from measurements of natural frequencies," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 14, pp. 49-57, 1979.
- [6] N. Stubbs and R. Osegueda, "Global non-destructive damage evaluation in solids," *International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, vol. 5, pp. 67-79, 1990.
- [7] N. Stubbs and R. Osegueda, "Global damage detection in solids- Experimental verification," *International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, vol. 5, pp. 81-97, 1990.
- [8] M. Friswell, J. Penny, and D. Wilson, "Using vibration data and statistical measures to locate damage in structures," *Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, vol. 9, pp. 239-254, 1994.
- [9] M. Palacz and M. Krawczuk, "Vibration parameters for damage detection in structures," *Journal of Sound and vibration*, vol. 249, pp. 999-1010, 2002.
- [10] M. Friswell and J. E. Penny, "The practical limits of damage detection and location using vibration data," in *Proceedings of the 11th VPI and SU Symposium on Structural Dynamics and Control*, 1997, pp. 31-40.
- [11] C. R. Farrar, W. Baker, T. Bell, K. Cone, T. Darling, T. Duffey, A. Eklund, and A. Migliori, "Dynamic characterization and damage detection in the I-40 bridge over the Rio Grande," Los Alamos National Lab., NM (United States)1994.
- [12] A. Messina, I. Jones, and E. Williams, "Damage detection and localization using natural frequency changes," in *Proceedings of conference on Identification in Engineering Systems*, 1996, pp. 67-76.
- [13] A. Messina, T. Contursi, and E. Williams, "Multiple damage evaluation using natural frequency changes," in *Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference*, 1997, p. 658.
- [14] D. Armon, Y. Ben-Haim, and S. Braun, "Crack detection in beams by rankordering of eigenfrequency shifts," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 8, pp. 81-91, 1994.

- [15] D. Nicholson and K. Alnefaie, "Modal moment index for damage detection in beam structures," *Acta mechanica*, vol. 144, pp. 155-167, 2000.
- [16] T. Chaudhari and S. Maiti, "A study of vibration of geometrically segmented beams with and without crack," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 37, pp. 761-779, 2000.
- [17] S. Chinchalkar, "Determination of crack location in beams using natural frequencies," *Journal of Sound and vibration*, vol. 247, pp. 417-429, 2001.
- [18] K. Jones and J. TURCOTTE, "FINITE ELEMENT MODEL UPDATING USING ANTIRESONANT FREQUENCIES," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 252, pp. 717-727, 2002.
- [19] P. Moser and B. Moaveni, "Environmental effects on the identified natural frequencies of the Dowling Hall Footbridge," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, pp. 2336-2357, 2011.
- [20] A. Morassi, "Damage detection and generalized Fourier coefficients," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 302, pp. 229-259, 2007.
- [21] S. Creed, "Assessment of large engineering structures using data collected during in-service loading. Structural Assessment (Garas, F. K., Clarke, JL and Armer, GS T., Eds)," ed: Butterworths, London, 1987.
- [22] A. Aktan, K. Lee, C. Chuntavan, and T. Aksel, "Modal testing for structural identification and condition assessment of constructed facilities," in *Proceedings-spie the International Society for Optical Engineering*, 1994, pp. 462-462.
- [23] R. J. ALLEMANG, "The modal assurance criterion (MAC): Twenty years of use and abuse," in *SPIE proceedings series*, 2002.
- [24] W. M. West, "Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an orbiter test specimen," 1986.
- [25] N. Lieven and D. Ewins, "Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (COMAC)," in *Proceedings of the sixth international modal analysis conference*, 1988, pp. 690-695.
- [26] C. P. Ratcliffe, "Damage detection using a modified Laplacian operator on mode shape data," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 204, pp. 505-517, 1997.
- [27] A. Khan, A. B. Stanbridge, and D. J. Ewins, "Detecting damage in vibrating structures with a scanning LDV," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 32, pp. 583-592, 1999.
- [28] A. Pandey, M. Biswas, and M. Samman, "Damage detection from changes in curvature mode shapes," *Journal of sound and vibration*, vol. 145, pp. 321-332, 1991.
- [29] M. N. Helfrick, P. Pingle, C. Niezrecki, and P. Avitabile, "Using full-field vibration measurement techniques for damage detection," *Proceeding of the IMAC-XXVII*, vol. 58, pp. 1289-1295, 2009.
- [30] J. Maeck, M. Wahab, and G. De Roeck, "Damage localization in reinforced concrete beams by dynamic stiffness determination," in *Society for Experimental Mechanics, Inc, 17 th International Modal Analysis Conference.*, 1999, pp. 1289-1295.

- [31] J. Maeck and G. De Roeck, "Damage assessment of a gradually damaged RC beam using dynamic system identification," in *Proceedings of the 20th International Modal Analysis Conference (IMAC-XX)–CD-ROM, Los Angeles, California, 2002*.
- [32] C. S. Hamey, W. Lestari, P. Qiao, and G. Song, "Experimental damage identification of carbon/epoxy composite beams using curvature mode shapes," *Structural Health Monitoring*, vol. 3, pp. 333-353, 2004.
- [33] S. Chen, M.-S. Ju, and Y. Tsuei, "Estimation of mass, stiffness and damping matrices from frequency response functions," *Journal of vibration and acoustics*, vol. 118, pp. 78-82, 1996.
- [34] C.-P. Fritzen, "Identification of mass, damping, and stiffness matrices of mechanical systems," *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, vol. 108, pp. 9-16, 1986.
- [35] B. Morgan and R. Oesterle, "On-site modal analysis-a new powerful inspection technique," in *Proceedings of the 2nd International Bridge Conference, Pittsburg, Pennsylvania, 1985*, pp. 108-114.
- [36] K. L. Napolitano and J. B. Kosmatka, "Damage detection of highly damped structures using direct frequency response measurements and residual force vectors," in *Smart Structures and Materials 1996: Passive Damping and Isolation*, 1996, pp. 110-121.
- [37] H. Salane and J. Baldwin Jr, "Identification of modal properties of bridges," *Journal of Structural Engineering*, vol. 116, pp. 2008-2021, 1990.
- [38] G. Hearn and R. B. Testa, "Modal analysis for damage detection in structures," *Journal of structural engineering*, vol. 117, pp. 3042-3063, 1991.
- [39] C. Williams and O. Salawu, "Damping as a damage indication parameter," in *Proceedings of the 15th international modal analysis conference*, 1997, p. 1531.
- [40] C. Modena, D. Sonda, and D. Zonta, "Damage localization in reinforced concrete structures by using damping measurements," in *Key engineering materials*, 1999, pp. 132-141.
- [41] Z. Wang, R. Lin, and M. Lim, "Structural damage detection using measured FRF data," *Computer methods in applied mechanics and engineering*, vol. 147, pp. 187-197, 1997.
- [42] J. E. Mottershead, A. Kyprianou, and H. J. Ouyang, "Estimation of rotational frequency responses," in *Key Engineering Materials*, 2003, pp. 157-166.
- [43] K. Vanhoenacker, J. Schoukens, P. Guillaume, and S. Vanlanduit, "The use of multisine excitations to characterise damage in structures," *Mechanical systems and signal processing*, vol. 18, pp. 43-57, 2004.
- [44] H. Yang, H.-J. Li, and S.-Q. Wang, "Damage localization of offshore platforms under ambient excitation," *China Ocean Engineering*, vol. 17, p. 495, 2003.
- [45] M. Brehm, V. Zabel, and C. Bucher, "An automatic mode pairing strategy using an enhanced modal assurance criterion based on modal strain energies," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 329, pp. 5375-5392, 2010.
- [46] A. Pandey and M. Biswas, "Damage detection in structures using changes in flexibility," *Journal of sound and vibration*, vol. 169, pp. 3-17, 1994.

- [47] J. Maeck, "Damage assessment of civil engineering structures by vibration monitoring," 2003.
- [48] J. Zhao and J. T. DeWolf, "Sensitivity study for vibrational parameters used in damage detection," *Journal of structural engineering*, vol. 125, pp. 410-416, 1999.
- [49] J. Li, B. Wu, Q. Zeng, and C. W. Lim, "A generalized flexibility matrix based approach for structural damage detection," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 329, pp. 4583-4587, 2010.
- [50] S. Kazemi, A. Fooladi, and A. Rahai, "Implementation of the modal flexibility variation to fault identification in thin plates," *Acta Astronautica*, vol. 66, pp. 414-426, 2010.
- [51] E. Reynders and G. De Roeck, "A local flexibility method for vibration-based damage localization and quantification," *Journal of sound and vibration*, vol. 329, pp. 2367-2383, 2010.
- [52] J.-M. Berthelot, "Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures," &, vol. 245, p. 172, 1999.
- [53] P. ODRU, "Calcul et conception des structures composites," *Techniques de l'ingénieur. Plastiques et composites*, pp. A7792. 1-A7792. 24, 1992.
- [54] R. Rikards, "Analysis of Laminated Structures: Course of Lectures," *Riga: Riga Technical University*, 1999.
- [55] M. Géradin, D. Rixen, M. Géradin, and D. Rixen, *Théorie des vibrations: application à la dynamique des structures* vol. 2: Masson Paris, 1993.
- [56] R. Capozucca, "Vibration of CFRP cantilever beam with damage," *Composite Structures*, vol. 116, pp. 211-222, 2014.
- [57] R. Capozucca and B. Bonci, "Notched CFRP laminates under vibration," *Composite Structures*, vol. 122, pp. 367-375, 2015.
- [58] B. Madeline, "Algorithmes évolutionnaires et résolution de problèmes de satisfaction de contraintes en domaines finis," 2002.
- [59] J.-M. Renders, *Algorithmes génétiques et réseaux de neurones*: Hermès Paris, 1994.
- [60] A. H. Wright, "Genetic algorithms for real parameter optimization," in *Foundations of genetic algorithms*. vol. 1, ed: Elsevier, 1991, pp. 205-218.
- [61] J.-M. Alliot, T. Schiex, P. Brisset, F. Garcia, and J.-M. Alliot, *Intelligence artificielle et informatique théorique*: Cépaduès-éd., 1994.
- [62] P. Rebreyend, "Algorithmes génétiques hybrides en optimisation combinatoire," 1999.
- [63] E. David, "Goldberg: Algorithmes génétiques Exploration optimisation et apprentissage automatique," *Editions*, 1994.
- [64] C. W. Ahn, *Advances in evolutionary algorithms*: Springer, 2006.
- [65] J. PhilippeRennard, "Genetic Algorithm Viewer: Démonstration d'un algorithme génétique," ed, 2000.

- [66] R. L. Haupt and S. Ellen Haupt, "Practical genetic algorithms," 2004.
- [67] S. Seyedpoor, "A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 47, pp. 1-8, 2012.
- [68] A. Behtani, A. Bouazzouni, S. Khatir, S. Tiachacht, Y.-L. Zhou, and M. A. Wahab, "Damage localization and quantification of composite beam structures using residual force and optimization," *Journal of Vibroengineering*, vol. 19, 2017.
- [69] J. Y. Shen and L. Sharpe Jr, "Damage detection using residual modal forces and modal sensitivity," in *Proceeding of 14th ASCE Engineering Mechanics Conference*, 2000, pp. 21-24.
- [70] Q. Yang and J. Liu, "Structural damage identification based on residual force vector," *Journal of sound and vibration*, vol. 305, pp. 298-307, 2007.
- [71] D.-Y. Chiang and W.-Y. Lai, "Structural damage detection using the simulated evolution method," *AIAA journal*, vol. 37, pp. 1331-1333, 1999.

6 Annexe 1

Programme principale

```

% CAS D'UN PLI
%-----
n=20; L=15; l=L/n;b=1; h=0.125; S=b*h;nn=3*n+1;ddl=3;nddl=nn*ddl;

% [n]: nombre d éléments finis; [L]: longueur de la poutre;
% [l]:longueur de l'élément fini; [b]:largeur de la poutre
% [h]: épaisseur de la poutre; [S] : section de la poutre

Ex=14.48e10; Gxz=0.414e10; rho=1390; k=5/6;
%[Ex]: module de Young dans la direction des fibres;
%[Gxz]: module de cisaillement dans le plan xz;
%[rho]: masse volumique;
%[k]: coefficient de correction de cisaillement

%-----          Structure saines          -----
%-----

% 1) matrices élémentaires
%-----
[Keu,Meu]=KeMeu(n,L,Ex,Gxz,rho,b,h,k);

% 2) Matrices globales
%-----
[Ku,Mu,K_eu,M_eu]=KuMu(n,Meu,Keu);

% 3) conditions aux limites
%-----
% b11=[1 2 3 ]; % Encastrée libre
b11=[2 nddl-1];% appuis simple
Mu(b11,:)=[];Mu(:,b11)=[];
Ku(b11,:)=[];Ku(:,b11)=[];

% 4) Valeurs et Vecteurs propres
%-----
[Phiu,Lamu]=eig(Ku,Mu);
Frequ=(sqrt(diag(Lamu)))/(2*pi);
Fu=Frequ(1:10);

%-----          Structure endommagée          -----
%-----

% 1) Matrices élémentaires
Ned=input('entrer le nombre d'éléments endommagés Ned=');
[Ked,ENDOM]=KeMed(n,L,Gxz,h,b,k,Ex,Ned); Med=Meu;
% 2) Matrices globales
[Kd,K_ed]=KdMd(n,Ked,Keu,Ned,ENDOM); Md=Mu; M_ed=M_eu;
% 3) Conditions aux limites
% Cas 1: appuis simple
Kd(b11,:)=[]; Kd(:,b11)=[];
% 4) Valeurs et Vecteurs propres
[Phid,Lamd]=eig(Kd,Md);
Freqd=(sqrt(diag(Lamd)))/(2*pi);
Fd=Freqd(1:10);
FuFd=[Fu Fd]

```

calcul des matrices de masse et de rigidité élémentaires de la structure saine

```

function [Keu,Meu]=KeMeu(n,L,Ex,Gxz,rho,b,h,k)

%-----  Matrices  élémentaires de la structure saine ----
%-----

l=L/n;                % longueur de l élément fini
S=b*h;                % section de la poutre
D11=(Ex*S*(h^2))/12;  % Ex module d'Young dans la direction des
fibres
q55=S*Gxz;            % Gxz module de cisaillement
q11=Ex*S;
D=[q11 0 0; 0 D11 0 ; 0 0 k*q55];
% matrices Me et Ke de l élément fini poutre unidirectionnelle:
%-----
syms xreal
% fonctions de formes
Ni=1-((11*x)/(2*l))+9*(x/l)^2-(9/2)*(x/l)^3;
Nj=9*(x/l)-(45/2)*(x/l)^2+(27/2)*(x/l)^3;
Nk=-(9/2)*(x/l)+18*(x/l)^2-(27/2)*(x/l)^3;
Nl=(x/l)-(9/2)*(x/l)^2+(9/2)*(x/l)^3;
I=eye(3);
N=[Ni*I, Nj*I, Nk*I, Nl*I];

B=[diff(Ni) 0      0      diff(Nj) 0      0      diff(Nk) 0      0
diff(Nl) 0      0      diff(Ni) 0      0      diff(Nj) 0      0
diff(Nk) 0      0      diff(Nl) 0      0      diff(Nj) 0      0
0      diff(Ni) Ni      0      diff(Nj) Nj      0      diff(Nk)
Nk      0      diff(Nl) Nl];

KKe=B'*D*B;
KK=(1/2)*int(KKe, 0, l);

rho0=S*rho;
%rho1=(S*rho*h)/4;
rho2=(1/12)*S*rho*(h)^2;
R0=[rho0 0 0;0 rho0 0; 0 0 rho2];
MMe=N'*R0*N;
MM=(1/2)*int(MMe, 0, l);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Keu=eval(KK);          % matrice de raideur élémentaire
Meu=eval(MM);          % matrice de masse élémentaire

```

**Assemblages des matrices de masse et de rigidité élémentaires,
Matrices de masse et de rigidité globale de la structure saine**

```

function [Ku,Mu,K_eu,M_eu]=KuMu(n,Meu,Keu)
%-----
%----- Matrices globales de la structure saine -----
%-----
nn=n*3+1;
ddl=3; Nddl=ddl*nn;
Ku=zeros(Nddl);
Mu=zeros(Nddl);
for i=1:n
    K=zeros(Nddl);
    K(9*i-8:9*i+3, 9*i-8:9*i+3)=Keu;
    K_eu(:, :, i)=K;
    Ku=Ku+K_eu(:, :, i);
%
    M=zeros(Nddl);
    M(9*i-8:9*i+3, 9*i-8:9*i+3)=Meu;
    M_eu(:, :, i)=M;
    Mu=Mu+M_eu(:, :, i);
end

```

**calcul des matrices de masse et de rigidité élémentaires de la
structure Endommagée**

```

function [Ked, ENDOM]=KeMed(n,L,Gxz,h,b,k,Ex,Ned)
%-----
%----- Matrices élémentaires de la structure endommagée -----
%-----
l=L/n;           % longueur de l élément fini
S=b*h;          % section de la poutre
q55=S*Gxz;

syms xreal
Ni=1-((11*x)/(2*1))+9*(x/l)^2-(9/2)*(x/l)^3;
Nj=9*(x/l)-(45/2)*(x/l)^2+(27/2)*(x/l)^3;
Nk=-(9/2)*(x/l)+18*(x/l)^2-(27/2)*(x/l)^3;
Nl=(x/l)-(9/2)*(x/l)^2+(9/2)*(x/l)^3;
I=eye(3);
N=[Ni*I, Nj*I, Nk*I, Nl*I];
B=[diff(Ni) 0 0 diff(Nj) 0 0 diff(Nk) 0 0
diff(Nl) 0 0 diff(Ni) 0 0 diff(Nj) 0 0
diff(Nk) 0 0 diff(Nl) diff(Nj) Nj 0 diff(Nk)
0 0 diff(Ni) Ni 0 diff(Nj) Nj 0 diff(Nk)
Nk 0 diff(Nl) Nl];

ii=1;P=[];A=[];
while ii<=Ned
    a1=input('numéro de l élément endommagé a=');
    p1=input('% de reduction de la raideur p=');
    A=[A a1];
    P=[P p1];
    p=(100-p1)/100;
    Exd=p*Ex; % module de Young dans la direction des fibres
    D11d=(Exd*S*(h^2))/12;
    q11d=Exd*S;
    Dd=[q11d 0 0; 0 D11d 0; 0 0 k*q55];
    KKd=B'*Dd*B;
    KKd=(1/2)*int(KKd, 0, l);
    Ked(:, :, ii)=eval(KKd);
end

```

```

        ii=ii+1;
    end
    ENDOM=[A' P']

```

**Assemblages des matrices de masse et de rigidité élémentaires,
Matrices de masse et de rigidité globale de la structure
endommagée**

```

function [Kd,K_ed]=KdMd(n,Ked,Keu,Ned,ENDOM);
%-----
%----- Matrices globales de la structure endommagée -----
%-----
nn=n*3+1;
ddl=3; Nddl=ddl*nn;
Kd=zeros(Nddl);
A=ENDOM(:,1);
T=zeros(n,1);
for i=1:Ned
    T(A(i))=i;
end
%%
% assemblage des matrices de rigidités structure endom
Kd=zeros(Nddl);
for i=1:n
    K=zeros(Nddl);
    if T(i)~=0
        K(9*i-8:9*i+3, 9*i-8:9*i+3)=Ked(:, :, T(i));
        K_ed(:, :, i)=K;
    else
        K(9*i-8:9*i+3, 9*i-8:9*i+3)=Keu;
        K_ed(:, :, i)=K;
    end
    Kd=Kd+K_ed(:, :, i);
end
%%

```

Résumé

Résumé : L'analyse vibratoire, en vue d'une maintenance préventive, s'avère un outil pertinent, utilisé depuis quelques décennies pour connaître "l'état de santé" d'une structure ou d'un équipement industriel. Son emploi vise à servir trois niveaux d'analyse, à savoir : la surveillance, le diagnostic et le suivi de l'état d'endommagement.

Nous présentons dans ce travail les outils et méthodes, basés sur des données vibratoires, pour la détection, la localisation et la quantification des endommagements dans les structures poutres en matériaux composites. Pour la détection et la localisation nous avons opté pour deux méthodes, la première est basée sur la réponse fréquentielle et la deuxième sur l'énergie de déformation modale.

La méthode basée sur la réponse fréquentielle se divise en deux étapes bien distinctes. La première vise à déterminer s'il y a présence d'un défaut, le principe de cette étape est que la réponse d'une structure endommagée à une sollicitation vibratoire diffère de celle d'une structure saine, donc nous n'avons qu'à comparer les deux réponses afin de déterminer s'il y a présence d'un défaut dans la structure. Quant à la deuxième étape elle consiste à localiser les endommagements avec un indicateur basé sur la réponse fréquentielle. La deuxième méthode est basée sur l'énergie de déformation modale. Les différentes structures considérées peuvent encourir des endommagements qui seront modélisés par une perte de rigidité de l'élément censé représenter un défaut de la structure. Les résultats obtenus montrent que la réponse fréquentielle permet, de manière très simple, de déterminer si une structure comporte des défauts. Les indicateurs d'endommagements basés sur l'énergie de déformation modale couplée avec la réponse fréquentielle sont efficaces pour la détection et la localisation de défauts dans les structures poutres en matériaux composites et cela même dans le cas de plusieurs endommagements de différents types. Les limites de ces méthodes résident dans leurs incapacités à quantifier l'ampleur de ces derniers.

Afin d'atteindre le troisième niveau, qui est la quantification de la sévérité de l'endommagement, nous avons proposé l'utilisation des algorithmes génétiques comme outil d'optimisation et l'indicateur d'endommagement, basé sur la force résiduelle modale, comme fonction objective.

Les résultats obtenus montrent que la combinaison proposée, qui est la force résiduelle modale avec l'algorithme génétique, peut être facilement utilisée pour identifier (détecter, localiser et quantifier) des endommagements dans les structures poutres en matériaux composites.

Mots clés : Détection, localisation et quantification d'endommagement, Éléments finis, Force résiduelle modale, Algorithme génétique, analyse vibratoire.

Abstract : Vibratory analysis, for preventive maintenance, is a powerful tool, used for several decades to provide if the structure healthy or damaged or industrial equipment. Its use aims to serve three levels of analysis, namely: surveillance, diagnosis, and monitoring of the level of damage. In this present work the tools and methods based on modal analysis for the detection, localization and quantification of the damages in composite beam structures. For the detection and the localization we provided two methods, the first is based on frequency response function and the second on the energy of modal deformation. The method based on the frequency response function is divided into two very distinct stages. The first stage is to determine if there is damage, the main purpose of this stage is that the response of a damaged structure and healthy structures as a comparison. The second stage is to locate the damage with an indicator based on the frequency response. The second method is based on the modal strain energy formulation. The various structures considered can incur damage which will be modeled by a loss of rigidity of the element supposed to represent damage in the structure. The results obtained show that the frequency response makes it very simple to determine whether a structure has damaged. The indicators of damage based on the energy of modal strain energy coupled with the frequency response are effective for damage detection and localization in composite beam structures and that even in the case of several damages of different types. The limits of these methods lie in their inability to quantify the damage. In order to predict correctly the third level, quantification of the severity of the damage, we proposed to use an inverse problem based on genetic algorithms as an optimization tool and the damage indicator based on the residual force method used as an objective function. The obtained results showed that the proposed combination, force residual method with Genetic Algorithm, can be identified correctly the damage location and severity in composite beam structures.

Keywords : Damage detection, localization, quantification, finite element method (FEM), residual force method (RFM), vibration analysis, genetic algorithm.