

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes
De MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : GENIE MECANIQUE
Spécialité : FABRICATION MECANIQUE ET PRODUCTIQUE

Présenté par
MAHIDDINE Abed El Moudjib Nacer
AMOUBOUDI Rayan

Thème

**Optimisation et détection des
Endommagements dans les
Structures en Treillis**

Mémoire soutenu publiquement le 07/07/ 2025 Devant les jurys composé de :

- *FERHOUM Rabeh* *Président*

- *MANSOURI Lilla* *Examinatrice*

- *SLIMANI Mohand* *Encadreur*

Remerciements

Louange à Dieu, le Tout-Puissant, source de toute sagesse et de toute réussite, qui nous a permis d'achever ce travail dans les meilleures conditions. C'est par Sa volonté que nous avons pu avancer, persévérer et surmonter les défis rencontrés tout au long de ce parcours.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos familles, pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur présence bienveillante à chaque étape de notre formation.

Nos remerciements vont également à Monsieur « Mohand Slimani », pour la qualité de son encadrement, ses conseils pertinents et sa disponibilité, qui ont grandement contribué à l'orientation et à l'aboutissement de ce mémoire.

Nous tenons à adresser une mention toute particulière à Monsieur « Tiachacht Samir », dont l'engagement discret mais essentiel a été d'un grand soutien. Véritable homme de l'ombre, il a mis toutes les dispositions à notre service, nous guidant avec patience, générosité et efficacité, tout au long de cette aventure académique.

Nous remercions également l'ensemble des membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, leurs observations constructives, et pour l'honneur qu'ils nous ont fait par leur présence lors de la soutenance.

Enfin, nous exprimons toute notre gratitude à nos amis et collègues, avec qui nous avons partagé des moments d'entraide, de réflexion et de motivation, qui ont enrichi cette belle expérience humaine.

À toutes et à tous, merci sincèrement.

Dédicace

À nos parents, pour leur amour inconditionnel, leurs prières silencieuses et leur confiance absolue. Ils ont été, et resteront toujours, notre premier soutien et notre plus grande fierté.

À nos sœurs et proches, pour leur présence, leur encouragement et leur compréhension tout au long de ce parcours exigeant.

À tous ceux qui nous ont inspirés, soutenus, ou simplement cru en nous, même dans le silence. Cette réussite est aussi la leur.

Nous leur dédions humblement ce travail, fruit d'efforts, de persévérance et de passion.

Table des matières

Introduction Générale.....	12
<i>Chapitre I. Recherché bibliographique</i>	1
I.1 Introduction	2
I.2 Généralités sur l'étude des structures mécanique.....	2
I.3 L'endommagement des Structure	3
I.4 Détection d'endommagement.....	3
I.5 Vibration mécanique applique aux structures.....	4
I.6 Effet de l'endommagement sur la réponse vibratoire	4
I.7 Méthodes de détection Basée sur les déplacements	4
I.7.1 Déplacements Statiques et Déformations	5
I.7.2 Déplacements dynamiques : modes propres	6
<i>Chapitre II. Méthodes des Elements Finis</i>	5
II.1 Généralités	6
II.2 Introduction	6
II.3 Démarche De La Méthodes Des Eléments Finis	7
II.4 Discrétisation géométrique	7
II.5 Approximation Modale.....	7
II.5.1 Approximation nodale de quelques éléments de référence.....	8
II.6 Assemblage et condition aux limites.....	10
II.6.1 Effort imposes	10
II.6.2 Effort inconnus.....	10
II.7 Déformations des barres en traction/compression	11
II.8 Les Matrices élémentaires	12
II.8.1 Matrice de Raideur.....	12
II.8.2 Matrice de masse	13
II.9 Conclusion.....	14
<i>Chapitre III. Méthode de Détection d'endommagement par Fonction Réponse Fréquentielles</i>	14
III.1 Introduction	15
III.2 Définition et propriétés des FRF	15
III.3 Mesure des FRF	16
III.4 Principes de la Détection d'Endommagement par FRF	16
III.4.1 Changements des propriétés dynamiques dus à l'endommagement	17
III.4.2 Indicateurs d'endommagement basés sur les FRF	17
III.4.3 Changement de fréquences propres	17
III.4.4 Changement de déformées modales et courbure modale	17
III.4.5 Analyse directe des FRF (méthode de la courbure des FRF)	18
III.5 Techniques d'identification modale pour l'extraction Des FRF	18
III.6 Application.....	18
III.6.1 Structure 2D avec 200 éléments	18
III.6.2 La Localisation des endommagements par la méthode de fonction réponse fréquentielle	20
III.6.3 Structure 3D avec 116 éléments	24

III.6.4	La Localisation des endommagements par la méthode de fonction réponse fréquentielle	26
III.7	Conclusion:	30
<i>Chapitre IV.</i>	<i>Méthode d'Optimisation</i>	29
IV.1	Introduction	30
IV.2	Algorithme d'Optimisation par Étoile de Mer _Starfish optimization algorithm (SFOA) _	30
IV.2.1	Phase d'initialisation	30
IV.2.2	Phase Exploration	31
IV.2.3	Phase d'Exploitation	33
IV.3	Algorithme de L'optimiseur de renard de Rüppell _Ruppell's Fox Optimizer(RFO) _	34
IV.3.1	Phase d'initialisation :	34
IV.3.2	Phase d'Exploration	34
IV.3.3	Phase d'exploitation	35
IV.3.4	Mise à jour complète	35
IV.4	Conclusion	36
<i>Chapitre V.</i>	<i>RESULTAT ET DISCUSSION</i>	36
V.1	Treillis 3D	37
V.1.1	Cas 4 Élément 53	37
V.1.2	Cas 3 Élément 6	41
V.2	Treillis 2D	45
V.2.1	Cas 2 Élément 40	45
V.2.2	Cas 1 Élément116	49
V.3	Conclusion	52
	Conclusion générale	54
	Références bibliographique:	55
	Résumé	57
	Abstract	57

Listes des figures :

<i>Figure II-1. Erreur de discrétisation géométrique</i>	7
<i>Figure II-2. Fonctions de forme à une dimension</i>	9
<i>Figure II-3. Fonctions d'interpolation linéaires du triangle</i>	9
<i>Figure II-4. Fonctions d'interpolation quadratiques du triangle. Les autres sont obtenues par rotation</i>	10
<i>Figure II-5. Une barre prismatique.</i>	11
<i>Figure III-1. Structure Treillis 2D a (200) éléments</i>	19
<i>Figure III-2. Premier cas d'endommagement pour la structure 200 de 25%</i>	21
<i>Figure III-3. Identification d'endommagement d'une structure 2D a 200 éléments (premier cas d'endommagement).</i>	21
<i>Figure III-4. Variations d'amplitude FRF pour une structure 2D (élément 116) sain et endommagée</i>	22
<i>Figure III-5. Deuxième cas d'endommagement pour la structure 200 de 20%</i>	23
<i>Figure III-6. Identification d'endommagement d'une structure 2D a 200 éléments (premier cas d'endommagement).</i>	23
<i>Figure III-7. Variations d'amplitude FRF pour une structure 2D (élément 40) sain et endommagée</i>	24
<i>Figure III-8. Structure treillis 3D à 116 éléments.</i>	25
<i>Figure III-9. Premier cas d'endommagement pour la structure 6 de 15%</i>	27
<i>Figure III-10. Identification d'endommagement d'une structure 3D a 6 éléments (premier cas d'endommagement).</i>	27
<i>Figure III-11. Variations d'amplitude FRF pour une structure 3D (élément 6) sain et endommagée</i>	28
<i>Figure III-12. Premier cas d'endommagement pour la structure 53 de 10%</i>	28
<i>Figure III-13. Identification d'endommagement d'une structure 3D a 53 éléments (deuxième cas d'endommagement).</i>	29
<i>Figure III-14. Variations d'amplitude FRF pour une structure 3D (élément 53) sain et endommagée</i>	29
<i>Figure IV-1. Phase Exploration</i>	31
<i>Figure V-1. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 4 (53 éléments)</i>	37
<i>Figure V-2. Taux d'endommagement pour une barre 3D –cas 4- 50 et 200 population et 100 itérations</i>	38
<i>Figure V-3. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 4 (53 éléments)</i>	39
<i>Figure V-4. Taux d'endommagement pour une barre 3D –cas 4- 100 population et 50 ,200 itération</i>	40
<i>Figure V-5. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 3 (6 éléments)</i>	41
<i>Figure V-6. Taux d'endommagement pour une barre 3D –cas 3- 50 et 200 population et 100 itérations</i>	42

<i>Figure V-7. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 3 (6 éléments)</i>	43
<i>Figure V-8. Taux d'endommagement pour une barre 3D –cas 3- 50 et 200 itérations et 100 populations.</i>	44
<i>Figure V-9. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 2 (40 éléments).....</i>	45
<i>Figure V-10. Taux d'endommagement pour une barre 2D –cas 2- 50 et 200 population et 100 itérations.....</i>	46
<i>Figure V-11. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 2 (40 éléments).....</i>	47
<i>Figure V-12. Taux d'endommagement pour une barre 2D –cas 2- 50 et 200 itération et 100 itération</i>	48
<i>Figure V-13. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 1 (116 éléments).....</i>	49
<i>Figure V-14. Taux d'endommagement pour une barre 2D –cas 1- 50 et 200 population et 100 itérations.....</i>	50
<i>Figure V-15. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 1 (116 éléments).....</i>	50
<i>Figure V-16. Taux d'endommagement pour une barre 3D –cas 4- 50 et 200 itérations et 100 populations.</i>	52

Liste des Tableaux

<i>Tableau III-1. Propriétés mécanique et géométrique de la structure treillis 2D a (200) élément</i>	19
<i>Tableau III-2. Cas d'endommagements de la structure treillis 2D a (200) éléments.</i>	20
<i>Tableau III-3. Fréquences naturelles saines et endommagées de la structure (200) éléments 2D</i>	20
<i>Tableau III-4. Propriétés mécanique et géométrique de la structure treillis 3D a (116) éléments.</i>	24
<i>Tableau III-5. Cas d'endommagements de la structure treillis 3D a (116) éléments.</i>	26
<i>Tableau III-6. Fréquences naturelles saines et endommagées de la structure (116) éléments 3D.</i>	26

Introduction Générale

La fiabilité et la sécurité des structures mécaniques sont des enjeux primordiaux dans des domaines aussi variés que l'aéronautique, le génie civil et l'énergie. Détecter précocement les défauts ou les dégradations au sein de ces structures est crucial pour prévenir des défaillances potentiellement graves. C'est dans ce contexte que s'inscrit l'importance croissante des méthodes permettant d'identifier, de localiser et de quantifier les endommagements structurels.

Ce projet de fin d'études se concentre sur la détection d'endommagements dans les structures treillis, en adoptant une approche combinant la modélisation numérique et l'analyse vibratoire. Les structures treillis ont été choisies en raison de leur usage répandu en ingénierie et de leur comportement dynamique, à la fois complexe et intéressant à étudier.

Après une recherche bibliographique approfondie pour situer nos travaux par rapport aux études existantes dans ce domaine, ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux.

Le premier chapitre est dédié à la Méthode des Éléments Finis (MEF), une technique numérique essentielle qui nous a permis de modéliser la structure et d'analyser son comportement mécanique et vibratoire, que ce soit en l'absence ou en présence d'endommagements.

Dans le deuxième chapitre, nous avons mis en œuvre, via le logiciel MATLAB, une méthode de détection basée sur la fonction de réponse fréquentielle (FRF). Cette méthode a été utilisée pour caractériser la réponse dynamique de la structure à une excitation harmonique.

Enfin, le troisième chapitre présente une étude théorique sur deux méthodes d'optimisation bio-inspirées (RFO et SFOA). Cette section explore leurs principes sous-jacents, leurs mécanismes de fonctionnement, et démontre leur potentiel pour optimiser la détection et la localisation des endommagements au sein des structures. Cette exploration théorique offre un aperçu plus approfondi de l'efficacité de ces algorithmes dans notre application pratique.

En somme, ce projet vise à démontrer comment l'association de la modélisation numérique, de l'analyse vibratoire et de techniques d'optimisation avancées peut fournir des outils puissants pour la détection d'endommagements dans les structures mécaniques.

Chapitre I. Recherche bibliographique

I.1 Introduction

Les sociétés actuelles dépendent fortement de systèmes structurels et mécaniques tels que les avions, les ponts, les centrales électriques, les équipements rotatifs, les bâtiments et les systèmes de défense.

La plupart de ces systèmes en place atteignent aujourd'hui la fin de leur durée de vie initiale. Étant donné leur caractère non remplaçable économiquement, des techniques de détection des dommages sont développées et mises en œuvre afin de garantir leur exploitation en toute sécurité même si leur exploitation se prolonge au-delà de leur durée de vie nominale. De plus, lors de la conception et de la mise en œuvre de nouveaux systèmes d'ingénierie, ceux-ci utilisent souvent de nouveaux matériaux dont les mécanismes de dégradation à long terme ne sont pas encore totalement connus. Dans un souci de réduction des coûts, ces nouveaux systèmes pourraient être construits avec des coefficients de sécurité plus faibles. Ces conditions imposent de détecter les endommagements dans les nouveaux systèmes le plus tôt possible afin d'éviter des défaillances aux conséquences désastreuses pour la sécurité des personnes et l'économie.

La détection d'endommagement est généralement effectuée dans le cadre d'une ou plusieurs disciplines, liées notamment à la SHM (structural Health monitoring) qui fait généralement référence au processus de mise en œuvre d'une stratégie de détection des endommagements pour l'infrastructure mécaniques.

Ce processus implique l'observation d'une structure ou d'un système mécanique au fil du temps en utilisant des mesures dynamique, périodique, l'extraction des caractéristiques liées à l'endommagement à partir de ces mesures.

Dans ce travail de recherche nous allons introduire sur la détection des endommagements en parlant sur les structure endommagée en se basent sur les mesurée vibratoire. [1]

I.2 Généralités sur l'étude des structures mécanique

L'analyse des structures mécaniques vise à prédire le comportement d'une structure donnée sous des charges et/ou d'autres actions externes, telles que les mouvements des supports ou les températures. Les paramètres de performance optimaux sont les contraintes ou forces résultantes (telles que les efforts axiaux, les cisaillements et les moments de flexion), les déplacements (ou déflexions) et les réactions des supports. Ce type d'analyse repose sur des principes fondamentaux et nécessite l'utilisation des relations force-déformation, des conditions de compatibilité (liées à la déformation géométrique) et des équations d'équilibre. L'objectif le plus courant est l'analyse statique des structures en équilibre. [2]

Pour l'analyse des structures on débute par l'étude statique qui se résulte sur des indications capitales de la résistance des structures aux sollicitations mais dans la réalité, le contrôle des vibrations et des ondes s'avère indispensable car elles peuvent causer des endommagements :

Elles engendrent la ruine de la structure ou la défaillance de ses constituants par rupture (fatigue par endommagement ou dépassement de contraintes élastiques).

Elles sont souvent source des défauts de fabrication lors de l'usinage des pièces mécaniques.

Pour l'étude et l'analyse dynamique des structures en mécanique, doit se baser sur :

La structure elle-même.

L'environnement vibratoire (les forces extérieures).

La réponse de la structure due aux forces extérieures.

Pour l'étude dynamique vibratoire ce divise en deux axes, le premier qui consiste à la détermination des caractéristiques dynamiques de la structure (fréquences et modes propres de vibration) appeler vibration libre.

Le deuxième axe se réfère pour les vibrations forcées qui permet de faire une analyse en fréquence ou temporelle de la réponse de la structure suite à un environnement (force d'excitation extérieure) [3]

I.3 L'endommagement des Structure

L'endommagement est un phénomène progressif de dégradation interne ou externe d'une structure, résulte de mouvement microscopique sous l'effet de sollicitation mécanique, qui détruisant les liaisons entre les atomes, ce qui introduisant une dégradation et changement dans les propriétés mécaniques de la structure.

Une structure soumise à des chargements dynamique subit, selon la nature des sollicitations, des grandes variations dans le comportement de la phase de déformation élastique et la phase plastique jusqu'à la rupture en cas d'endommagement. La présence de ces phases provoque des dégradations des propriétés mécaniques de la structure.

I.4 Détection d'endommagement

La détection des endommagements par vibrations repose sur le fait que les paramètres physiques de la structure (masse, rigidité et amortissement) déterminent ses paramètres modaux (déformations modales, fréquences propres).

Toute modification des propriétés physiques ou mécaniques susmentionnées, due à un dommage, par exemple, doit être quantifiable par une modification des paramètres modaux.

L'identification des dommages peut être divisée en plusieurs niveaux : détection (existence), localisation, quantification et suivi de leur progression. Les niveaux 1 (détection) et 2 (localisation) sont les seuls réalisables par la plupart des méthodes basées sur la réponse vibratoire.

Ces méthodes consistent à suivre les variations des caractéristiques vibratoires de la structure, telles que :

- Les fréquences propres. Bien que sensibles à toutes les formes de dommages, elles sont également sensibles aux conditions environnementales (température, humidité), qui peuvent reproduire l'effet d'un défaut.
- Les formes de mode ou leurs dérivées, par exemple, les courbures modales, la flexibilité ou la rigidité modale. Les variations de courbure modale, par exemple, sont souvent plus sensibles à la position d'un défaut que les formes de mode elles-mêmes.

- Les techniques du domaine fréquentiel, utilisant directement les fonctions de réponse en fréquence (FRF). [4]

I.5 Vibration mécanique appliquée aux structures

Les vibrations mécaniques jouent un rôle central dans l'étude, la conception et la surveillance des structures mécaniques. Toute structure, qu'elle soit, réagit aux excitations mécaniques par des vibrations naturelles qui sont directement liées à ses propriétés physiques : masse, rigidité, géométrie et conditions aux limites.

La vibration peut provenir de diverses sources et son mode dépend des propriétés structurelles, de la géométrie et des conditions aux limites, qui peuvent évoluer avec le temps. Bien que l'interprétation des valeurs mesurées soit parfois difficile en raison de grandes déviations statistiques des réponses vibratoires transitoires, ces réponses fournissent des informations importantes sur l'état d'une structure. [5]

L'analyse vibratoire permet non seulement de comprendre le comportement dynamique d'une structure mais aussi de détecter et localiser d'éventuels endommagements. Cette approche repose sur l'étude des caractéristiques modales de la structure, telles que les fréquences propres, les modes propres et les amortissements. Toute modification de ces paramètres peut être un indicateur de défaut (fissure, affaiblissement, perte d'adhérence...).

I.6 Effet de l'endommagement sur la réponse vibratoire

Les endommagements des matériaux ont des effets considérables sur leur réponse vibratoire. Les méthodes de vibration linéaire sont donc extrêmement efficaces pour caractériser et détecter ce type de dommages. L'évaluation des endommagements est indispensable pour améliorer la durabilité et la fiabilité des composants et des matériaux en service.

Les principaux effets d'endommagement sur la réponse vibratoire des matériaux sont les suivants :

- Diminution de la rigidité et altération des fréquences propres : Un endommagement de matériau entraîne une perte de rigidité. Cette perte est indiquée par la diminution des fréquences propres. Des recherches ont démontré que les valeurs des fréquences propres sont affectées par l'endommagement et que la fréquence diminue avec l'augmentation de la charge
- Décalage des courbes de réponse en fréquence : les dommages entraînent un décalage des images de résonance vers les basses fréquences. Des essais de vibration sur des poutres ou des barres laminées de différentes longueurs ou sur des plaques composites endommagées le confirment. [6]

I.7 Méthodes de détection Basée sur les déplacements

Les méthodes de détection des endommagements qui exploitent les variations de configuration spatiale de la structure, qu'elles soient statiques (charge permanente) ou dynamiques (modes modaux), sont basées sur le déplacement. Elles sont généralement considérées comme plus sensibles à la localisation des endommagements que les méthodes fréquentielles, car les variations de rigidité influencent localement sur le déplacement et la déformation. [7]

I.7.1 Déplacements Statiques et Déformations

Pour une charge statique F , le vecteur de déplacement U d'une structure élastique linéaire est décrit par l'équation d'équilibre statique :

$$KU = F \quad (1.1)$$

Où K est la matrice de rigidité statique de la structure. En cas de dommage, la rigidité locale de la structure diminue, modifiant ainsi la matrice K et, par conséquent, le champ de déplacement U pour la même charge F . La détection des dommages peut alors être obtenue en comparant les déplacements mesurés de la structure endommagée (U_d) avec ceux de la structure non endommagée (U_u) dans des conditions de charge comparables [8].

Les indicateurs de dommages basés sur les déplacements statiques sont les suivants :

- **Différence de déplacements:** La simple différence $\Delta U = U_d - U_u$ peut révéler les zones de déformation résiduelle causées par des déplacements résiduels anormaux induits par l'endommagement. Le bruit de mesure et l'erreur de mauvais placement des capteurs sont très sensibles dans cette méthode.

Indice de dommage de courbure (Curvature Damage Index - CDI) : Cette méthode est particulièrement appropriée pour les structures en poutre ou en plaque. L'idée est que les dommages concentrés dans une zone limitée entraînent une augmentation significative de la courbure de la déformation au point de dommage. Dans le cas d'une poutre, la courbure $k(x)$ est la dérivée seconde du déplacement transversal $\omega(x)$:

$$k(x) = \frac{d^2\omega(x)}{dx^2} \quad (1.2)$$

En pratique, pour les données de capteurs discrétisées, la courbure peut être approximée à l'aide de différences finies. Pour une séquence de déplacements ω_j observés aux points x_j le long de la structure, la courbure discrète au point j peut être approximée comme suit :

$$k_j \approx \frac{\omega_{j-1} - 2\omega_j + \omega_{j+1}}{h^2} \quad (1.3)$$

Où h est la distance entre les points de mesure. L'indice de l'endommagement est alors la différence de courbure entre les états sain et endommagé :

$$CDI_j = |k_{j,d} - k_{j,u}| \quad (1.4)$$

Les pics du CDI indiquent l'emplacement du l'endommagement [9].

- **Déformation :** Les déformations sont des déformations locales du matériau. Les dommages redistribuent les contraintes et les déformations au sein de la structure. Les mesures de déformation effectuées à l'aide de jauges de contrainte ou de techniques optiques (par exemple,

la corrélation d'images numériques - DIC) peuvent fournir des informations très localisées sur les dommages. La déformation ϵ est liée au déplacement u par les équations de compatibilité, par exemple, pour la déformation normale dans la direction x :

$$\epsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (1.5)$$

Les changements critiques dans les champs de déformation sont des indicateurs directs de dommages.

I.7.2 Déplacements dynamiques : modes propres

Les formes modales, ou vecteurs propres ϕ_i , sont les modes géométriques de déformation de la structure lorsqu'elle vibre à ses fréquences naturelles. Par rapport aux fréquences naturelles, qui sont des quantités définies globalement, les formes modales sont des propriétés locales et sont donc plus localisées à l'emplacement de l'endommagement [10]. Un endommagement localisé déforme la forme modale dans la région du défaut, même si le changement de fréquence naturelle est faible.

La détection des dommages à l'aide des formes modales implique la comparaison entre les formes modales mesurées de la structure endommagée et celles de la structure saine. Les formes modales peuvent fournir les indicateurs de dommages suivants :

Différence de forme modale (Mode Shape Difference - MSD) : il s'agit de la différence directe entre les formes modales de la structure saine et de la structure endommagée pour le même mode.

$$MSD_i = |\phi_{i,d} - \phi_{i,u}| \quad (1.6)$$

Les valeurs MSD élevées sont proportionnelles aux zones de dommages potentiels. Mais tout comme pour les déplacements statiques, elles sont sensibles aux erreurs de mesure et au bruit.

Critère d'assurance modale (MAC) : le MAC est une mesure courante permettant d'estimer la corrélation entre deux formes modales, ϕ_A et ϕ_B . Il est défini comme suit :

$$MAC_{(\phi_A, \phi_B)} = \frac{|\phi_A^T \phi_B|^2}{(\phi_A^T \phi_A)(\phi_B^T \phi_B)} \quad (1.7)$$

Le MAC varie entre 0 et 1. Un MAC de 1 signifie une corrélation idéale (les formes modales sont identiques), et un MAC de 0 signifie qu'il n'y a pas de corrélation. Dans le SHM, le MAC est calculé pour les formes modales des structures intactes et endommagées. Une forte diminution du MAC pour un mode spécifique peut indiquer un dommage. Le MAC peut être utile pour la détection, mais il ne l'est pas autant pour la localisation précise des dommages [11].

Curvature Mode Shape (CMS) ou dérivées de forme modale : Tout comme le CDI pour le déplacement statique, l'analyse des courbures des formes modales est très efficace pour localiser les dommages. La courbure d'une forme modale est sa dérivée spatiale seconde. Les dommages localisés créent une discontinuité ou un pic dans la courbure de la forme modale à l'endroit du défaut. Pour une forme modale ϕ_x , la courbure est :

$$\frac{d^2\phi_i(x)}{dx^2} \quad (1.8)$$

La forme discrète utilise des dérivées. [12]

Chapitre II. Méthodes des Elements Finis

II.1 Généralités

Au fil des évolutions technologiques en cours, l'ingénieur est désormais appelé à réaliser des projets de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus lourdes, on pense notamment aux projets spatial, aéronautique et nucléaire où la sécurité est absolument vitale. Mais d'autres projets tout aussi importants en raison de leur dimension sont liés à notre environnement ; pour mener à bien ces projets, l'ingénieur a besoin de posséder des modèles lui permettant de simuler le comportement de systèmes physiques complexes, afin de pouvoir anticiper la façon dont ses choix au stade de la conception du système pourraient avoir une influence sur le mouvement de ce dernier.

Les sciences de l'ingénieur qui mettent en jeu notamment mécanique des solides et des fluides, ... décrivent le comportement de systèmes physiques à partir d'équations différentielles aux dérivées partielles. La méthode des éléments finis est certainement l'une des méthodes les plus pratiquées de nos jours pour arriver à résoudre effectivement ces équations. Cette méthode repose sur une exploitation faite de l'ordinateur. Elle est très générale puisque applicable à la plupart des problèmes rencontrés dans la pratique : problèmes stationnaires ou non stationnaires, linéaires ou non linéaires, définis sur un domaine, géométriquement quelconque, à une, deux ou trois dimensions. Elle s'adapte également très bien aux médiums hétérogènes qui sont souvent rencontrés dans la pratique.

La méthode des éléments finis repose sur une approximation simple des variables inconnues qui permet de transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques. On fait appel à trois domaines :

- les sciences de l'ingénieur pour construire les équations aux dérivées partielles,
- les méthodes numériques pour construire et résoudre les équations algébriques.
- programmation et informatique pour exécuter efficacement les calculs sur l'ordinateur. [13]

II.2 Introduction

La méthode des éléments finis constitue un outil numérique pour résoudre des problèmes énoncés sous la forme d'équations aux dérivées partielles ou sous forme de minimisation fonctionnelle. Les fonctions d'approximation en éléments finis sont exprimées à la valeur nodale d'un champ physique inconnu. Un problème physique continu est alors transformé en un problème de type éléments finis discret à valeurs nodales inconnues comme dans le cas d'un problème linéaire à résoudre, avec un système d'équations algébriques linéaires. Les valeurs des éléments finis peuvent être obtenues à partir de ces valeurs nodales. Deux éléments clé de la méthode des éléments finis sont à signaler :

- Cette approximation par morceaux du champ physique par éléments finis est bien adaptée et précise, même lorsque les fonctions d'approximation sont basiques (mais on garde en tête que si l'on augmente le nombre d'éléments, même les simples polynômes d'un degré faible peuvent donner une précision à volonté).

• L'aspect local de l'approximation donne un système d'équations plutôt creux pour un problème discret. Ce qui est une opportunité appréciable dans la résolution de problèmes avec un très grand nombre de variables (les nœuds). [14]

II.3 Démarche De La Méthodes Des Eléments Finis

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis sont :

- La discrétisation du milieu continu en sous domaines ;
- La construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
- Le calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
- L'assemblage des matrices élémentaires ;
- La prise en compte des conditions aux limites ;
- La résolution du système d'équations

II.4 Discrétisation géométrique

Cette opération consistant à effectuer un découpage du domaine continu en sous-domaines:

$$D = \sum_{e=1}^{ne} D_e \text{ tel que } \lim_{e \rightarrow 0} (\cup_e D_e) = D \tag{2.1}$$

Il faut avoir probablement la capacité de mieux représenter la géométrie souvent complexe du domaine traité par des éléments de forme géométrique simple ; il ne doit pas exister de recouvrement ni de trou entre deux éléments ayant une frontière commune. Lorsque la frontière du domaine est complexe, une erreur de discrétisation géométrique est inévitable ; cette erreur doit être estimée et éventuellement réduite par une modification de forme ou une diminution de taille des éléments concernés (figure 1.1). Sur chaque élément, nous allons chercher à définir une approximation de la fonction solution.

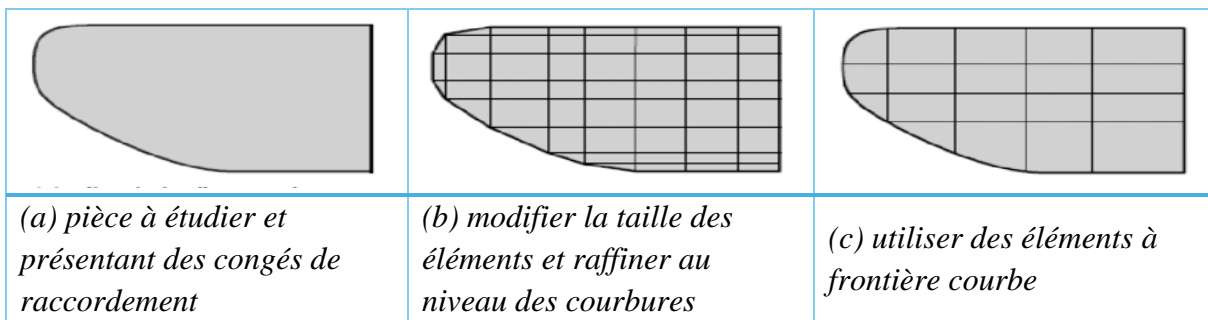


Figure II-1. Erreur de discrétisation géométrique

II.5 Approximation Modale

L'approximation par éléments finis provient d'une approximation nodale par sous domaines qui ne fait intervenir que les variables nodales du domaine élémentaire D_e :

$$\forall M \in D_e; \quad u \star (M) = N(M)u_n \tag{2.2}$$

Avec : $u^*(M)$ représente la valeur de la fonction approchée en tout point M de l'élément.

N , la matrice ligne des fonctions d'interpolation de l'élément.

un Est une fonction des variables nodales relatives aux nœuds d'interpolation de l'élément.

En général le champ à approcher est un champ vectoriel. On utilise alors la notation matricielle suivante :

$$u^*(M) = N(M)un \quad (2.3)$$

La matrice des nœuds M_i qui sont des points de l'élément pour lesquels on choisit d'identifier l'approximation u^* à la valeur du champ des variables u . On en déduit que :

$$\forall M_i, u^*(M_i) = u_i \quad (2.4)$$

Pour l'approximation nodale :

$$\forall M_i, N_j(M_i) = \delta_{ij} \quad (2.5)$$

L'interpolation nodale est construite à partir d'une approximation générale :

$$\forall M_i, u^*(M_i) = \Phi(M)a \quad (2.6)$$

Φ base des fonctions connues indépendantes est généralement une base polynomial, et a le vecteur des paramètres d'approximation dit paramètres généralisés n'ont aucune signification physique.

II.5.1 Approximation nodale de quelques éléments de référence

Un élément de référence est un élément géométrique simple, à frontière rectiligne, pour lequel l'approximation nodale a été construite à l'aide de la démarche analytique précédente. Le passage de l'élément de référence à l'élément réel sera réalisé par une transformation géométrique. Deux familles d'éléments sont en général présentées :

- les éléments de type Lagrange ;
- les éléments de type Hermite.

Pour les éléments de type Lagrange il s'agit de multiplier les nœuds tout en gardant une seule variable nodale. Pour les éléments de type Hermite on multiplie les variables nodales, on peut par exemple retenir les valeurs des dérivées du champ aux nœuds.

• Eléments à une dimension

La base de fonctions linéaires représentée dans la figure II.1(a) est écrite avec $s \in [0, 1]$:

$$N_1 = L_2 = 1 - s; N_2(s) = L_2 = s \quad (2.7)$$

Cette base est celle utilisée pour les éléments barres et entraîne une discontinuité dans les champs de déformations et de contraintes au passage d'un élément à son voisin. On pourrait utiliser une base légèrement plus riche composée de polynômes d'ordre 2 :

$$N_1(s) = L_1 = (2L_1 - 1); N_2(s) = 4L_1L_2; N_3(s) = L_2(2L_2 - 1) \quad (2.8)$$

Ces fonctions de forme sont schématisées dans la figure II.2(b). Le passage à l'ordre supérieur donne la base représentée sur la figure II.2(c) où seules N1 et N2 sont représentées : les deux autres fonctions N3 et N4 sont respectivement les symétriques de N1 et N2 par rapport à $s = 1/2$.

$$N_1(s) = \frac{L^1}{2}(3L^1 - 1)(3L^1 - 1) \quad ; \quad N_2(s) = \frac{9}{2}L_1L_2(3L^1 - 1) \quad (2.9)$$

$$N_3(s) = \frac{9}{2}L_1L_2(3L^2 - 1) \quad ; \quad N_4(s) = \frac{L^1}{2}(3L^2 - 2) \quad (2.10)$$

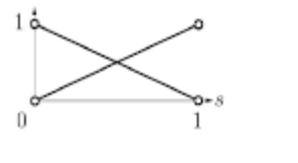
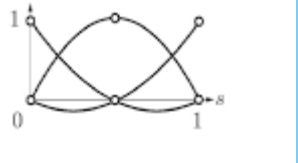
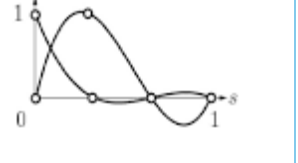
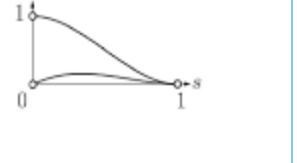
			
(a) élément à deux nœuds : base linéaire (1, s)	(b) élément à trois nœuds : base quadratique (1, s, s ²)	(c) élément à quatre nœuds : base cubique (1, s, s ² , s ³)	(d) élément d'Hermite : deux nœuds et deux inconnues par nœud

Figure II-2. Fonctions de forme à une dimension

• **Élément triangulaire à deux dimensions**

Pour le cas courant, l'approximation au sein de cet élément utilise la base polynomiale linéaire (1, s, t). On dit que l'élément de référence, aussi appelé parent, est un triangle rectangle à trois nœuds de type « T□ »,

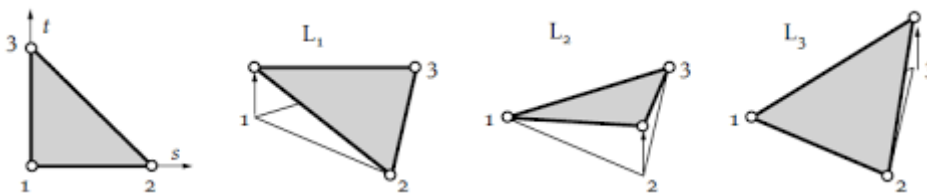


Figure II-3. Fonctions d'interpolation linéaires du triangle

Alors que l'approximation quadratique utilise au contraire la base (1, s, t, s², st, t²) ce qui correspond au triangle rectangle à six nœuds parent au type « T□ ». Posons :

$$L_3 = 1 - s - t; L_3 = t \quad (2.11)$$

Pour :

- les trois nœuds sommets $i = 1, 2, 3$, les fonctions de forme sont données par :

$$N_i = L_i(2L_i - 1) \quad (2.12)$$

- les trois nœuds d'identification $i=1, 2, 3$:

$$N_{i+3} = 4L_iL_k \quad \text{Pour } j \neq i \quad k \neq i, j \quad (2.13)$$

La figure (I.4) donnée une représentation de deux des fonctions d'interpolation

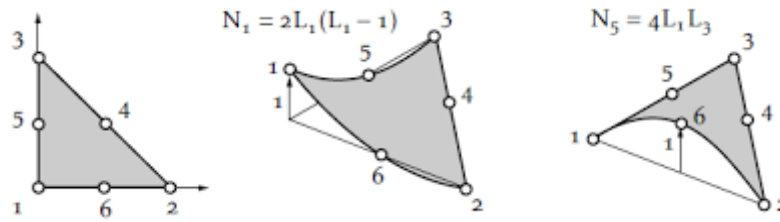


Figure II-4. Fonctions d'interpolation quadratiques du triangle. Les autres sont obtenues par rotation

II.6 Assemblage et condition aux limites

Les règles d'assemblage sont définies par la relation :

$$D \simeq \sum_{e=1}^{ne} De \tag{2.14}$$

(Sont oublier l'erreur de discrétisation géométrique.)

Assemblage des matrices élémentaires masse (Me) et raideur (Ke) s'effectue selon les mêmes règles. Ces règles sont obtenues en sommant les termes associés au travail virtuel de chaque élément :

$$\sum_{e=1}^{ne} \delta u^T Me \ddot{u} = \delta u^T Mu \tag{2.15}$$

Et

$$\sum_{e=1}^{ne} \delta u^T Ke u = \delta u^T Ku \tag{2.16}$$

Ceci traduit le fait que la forme quadratique définissant l'ensemble du domaine est la somme des formes quadratiques des sous-domaines. Il s'agit de « ranger » dans une matrice globale, les éléments des matrices élémentaires. La forme de cette matrice dépend bien sûr de l'ordre selon lequel sont rangées les inconnues globales de U.

II.6.1 Effort imposes

L'assemblage ne pose pas de problème, il est défini par sommation des termes correspondant au travail virtuel calculé pour chaque élément :

$$\sum_{e=1}^{ne} \delta u^T F de = \delta u^T F d \tag{2.17}$$

II.6.2 Effort inconnus

La structure peut également être assemblée de la même manière. Mais si les connexions idéales sont faites aux éléments, alors la somme des forces inconnues aux nœuds internes de la structure est nulle. Nous pouvons procéder de manière à simplifier l'expression du travail virtuel des forces inconnues en calculant uniquement le travail virtuel des forces correspondantes aux liaisons cinématiques qui sont imposées à la structure, et celui des connexions défectueuses. Lors de l'assemblage, nous obtenons la forme matricielle du principe du travail virtuel :

$$MU + KU \ddot{=} Fd + Ft \tag{2.18}$$

Sous cette forme, nous avons ici N équations pour $N + P$ inconnues. Afin de les résoudre, nous devons incorporer les P conditions aux limites cinématiques pour les P composantes inconnues du vecteur F_i . [15]

II.7 Déformations des barres en traction/compression

Considérons une barre prismatique de longueur L soumise à une force de traction P (Fig. II.5).

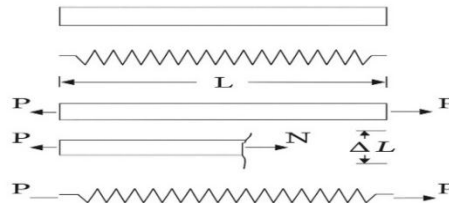


Figure II-5. Une barre prismatique.

La contrainte normale

$$\sigma = \frac{N}{S} \quad (2.19)$$

Avec

N = force de traction

S : aire de la section transversale.

La déformation relative :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.20)$$

Loi de Hooke :

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.21)$$

En substituant (2.19) et (2.20) dans (2.21), on a :

$$E \frac{\Delta L}{L} = \frac{N}{S} \quad \Rightarrow \quad N = \frac{ES}{L} \Delta L \quad (2.22)$$

Par analogie avec un ressort de raideur K soumis à une force N se déformant de ΔL , tel que :

$$N = K\Delta L \quad (2.23)$$

La raideur longitudinale d'un élément est déterminée en identifiant l'équation (2.23) :

$$K = \frac{ES}{L} \quad (2.24)$$

La rigidité longitudinale, ou la capacité d'un élément à se déformer longitudinalement, dépend donc de ses caractéristiques mécaniques et géométriques. Pour un élément composé de plusieurs sections, la déformation totale est donnée par :

$$\Delta L = \sum \frac{N_i L_i}{E_i S_i} \quad (2.25)$$

Et dans le cas le plus général où l'aire de la section transversale et l'effort normal N varient le long de la ligne moyenne de l'élément, l'équation (1.24) prend alors la forme suivante [16] :

$$\Delta L = \int_0^L \frac{N(x)}{ES(x)} dx \quad (2.26)$$

II.8 Les Matrices élémentaires

Les matrices de rigidité et de masse sont essentielles dans le système discret d'équations algébriques en lequel la méthode des éléments finis convertit la solution des problèmes continus. Ces matrices représentent les propriétés physiques du système décomposées en « éléments ».

II.8.1 Matrice de Raideur

La matrice de raideur note « K », modélise la résistance d'une barre à la déformation, elle relie les déplacements u aux efforts interne :

$$K u = f \quad (2.27)$$

Elle est construit à partir du modelé de Young E ; de la section A ; de la longueur L et des fonctions de forme. [17]

• Cas unidimensionnels (1D)

Les matrices de raideur élémentaires sont simples, pour une barre elle s'écrit sous la forme :

$$K = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

• Cas bidimensionnels (2D)

La raideur dans le repère global (x, y) s'exprime par :

$$K = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & -s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Avec : $c = \cos(\theta)$, $s = \sin(\theta)$

• Cas tridimensionnels (3D)

On utilise une matrice de transformation pour projeter la raideur locale dans le repère global (x, y, z) ; la matrice finale est de taille 6×6 tenant compte de trois DOF par nœud.

$$K_e = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} l^2 & lm & ln & -l^2 & -lm & -ln \\ lm & m^2 & mn & -lm & -m^2 & -mn \\ ln & mn & n^2 & -ln & -mn & -n^2 \\ -l^2 & -lm & -ln & l^2 & lm & ln \\ -lm & -m^2 & -mn & lm & m^2 & mn \\ -ln & -mn & -n^2 & ln & mn & n^2 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

II.8.2 Matrice de masse

La matrice de masse permet de relier l'accélération du système à sa masse distribuée, elle intervient dans l'équation dynamique suivante :

$$M\ddot{u} + Ku = F(t) \quad (2.31)$$

• Cas unidimensionnels (1D)

Dans un élément finis 1D, la matrice de masse pour un élément à deux nœuds est suivent :

- pour masse consistante :

$$M = \frac{\rho AL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

- pour masse condensées :

$$M = \frac{\rho AL}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

• Cas bidimensionnels (2D)

Dans le cas d'un triangle ou d'un quadrilatère (élément finis 2D), la matrice de masse est plus complexe par exemple, pour un triangle linéaire à 3 nœuds :

$$M = \frac{\rho EA}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Si la barre est inclinée dans un plan (par exemple pour un treillis) la matrice de masse doit être exprimée dans un espace vectoriel plus large : chaque nœud a deux degrés de liberté (x, y)

$$M = m \begin{bmatrix} I_2 & 0 \\ 0 & I_2 \end{bmatrix} \quad m = \frac{\rho AL}{2} \quad (2.35)$$

(Ou I_2 est la matrice identité 2×2)

• Cas tridimensionnels (3D)

Dans le cas tridimensionnel ; chaque nœud a trois degrés de liberté (x, y, z) [18] :

$$M = m \begin{bmatrix} I_3 & 0 \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \quad m = \frac{\rho AL}{2} \quad (2.36)$$

(Ou I_3 est la matrice identité 3×3)

II.9 Conclusion

Dans ce Chapitre on a présente la Méthode des Éléments Finis (MEF) comme un outil numérique essentiel pour résoudre des problèmes complexes d'ingénierie, notamment ceux décrits par des équations différentielles aux dérivées partielles. La MEF transforme un problème physique continu en un système d'équations algébriques discrètes en approximant les variables inconnues par des fonctions nodales. Le processus implique la discrétisation géométrique du milieu en sous-domaines, la construction d'approximations nodales, le calcul et l'assemblage des matrices élémentaires (masse et raideur), la prise en compte des conditions aux limites, et la résolution du système résultant. Le chapitre détaille également les déformations des barres en traction/compression et l'élaboration des matrices de raideur et de masse pour des cas unidimensionnels, bidimensionnels et tridimensionnels, soulignant leur rôle crucial dans la modélisation de la résistance à la déformation et de la masse distribuée du système.

*Chapitre III. Méthode de Détection d'endommagement par Fonction Réponse
Fréquentielles*

III.1 Introduction

La détection des endommagements dans les structures mécaniques est un domaine crucial de l'ingénierie moderne, visant à assurer la sécurité, la fiabilité et la durabilité des infrastructures. Avec le vieillissement des matériaux, les contraintes environnementales et les charges opérationnelles, les structures sont inévitablement sujettes à des dégradations qui peuvent compromettre leur intégrité. La surveillance de la santé structurelle (Structural Health Monitoring - SHM) est devenue une discipline essentielle pour identifier et localiser ces dommages de manière précoce, permettant ainsi des interventions de maintenance opportunes et réduisant les risques de défaillance catastrophique.

Parmi les diverses techniques de SHM, les méthodes basées sur l'analyse vibratoire se distinguent par leur capacité à évaluer l'état global d'une structure sans nécessiter un accès direct aux zones endommagées. Au cœur de ces méthodes se trouve l'utilisation de la fonction de réponse fréquentielle (FRF), un outil puissant qui caractérise le comportement dynamique d'un système en réponse à des excitations. Les changements dans les propriétés dynamiques d'une structure, tels que les fréquences propres et les formes modales, sont des indicateurs sensibles de la présence de dommages. Ce document explore en détail la méthode de détection des dommages sur les structures mécaniques en se basant sur l'analyse de la fonction de réponse fréquentielle. Nous aborderons les principes fondamentaux de l'analyse modale, les différentes approches de détection des dommages utilisant la FRF, ainsi que des applications concrètes et des études de cas dans divers domaines de l'ingénierie. L'objectif est de fournir une compréhension complète de cette technique, de ses avantages et de ses limites, tout en soulignant son importance dans la maintenance prédictive et la gestion des risques structurels.

III.2 Définition et propriétés des FRF

Les Fonctions de Réponse Fréquentielle (FRF) décrivent la relation entre la réponse d'un système et l'excitation qui lui est appliquée, en fonction de la fréquence. Elles sont généralement définies comme le rapport de la transformée de Fourier de la réponse (déplacement, vitesse ou accélération) à la transformée de Fourier de la force d'excitation. Mathématiquement, la FRF est donnée par :

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (3.1)$$

Où $H(\omega)$ est la transformée de Fourier de la réponse et $F(\omega)$ est la transformée de Fourier de la force. Les FRF sont des fonctions complexes, dont la partie réelle et la partie imaginaire (ou le module et la phase) fournissent des informations sur l'amplitude et le déphasage de la réponse par rapport à l'excitation à chaque fréquence. Les pics dans le module des FRF correspondent aux fréquences propres (ou fréquences de résonance) du système, tandis que la phase change rapidement autour de ces fréquences. Ces caractéristiques rendent les FRF particulièrement sensibles aux modifications des propriétés structurelles.

Il existe différents types de FRF, notamment :

- Admittance (ou mobilité) : rapport de la vitesse à la force.
- Impédance : rapport de la force à la vitesse.
- Compliance (ou réceptance) : rapport du déplacement à la force.
- Inertance (ou accélération) : rapport de l'accélération à la force.

Chaque type de FRF offre une perspective différente sur le comportement dynamique de la structure et peut être plus ou moins pertinent selon l'application et le type de capteurs utilisés. Les FRF sont intrinsèquement liés aux propriétés modales de la structure et peuvent être exprimées en fonction de ces propriétés, ce qui permet de les utiliser pour l'identification modale [19].

III.3 Mesure des FRF

La mesure expérimentale des FRF est une étape cruciale dans l'analyse vibratoire et la détection d'endommagement. Elle implique l'application d'une force d'excitation connue à la structure et la mesure de la réponse vibratoire en un ou plusieurs points. Les équipements typiques utilisés pour la mesure des FRF incluent des marteaux d'impact (pour les excitations transitoires), des shakers (pour les excitations continues ou aléatoires), des accéléromètres (pour mesurer la réponse vibratoire) et des systèmes d'acquisition de données. Le processus de mesure des FRF est complexe et nécessite une attention particulière à la préparation de l'expérience, au choix des points de mesure et à l'analyse des données pour minimiser les erreurs et le bruit.

Les étapes générales de la mesure des FRF sont les suivantes :

- **Excitation de la structure** : Application d'une force contrôlée à la structure. Les types d'excitation peuvent varier (impulsion, balayage sinusoïdal, bruit aléatoire, etc.).
- **Acquisition des données** : Mesure simultanée de la force d'excitation et de la réponse vibratoire (accélération, vitesse ou déplacement) à l'aide de capteurs.
- **Traitement du signal** : Utilisation de la transformée de Fourier rapide (FFT) pour convertir les signaux temporels en signaux fréquentiels.
- **Calcul des FRF** : Calcul du rapport des spectres de sortie aux spectres d'entrée. Des techniques de moyen-âge sont souvent utilisées pour réduire le bruit et améliorer la qualité des FRF.

La précision des FRF mesurées est primordiale pour une détection d'endommagement fiable. Des facteurs tels que le bruit environnemental, la non-linéarité de la structure, et les erreurs de mesure peuvent affecter la qualité des FRF et, par conséquent, la capacité à détecter des changements subtils dus à l'endommagement. Des techniques avancées de traitement du signal et d'identification modale sont souvent nécessaires pour obtenir des FRF de haute qualité à partir de données expérimentales [20].

III.4 Principes de la Détection d'Endommagement par FRF

Le principe fondamental de la détection d'endommagement basée sur les vibrations repose sur l'observation que la présence d'un endommagement dans une structure modifie ses propriétés physiques (masse, rigidité, amortissement), ce qui, à son tour, altère ses caractéristiques dynamiques (fréquences propres, formes modales, amortissement) [21]. Les Fonctions de Réponse Fréquentielle (FRF), en tant que représentations complètes du comportement dynamique d'une structure, sont particulièrement sensibles à ces changements et constituent donc un outil puissant pour l'identification des dommages.

III.4.1 Changements des propriétés dynamiques dus à l'endommagement

L'endommagement, qu'il s'agisse de fissures, de délaminations, de corrosion ou de dégradations matérielles, entraîne généralement une réduction de la rigidité locale ou globale de la structure. Dans certains cas, une augmentation de la masse (par exemple, accumulation de glace ou d'eau) ou des changements dans l'amortissement peuvent également se produire. Ces modifications ont un impact direct sur les propriétés dynamiques de la structure :

- **Fréquences propres** : Une réduction de la rigidité tend à diminuer les fréquences propres de la structure. C'est l'un des indicateurs les plus couramment utilisés pour la détection d'endommagement, car il est relativement facile à mesurer.
- **Formes modales** : Les formes modales, qui décrivent la déformée spatiale de la structure à une fréquence propre donnée, sont également affectées par l'endommagement. Les changements sont souvent plus prononcés à proximité de la zone endommagée.
- **Amortissement modal** : L'amortissement peut augmenter ou diminuer en fonction du type et de la sévérité de l'endommagement, bien que son utilisation comme indicateur soit plus complexe en raison de sa sensibilité à de nombreux facteurs non liés à l'endommagement.

La détection d'endommagement par FRF exploite ces changements en comparant les FRF d'une structure saine (état de référence) avec celles de la structure potentiellement endommagée. Toute différence significative entre les deux ensembles de FRF peut indiquer la présence, la localisation et potentiellement la sévérité d'un endommagement [22].

III.4.2 Indicateurs d'endommagement basés sur les FRF

Plusieurs indicateurs d'endommagement ont été développés, exploitant les informations contenues dans les FRF. Ces indicateurs peuvent être basés sur les propriétés modales extraites des FRF ou directement sur les FRF elles-mêmes.

III.4.3 Changement de fréquences propres

Le changement des fréquences propres est l'un des indicateurs les plus simples et les plus intuitifs de l'endommagement. Une diminution des fréquences propres est souvent le signe d'une perte de rigidité due à un dommage. Cette méthode est facile à mettre en œuvre et ne nécessite pas de modèle numérique complexe. Cependant, elle présente des limitations : elle est généralement plus sensible aux dommages globaux qu'aux dommages localisés, et elle peut être influencée par des facteurs environnementaux tels que la température [23].

III.4.4 Changement de déformées modales et courbure modale

Les formes modales sont plus sensibles aux dommages localisés que les fréquences propres. La méthode de la courbure modale est particulièrement efficace. Elle est basée sur l'idée que la courbure d'une forme modale change de manière significative au niveau de la zone endommagée. Cette méthode ne nécessite pas de données de l'état sain de la structure et peut être utilisée pour localiser les dommages. Cependant, elle est sensible au bruit de mesure et nécessite une densité de capteurs suffisante pour capturer les changements locaux [24].

III.4.5 Analyse directe des FRF (méthode de la courbure des FRF)

Au lieu d'extraire les propriétés modales, certaines méthodes analysent directement les FRF pour détecter l'endommagement. La méthode de la courbure des FRF est une extension de la méthode de la courbure modale, mais appliquée directement aux FRF mesurées. Elle est basée sur l'observation que la courbure des FRF est également sensible aux dommages. Cette approche présente l'avantage de ne pas nécessiter d'identification modale préalable, ce qui peut simplifier le processus. Elle est particulièrement utile pour la détection de dommages dans des structures complexes où l'identification modale est difficile.

L'analyse directe des FRF peut également impliquer la comparaison de l'amplitude ou de la phase des FRF entre l'état sain et l'état endommagé, ou l'utilisation de techniques de corrélation pour quantifier les différences. Ces méthodes sont souvent robustes face au bruit et peuvent fournir des informations précieuses sur la présence et la localisation des dommages [25].

III.5 Techniques d'identification modale pour l'extraction Des FRF

L'identification modale est le processus qui consiste à extraire les paramètres modaux (fréquences propres, amortissement, formes modales) d'une structure à partir de données vibratoires expérimentales. Bien que certaines méthodes de détection d'endommagement opèrent directement sur les FRF, beaucoup s'appuient sur les changements des paramètres modaux. Des techniques d'identification modale robustes et précises sont donc essentielles. Parmi les méthodes les plus courantes, on trouve :

- **Les méthodes dans le domaine fréquentiel** : Ces méthodes, telles que la méthode du pic (Peak-Picking) ou les méthodes d'ajustement de courbe (Curve-Fitting), opèrent directement sur les FRF mesurées pour extraire les paramètres modaux. Elles sont relativement simples à mettre en œuvre mais peuvent être sensibles au bruit et à la densité modale

- **Les méthodes dans le domaine temporel** : Ces méthodes, comme la méthode de la Décomposition en valeurs singulières (SVD) ou les méthodes de sous-espace stochastique (SSI), travaillent avec les réponses impulsionnelles ou les données de vibration ambiante. Elles sont souvent plus robustes et peuvent gérer des systèmes complexes avec des modes couplés [26].

Le choix de la technique d'identification modale dépend de la nature de l'excitation, du type de données disponibles et de la complexité de la structure. Une identification modale précise est une condition préalable à une détection d'endommagement fiable basée sur les paramètres modaux.

III.6 Application

III.6.1 Structure 2D avec 200 éléments

Une structure en treillis simplement supportée a servi pour l'étude de simulation, dans cet article se compose de 200 barres en Acier (6,1 m de longueur, 0,0026 m² de section transversale) et 77 nœuds, le modèle d'éléments finis de la structure en treillis est établi en utilisant le logiciel commercial MATLAB ;

Chaque barre de la structure en treillis est simulée comme un élément fini. Le module d'Young et la densité de la barre sont respectivement de 210 GPa et 7860 kg /m³.

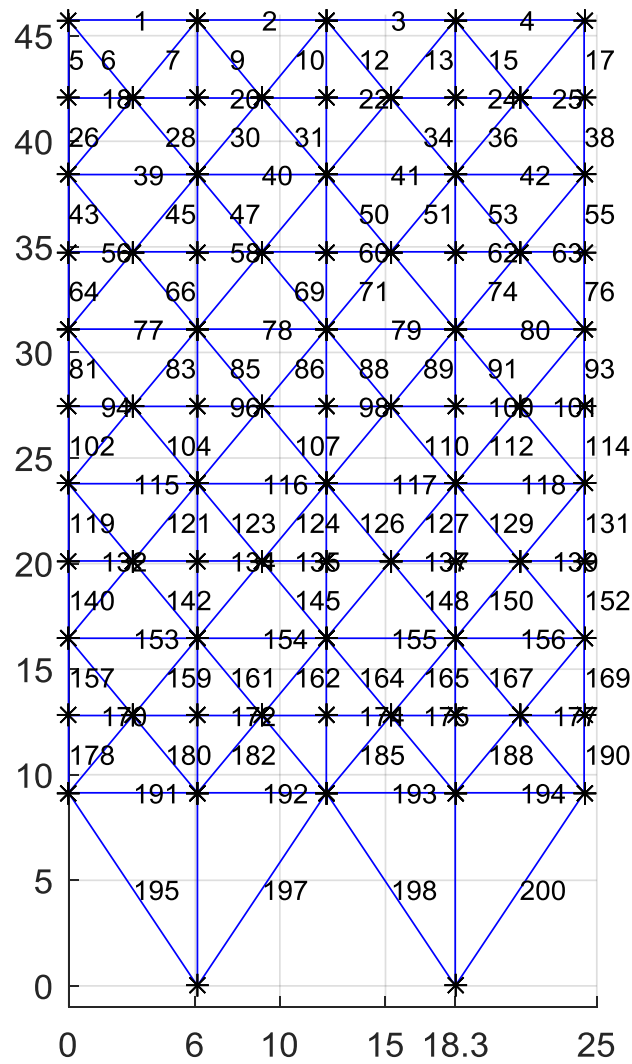


Figure III-1. Structure Treillis 2D a (200) éléments

Section transversale [m ²]	Module de Young [GPa]	Masse volumique [kg/m ³]	Longueurs des barres [m]
0,0026	210	7860	6,1

Tableau III-1. Propriétés mécanique et géométrique de la structure treillis 2D a (200) élément

Afin de valider la technique d'évaluation des endommagements proposée, trois cas sont considérés, dans lesquels les endommagements simple sont étudiés comme indique dans le tableau.

Dans ce dernier, les numéros d'élément et le pourcentage de réduction de la rigidité sont listés.

Cas D'endommagement	Eléments endommagée (% réduction de rigidité)
Cas 1	116(25%)
Cas 2	40(20%)

Tableau III-2. Cas d'endommagements de la structure treillis 2D a (200) éléments.

Mode	Fréquences	Saine [Hz]		Cas 1		Cas 2	
		expérimentale	Erreur%	F [Hz]	Erreur%	F [Hz]	Erreur%
1	5	5,0217	0,0043	5,0215	0,0043	5,0216	0,0043
2	12,3074	12,3227	0,0012	12,3227	0,0012	12,3192	0,0010
3	15,0066	15,0348	0,0019	15,0348	0,0019	15,0348	0,0019
4	16,6699	16,8704	0,0120	16,8638	0,0116	16,8638	0,0116
5	22,1033	21,3070	0,0360	21,3069	0,0360	21,3068	0,0360

Tableau III-3. Fréquences naturelles saines et endommagées de la structure (200) éléments 2D

Les résultats des indicateurs d'endommagement de différents cas d'endommagement sont présentes dans le tableau .Les Cinq premières fréquences naturelles, énumérées dans ce même tableau, sont affiliées dans ce cas pour tous les scénarios d'endommagements afin de calculer la forme de l'erreur.

III.6.2 La Localisation des endommagements par la méthode de fonction réponse fréquentielle

(a) Premier cas

L'élément 116 de la structure est endommagé de 25%.

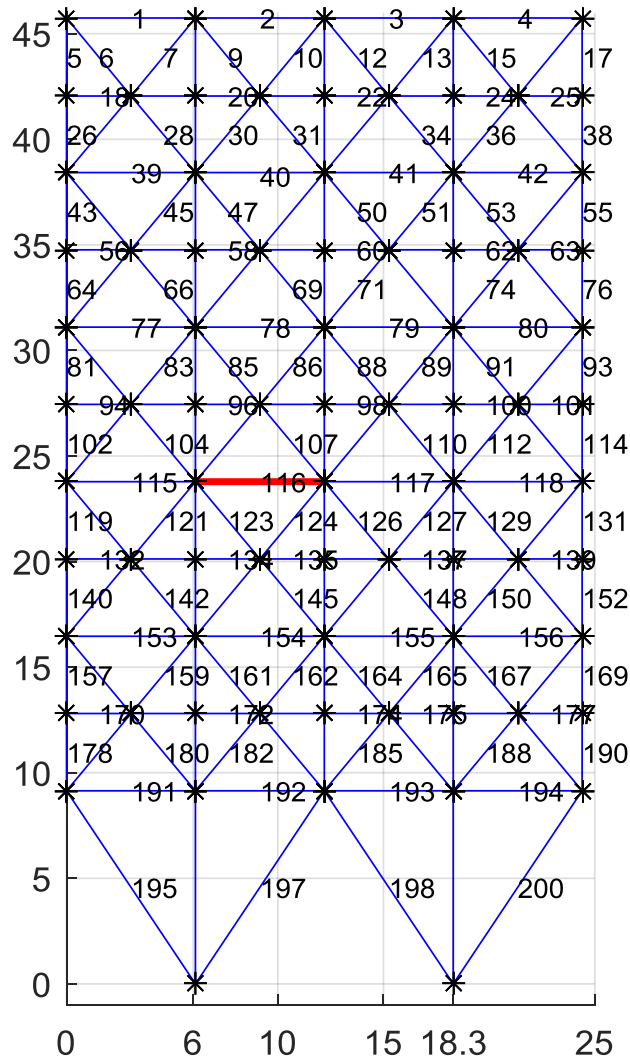


Figure III-2. Premier cas d'endommagement pour la structure 200 de 25%

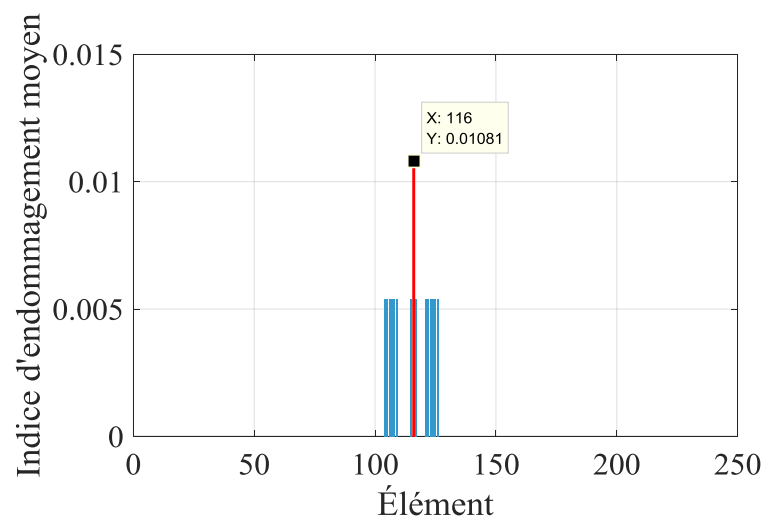


Figure III-3. Identification d'endommagement d'une structure 2D a 200 éléments (premier cas d'endommagement).

Notre représentation graphique indique la présence d'une anomalie dans l'élément 116, ce pic présenter sous forme de barre (la barre rouge) situé sur l'élément 116 confirme qu'il y'a un changement dans les propriétés mécaniques de l'élément.

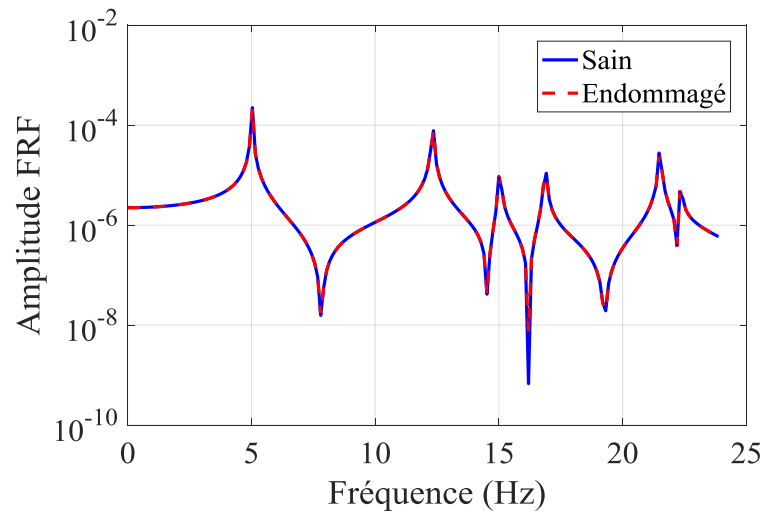


Figure III-4. Variations d'amplitude FRF pour une structure 2D (élément 116) sain et endommagée

La figure met en évidence des différences de comportement vibratoire entre une structure saine et une structure endommagée. Bien que les fréquences propres restent globalement constantes, les variations d'amplitude FRF peuvent être utilisées comme indicateurs d'endommagement.

(b) Deuxième cas :

L'élément 40 de la structure est endommagé de 20%.

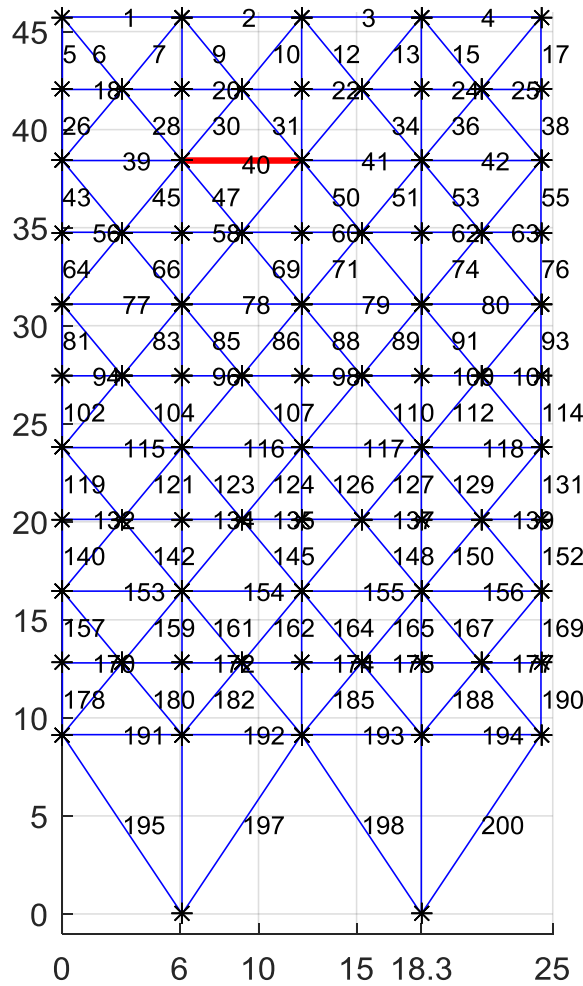


Figure III-5. Deuxième cas d'endommagement pour la structure 200 de 20%

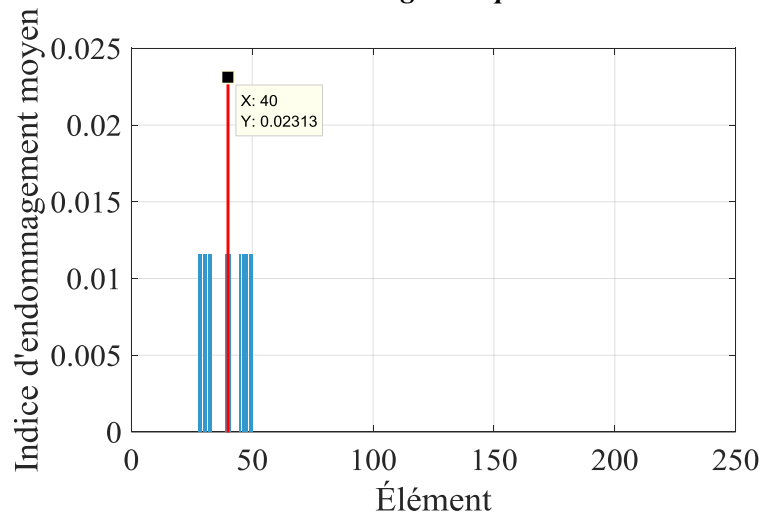


Figure III-6. Identification d'endommagement d'une structure 2D a 200 éléments (premier cas d'endommagement).

Cette figure est affiliée au deuxième cas, ou on a endommage les éléments 40, l'indication graphique nous affirme cela par la perturbation dans les propriétés mécaniques.

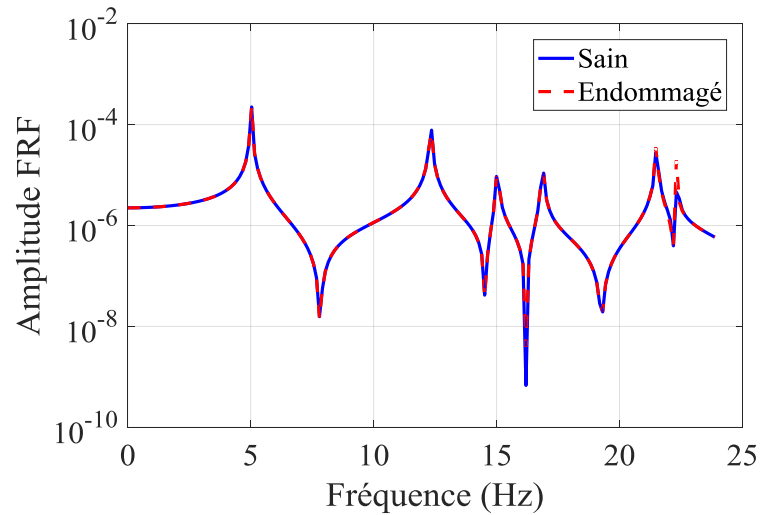


Figure III-7. Variations d'amplitude FRF pour une structure 2D (élément 40) sain et endommagée

La figure (III.7) illustre bien que l'endommagement soit subtil, il provoque une modification de la réponse dynamique, particulièrement visible à certaines fréquences. Cela confirme l'intérêt de la FRF comme outil sensible pour la détection précoce d'endommagements dans une structure.

III.6.3 Structure 3D avec 116 éléments

Une structure en treillis compose de 116 éléments en 3D, le modèle est divisé en 116 éléments de 3 ddl pour chaque nœud, les propriétés de l'élément sont énumérées dans la figure (III.8), et les propriétés mécaniques et géométriques de la structure sont données dans le tableau III.4.

Module d'Young [GPa]	Masse volumique [Kg/m ³]
210	7800

Tableau III-4. Propriétés mécanique et géométrique de la structure treillis 3D a (116) éléments.

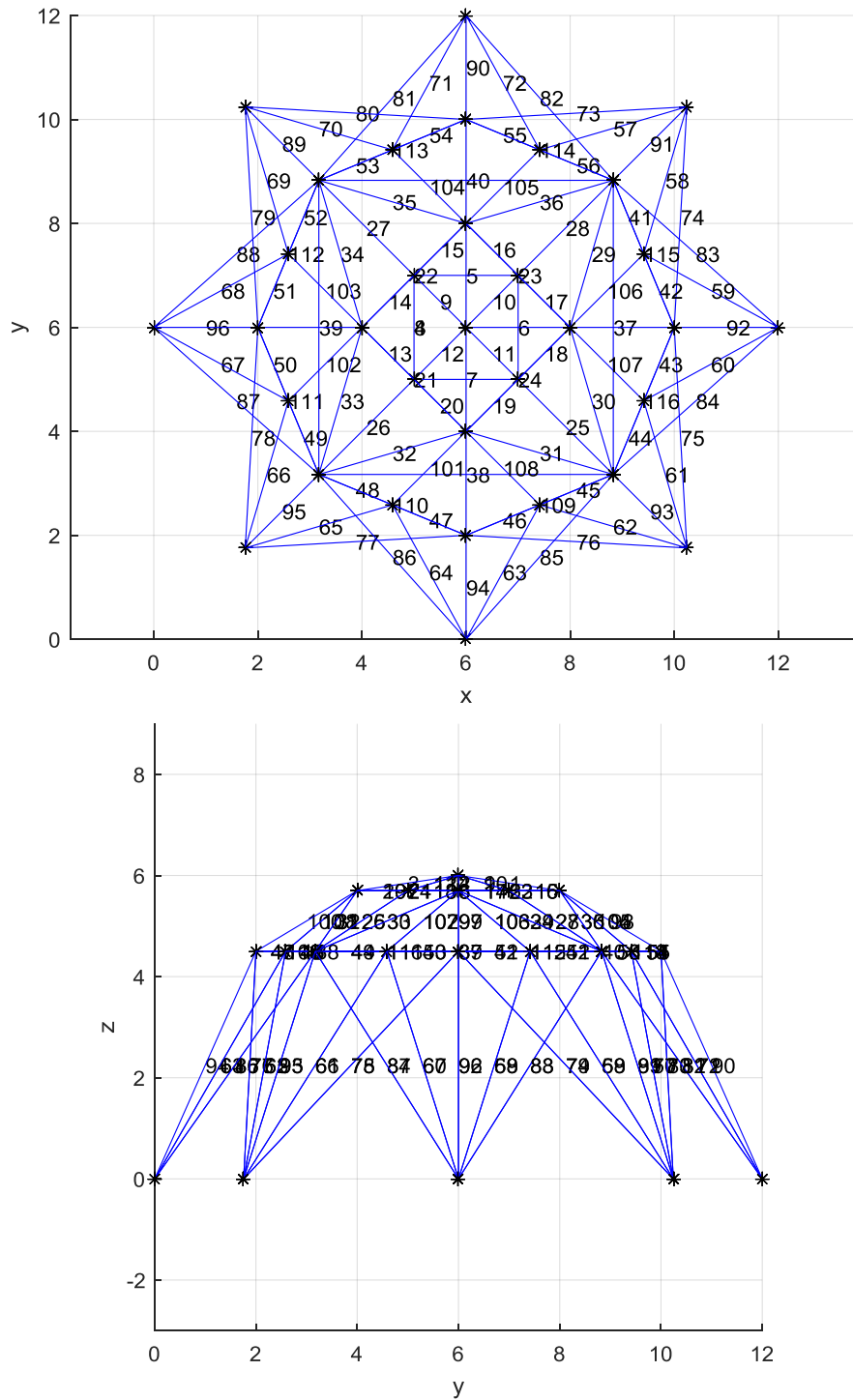


Figure III-8. Structure treillis 3D à 116 éléments.

Afin de valider la technique d'évaluation des endommagements proposée, deux cas sont considérés, dans lesquels les endommagements simple sont étudiés comme indiqué dans le tableau :

Cas d'endommagement	Elément endommages (% réduction de rigidité)
Cas 1	6(15%)
Cas 2	53(10%)

Tableau III-5. Cas d'endommagements de la structure treillis 3D a (116) éléments.

Mode	Fréquences saine [Hz]			Cas 1		Cas 2	
		Expérimentale	Erreur %	F [Hz]	Erreur %	F [Hz]	Erreur %
1	10,6765	10,6765	2,58e-06	10,6765	2,58e-06	10,6765	2,93e-06
2	14,7165	14,7165	3,34e-06	14,6978	0,0012738	14,6398	0,00521518

Tableau III-6. Fréquences naturelles saines et endommagées de la structure (116) éléments 3D.

Les résultats des indicateurs d'endommagement de différents cas d'endommagement sont présents dans le tableau(III.6). Les deux fréquences naturelles, énumérées dans ce même tableau sont affiliées dans ce cas pour tous les cas d'endommagement afin de calculer la forme de l'erreur.

III.6.4 La Localisation des endommagements par la méthode de fonction réponse fréquentielle

(a) Premier cas :

L'élément 6 de la structure est endommagé de 15%.

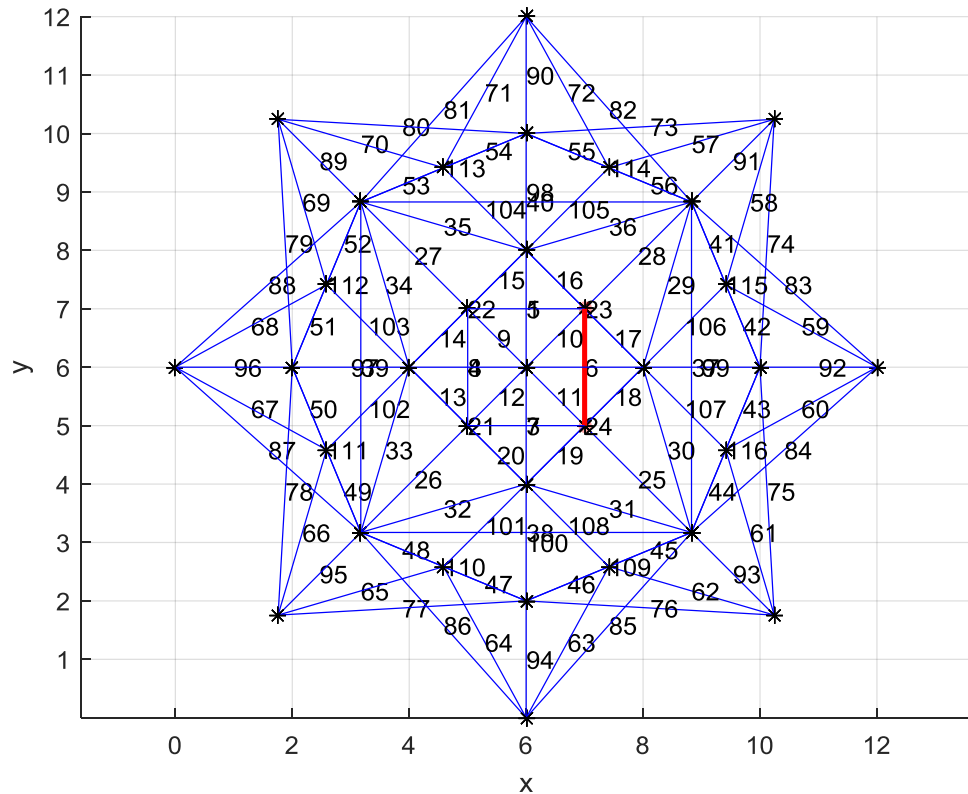


Figure III-9. Premier cas d'endommagement pour la structure 6 de 15%

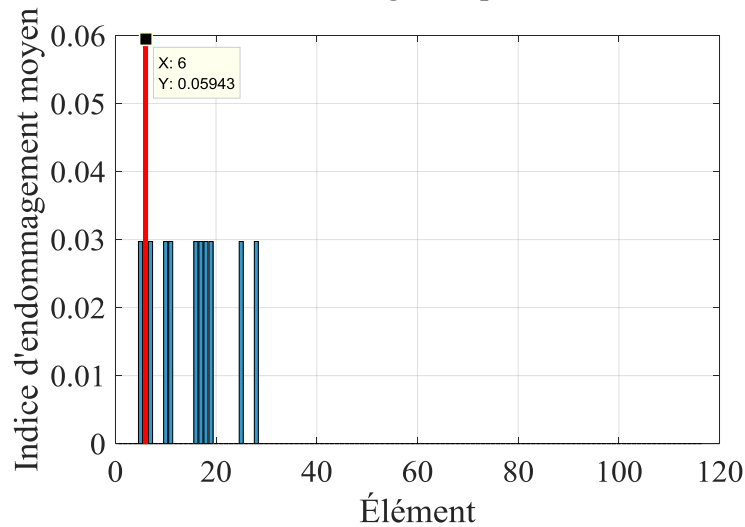


Figure III-10. Identification d'endommagement d'une structure 3D a 6 éléments (premier cas d'endommagement).

Notre représentation graphique indique la présence d'une anomalie dans l'élément 6, ce pic présenter sous forme de barre (la barre rouge) situer sur l'élément 6 confirme qu'il y'a un changement dans les propriétés mécaniques de l'élément.

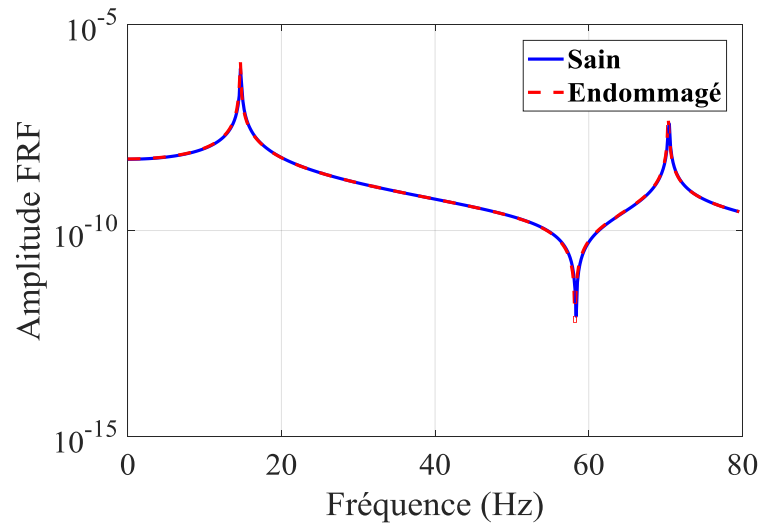


Figure III-11. Variations d'amplitude FRF pour une structure 3D (élément 6) sain et endommagé

En conclusion, cette figure démontre que l'endommagement appliqué à la structure, bien que présent, n'entraîne pas de changements détectables dans la fonction de réponse en fréquence telle que visualisée sur cette échelle. Les modes vibratoires principaux et les anti-résonances de la structure restent inchangés. Pour identifier un tel endommagement, des méthodes d'analyse plus sensibles, qui ciblent des variations subtiles non apparentes sur les amplitudes brutes de la FRF, seraient nécessaires.

(b) Deuxième cas :

L'élément 53 de la structure est endommagé de 10%.

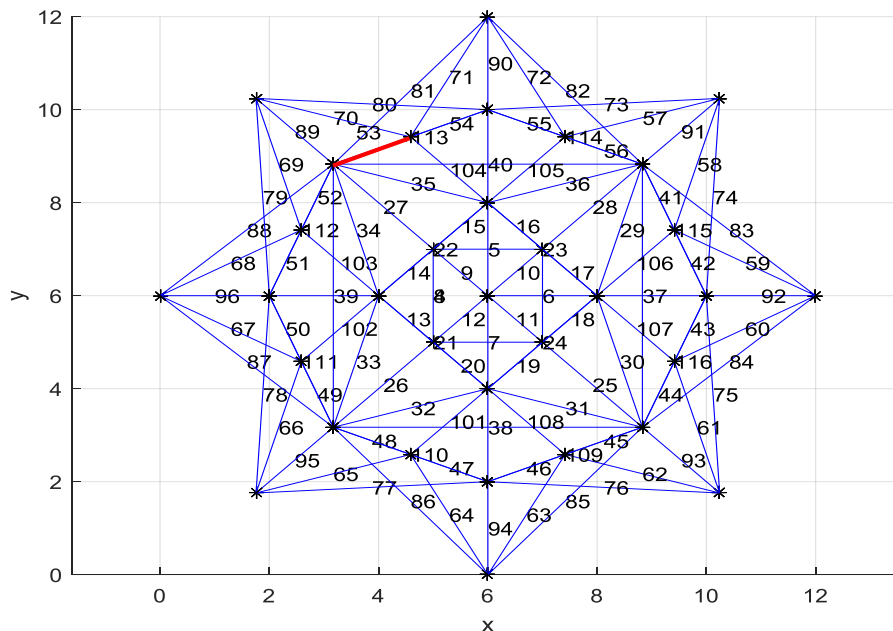


Figure III-12. Premier cas d'endommagement pour la structure 53 de 10%

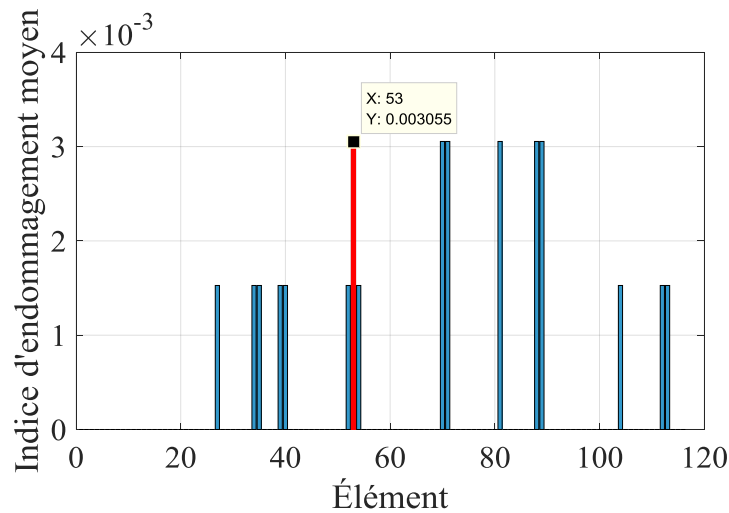


Figure III-13. Identification d'endommagement d'une structure 3D a 53 éléments (deuxième cas d'endommagement).

Cette figure est affiliée au deuxième cas, ou on a endommagé les éléments 53, l'indication graphique nous affirme cela par la perturbation dans les propriétés mécaniques.

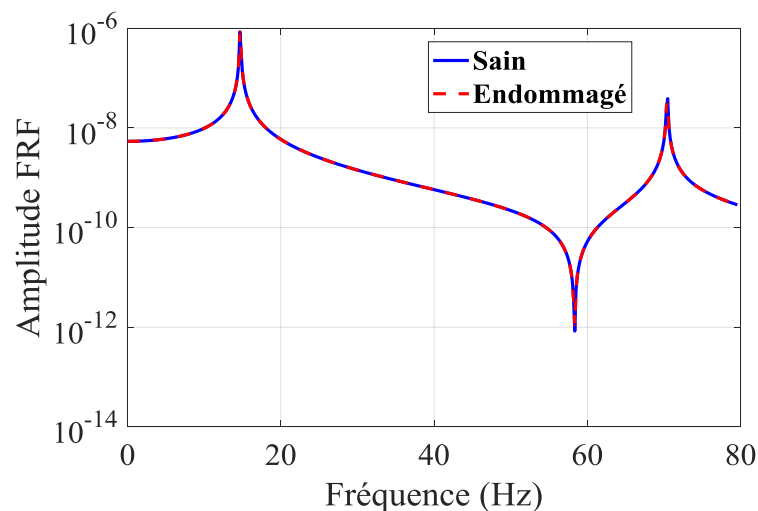


Figure III-14. Variations d'amplitude FRF pour une structure 3D (élément 53) sain et endommagée

En conclusion, cette figure suggère que l'endommagement considéré dans ce cas a un impact minimal, voire indétectable, sur les fréquences de résonance et la forme des FRF de la structure. Les courbes "Sain" et "Endommagé" sont presque parfaitement superposées, ce qui pourrait indiquer soit un endommagement très léger, soit un type d'endommagement qui n'affecte pas significativement les modes vibratoires dominants de la structure dans la plage de fréquences analysée. Pour détecter un tel endommagement, des méthodes d'analyse plus sensibles ou des observateurs spécifiques aux très faibles variations de la FRF seraient nécessaires.

III.7 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons utilisé la méthode de fonction réponse fréquentielle basée sur les fréquences propres, des formes modales comme indicateurs clés de l'état structural, pour déterminer l'emplacement d'endommagement dans les structures treillis.

Nous avons prouvé la fiabilité et l'efficacité de cette méthode en tant qu'indicateur d'endommagement. La validation de cette approche a été faite, implémentée et calculée grâce à MATLAB, étant donné sa précision et son efficacité dans la détermination des emplacements.

Chapitre IV. Méthode d'Optimisation

IV.1 Introduction

Grâce au développement rapide des avancées scientifiques et technologiques, les techniques d'intelligence artificielle sont devenues tout présent dans la société moderne. L'optimisation est une composante essentielle de l'intelligence artificielle, car elle permet de sélectionner la meilleure solution parmi un ensemble d'options possibles [27]. Idéalement, un problème d'optimisation implique trois éléments fondamentaux : une ou plusieurs fonctions objectives, des variables de conception et des contraintes, et la méthode d'optimisation doit rechercher la solution globale [28].

Avant le développement des algorithmes méta heuristiques (méthode d'optimisation générale), les algorithmes d'optimisation déterministes étaient la seule option pour résoudre le problème d'optimisation, ce qui peut éprouver des difficultés à éviter l'optimum local lors de la résolution de problèmes d'optimisation hautement non linéaires sans recours à l'aléatoire.

De plus, les informations de gradient concernant les objectifs et les contraintes sont fréquemment utilisées dans les algorithmes d'optimisation déterministes, ce qui peut s'avérer problématique pour la résolution de problèmes d'optimisation complexes du monde réel. Inspirés par les comportements naturels, les algorithmes méta heuristiques, en tant que méthode d'optimisation s'appuyant sur des procédures stochastiques, sont devenus populaires auprès des communautés d'optimisation en raison de leurs nombreux avantages : mécanismes basés sur la population avec diverses solutions candidates, simplicité d'utilisation, grande flexibilité, absence d'informations de gradient, processus boîte noire avec entrées et sorties uniquement. Ainsi, les algorithmes méta heuristiques sont particulièrement adaptés aux problèmes d'optimisation tels que la sélection de caractéristiques [29], l'ordonnancement, et la conception mécanique.

IV.2 Algorithme d'Optimisation par Étoile de Mer _Starfish optimization algorithm (SFOA) _

L'algorithme d'optimisation des étoiles de mer (SFOA) est un nouvel algorithme méta heuristique bio-inspiré conçu pour résoudre des problèmes d'optimisation globale. Il s'agit d'une technique d'optimisation aléatoire inspirée du comportement des étoiles de mer. Cette technique s'inspire du comportement naturel des étoiles de mer, par exemple leur façon de découvrir, de suivre leurs proies et de repousser. Ces comportements ont été définis mathématiquement pour la première fois par les auteurs afin d'optimiser les problèmes.

IV.2.1 Phase d'initialisation

Lors de l'initialisation de SFOA, les positions des étoiles de mer sont créées aléatoirement entre des variables limites de conception pouvant être écrites sous forme de matrice :

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1D} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2D} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{N1} & X_{N2} & \cdots & X_{ND} \end{bmatrix}_{N \times D} \quad (4.1)$$

Où X est la matrice contenant les positions des étoiles de mer de taille N×D, N est la taille de la population et D est la dimension des variables de conception. Lors de la phase d'initialisation, la position de l'étoile de mer dans l'équation (4.1) est calculée comme suit :

$$X_{ij} = l_j + r(u_j - l_j), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, D \quad (4.2)$$

Où X_{ij} est la position de la i ème étoile de mer dans la j -dimension, r est un nombre aléatoire dans $(0, 1)$, et l_j , u_j sont respectivement les bornes inférieure

et supérieure des variables de conception dans la j -dimension. Après avoir généré la matrice de positions initialisée, nous pouvons obtenir les valeurs de fitness de toutes les étoiles de mer en évaluant la fonction objectif, qui peut également être stockée sous forme de vecteur :

$$F = \begin{bmatrix} F(X_1) \\ F(X_2) \\ \vdots \\ F(X_N) \end{bmatrix} N \times 1 \quad (4.3)$$

Où F est la matrice de stockage et de mise à jour des valeurs d'aptitude obtenues, de taille $N \times 1$. Après l'initialisation, SFOA passe à la boucle principale et démarre les phases d'exploration et d'exploitation.

IV.2.2 Phase Exploration

Pour imiter la capacité d'exploration de recherche des étoiles de mer, nous avons fixé la période d'exploration dans l'algorithme SFOA, imitant ainsi la capacité de recherche à cinq bras d'une étoile de mer, avec des yeux intégrés à l'extrémité des bras, comme illustré à la figure (). La période d'exploration de SFOA présente un nouveau modèle de recherche combinant le modèle de recherche à cinq dimensions pour $D > 5$ et le modèle de recherche unidimensionnel pour $D \leq 5$ dans plusieurs problèmes d'optimisation.

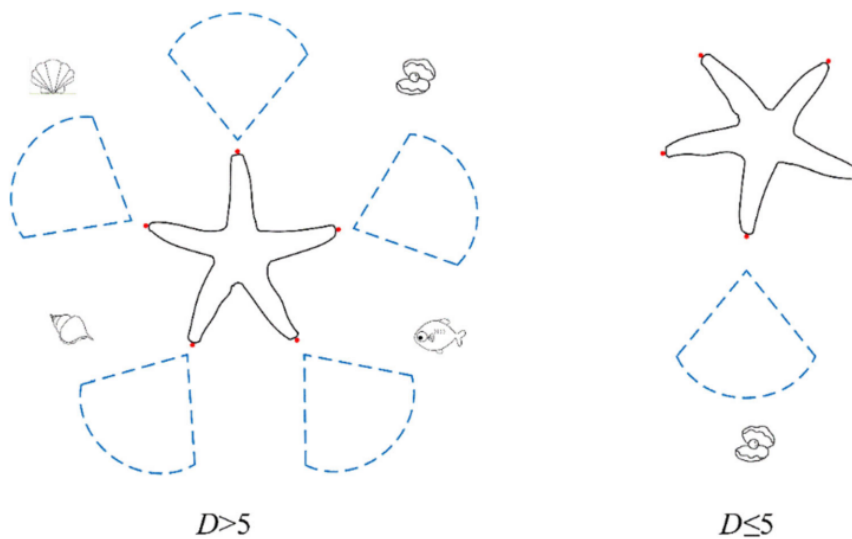


Figure IV-1. Phase Exploration

Si la taille du problème d'optimisation est supérieure à 5 ($D > 5$), l'espace du problème est très vaste et l'étoile de mer doit déplacer ses cinq bras pour explorer le monde environnant. De plus, les bras de l'étoile de mer doivent connaître la position optimale parmi les agents de recherche pour orienter leur mouvement. Ainsi, nous définissons le modèle mathématique pour cette phase,

$$\begin{cases} Y_{i,p}^T = X_{i,p}^T + a_1(X_{best,p}^T - X_{i,p}^T) \cos \theta, & r \leq 0.5 \\ Y_{i,p}^T = X_{i,p}^T - a_1(X_{best,p}^T - X_{i,p}^T) \sin \theta, & r > 0.5 \end{cases} \quad (4.5)$$

où $Y_{i,p}^T$ et $X_{i,p}^T$ sont respectivement les positions actuelle et atteinte d'une étoile de mer. $X_{best,p}^T$ Est la p dimension de la meilleure position actuelle, p est cinq dimensions choisies aléatoirement parmi D dimensions, $r \in (0,1)$. a_1 et θ sont calculés comme suit :

$$a_1 = (2r - 1)\pi \quad (4.6)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{T}{T_{max}} \quad (4.7)$$

Où T est l'itération courante et T_{max} la plus grande itération. Les termes sinus et cosinus symbolisent que les bras des étoiles de mer peuvent tourner à gauche ou à droite afin d'accéder aux aliments avec une chance égale. Pendant le processus d'exploration, a_1 est généré aléatoirement pour mettre à jour la position de chaque candidat et itération, et θ est modifié en fonction du nombre d'itérations, $\theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ où deux paramètres permettent d'estimer l'effet de la distance entre la position optimale et la nouvelle position dans la dimension de mise à jour sélectionnée.

Pour $D > 5$ dans un problème d'optimisation, dans l'équation (), le modèle de recherche à cinq dimensions est utilisé pour mettre à jour seulement cinq dimensions de positions afin de garantir la capacité de recherche et d'améliorer l'efficacité de la recherche par rapport au modèle de recherche vectoriel. Ensuite, lorsque la nouvelle position dépasse la limite des variables de conception, les bras ont tendance à se verrouiller dans leur position précédente plutôt que de se déplacer vers la nouvelle.

Ce qui précède s'exprime mathématiquement comme suit :

$$X_{i,p}^{T+1} = \begin{cases} Y_{i,p}^T & l_{b,p} \leq Y_{i,p}^T \leq u_{b,p} \\ X_{i,p}^T & otherwise \end{cases} \quad (4.8)$$

Où p est la dimension révisée, $l_{b,p}$ et $u_{b,p}$ sont respectivement les bornes des variables de conception.

Si la taille du problème d'optimisation n'est pas supérieure à 5 ($D \leq 5$), la phase d'exploration utilise un modèle de recherche unidimensionnel pour déplacer la position. En utilisant les données de position de l'autre étoile de mer. La nouvelle position peut être trouvée comme suit :

$$Y_{i,p}^T = E_t X_{i,p}^T + A_1(X_{K^1,p}^T - X_{i,p}^T) + A_2(X_{K^2,p}^T - X_{i,p}^T) \quad (4.9)$$

Où

$X_{K^1,p}^T$ et $X_{K^2,p}^T$ sont des positions p -dimensionnelles de deux étoiles de mer choisies au hasard, c'est-à-dire que A_1 et A_2 sont deux nombres aléatoires compris entre

$(-1, 1)$, p étant le nombre choisi au hasard dans les dimensions D . E_t étant l'énergie de l'étoile de mer, calculée comme suit :

$$E_t = \frac{T_{max}-T}{T_{max}} \cos \theta \quad (4.10)$$

Où θ calcul avec l'équation (4.10). [29]

IV.2.3 Phase d'Exploitation

Dans SFOA, les comportements de prédation et de régénération sont pris en compte lors de l'étape d'exploitation afin d'obtenir des solutions globales. Deux stratégies de mise à jour sont donc introduites à cette étape. Pour imiter l'étape de prédation des étoiles de mer, SFOA adopte une stratégie de recherche bidirectionnelle parallèle qui doit exploiter les informations des autres étoiles de mer et la meilleure position de la population actuelle. Nous calculons d'abord les cinq distances entre le meilleur emplacement et les autres étoiles de mer, puis sélectionnons aléatoirement deux distances comme référence pour mettre à jour la position de chaque étoile de mer, en appliquant la méthode de recherche bidirectionnelle parallèle. Les distances sont calculées comme suit :

$$d_m = (X_{best}^T - X_{m_p}^T), \quad m = 1, \dots, 5 \quad (4.11)$$

Où d_m sont cinq distances apprises entre la meilleure étoile de mer globale et les autres, et m_p sont cinq étoiles de mer sélectionnées au hasard.

Par conséquent, la règle de mise à jour de chaque étoile de mer en comportement de prédation est représentée par :

$$Y_i^T = X_i^T + r_1 d_{m_1} + r_2 d_{m_2} \quad (4.12)$$

Où r_1 et r_2 sont des nombres aléatoires compris entre (0, 1), et d_{m_1} et d_{m_2} sont sélectionnés aléatoirement dans d_m . Le mode de prédation des étoiles de mer est illustré à la figure 4. Selon le mécanisme de recherche bidirectionnelle parallèle, les étoiles de mer candidates se dirigent vers une solution de guidage optimale, tandis que les autres candidates reculent au cours de la même itération.

Les candidates ont donc une capacité égale à échapper aux optima locaux.

De plus, les étoiles de mer présentent une faiblesse face aux autres prédateurs lors de la prédation, car elles se déplacent lentement. Lorsqu'un prédateur capture une étoile de mer, celle-ci peut se couper et perdre un bras pour échapper à la prise. Ainsi, la phase de régénération de SFOA n'est utilisée que chez la dernière étoile de mer de la population ($i = N$). Comme cette phase de régénération dure quelques mois, la vitesse de déplacement de l'étoile de mer est très lente. Nous simulons donc la règle de mise à jour lors de la phase de régénération, et la position est mise à jour par :

$$Y_i^T = \exp(-T \times N / T_{max}) X_i^T \quad (4.13)$$

où T est le nombre d'itérations, T_{max} le plus grand nombre itératif et N la taille de la population. Si la position de l'équation (11) ou (12) dépasse les limites des variables de conception, nous pouvons lui attribuer la valeur suivante :

$$X_i^{T+1} = \begin{cases} Y_i^T & l_b \leq Y_i^T \leq u_b \\ l_b & Y_i^T < l_b \\ u_b & Y_i^T > u_b \end{cases} \quad (4.14)$$

La phase de régénération est décrite dans la figure ().

Bien que la phase de régénération ne comporte qu'un nombre limité d'évaluations de fonctions (calculées une seule fois à chaque itération lors de la phase d'exploitation), il est nécessaire d'éviter les solutions locales et de permettre la convergence mondiale. [30]

IV.3 Algorithme de L'optimiseur de renard de Rüppell _Ruppell's Fox Optimizer (RFO) _

L'optimiseur de renard de Rüppell (RFO) est un algorithme d'optimisation inspirée des renards coopératifs de Rüppell. Mathématiquement, l'optimiseur simule certaines des principales activités de recherche de ces renards en utilisant leur vision fine, leur ouïe et leur odorat pour poursuivre leurs proies et ainsi équilibrer les phases d'exploration et d'exploitation tout en optimisant. La rotation du globe oculaire du renard sur son champ de vision d'environ 260 degrés et la rotation de son oreille sur son champ d'audition d'environ 150 degrés améliorent la détection des meilleures solutions dans l'espace de recherche.

Plus précisément, le RFO est un algorithme d'essaim qui utilise ces caractéristiques de capteurs pour guider la recherche globale, ce qui le rend idéal pour résoudre des problèmes d'optimisation globale complexes. L'optimisation implique le classement des individus selon leur fitness, le choix du renard le plus adapté et la redistribution des individus dans l'espace de recherche selon des équations spécifiques reproduisant leur environnement naturel.

IV.3.1 Phase d'initialisation :

L'algorithme commence par créer une population initiale de renards (solutions candidates), répartis aléatoirement dans l'espace de recherche multidimensionnel. Cette diversité initiale est essentielle pour couvrir un large spectre de solutions possibles et éviter les biais initiaux.

La matrice de positions initiales es donnée comme suite :

$$X^{(0)} = \begin{bmatrix} x_{1,1}^{(0)} & x_{1,2}^{(0)} & \cdots & x_{1,D}^{(0)} \\ x_{2,1}^{(0)} & x_{2,2}^{(0)} & \cdots & x_{2,D}^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1}^{(0)} & x_{N,2}^{(0)} & \cdots & x_{N,D}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Ou N est le nombre de renards, D la dimension du problème, et $x_{i,j}^{(0)}$ la coordonnée j du renard a l'itération initiale.

IV.3.2 Phase d'Exploration

Inspirée par la rotation des yeux du renard (champ de vision $\sim 260^\circ$), cette phase vise à parcourir largement l'espace de recherche. Les renards effectuent des déplacements importants et

diversifiés pour découvrir de nouvelles zones prometteuses, entraînant ainsi la stagnation dans des minima locaux.

Mise à jour des positions par exploration écrit sous la forme :

$$X^{(t+1)} = X^{(t)} + \alpha V_{vue}^{(t)} \quad (4.16)$$

Avec

$$V_{vue}^{(t)} = \begin{bmatrix} v_{1,1}^{vue} & v_{1,2}^{vue} & \dots & v_{1,D}^{vue} \\ v_{2,1}^{vue} & v_{2,2}^{vue} & \dots & v_{2,D}^{vue} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{N,1}^{vue} & v_{N,2}^{vue} & \dots & v_{N,D}^{vue} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Où chaque vecteur $v_{i,j}^{vue}$ est génère pour favorise une exploration large et aléatoire.

IV.3.3 Phase d'exploitation

Cette phase imite la rotation des oreilles du renard (environ 150°) et de son odorat, permettant un affinement local autour des meilleures solutions découvertes. Les mouvements deviennent plus localisés, améliorant la qualité des solutions dans les zones prometteuses

Mise à jour des positions par exploitation :

$$X^{(t+1)} = X^{(t)} + \beta V_{ouïe}^{(t)} + \gamma V_{odorat}^{(t)} + \epsilon^{(t)} \quad (4.18)$$

Avec

$$V_{ouïe}^{(t)} = \begin{bmatrix} v_{1,1}^{ouïe} & v_{1,2}^{ouïe} & \dots & v_{1,D}^{ouïe} \\ v_{2,1}^{ouïe} & v_{2,2}^{ouïe} & \dots & v_{2,D}^{ouïe} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{N,1}^{ouïe} & v_{N,2}^{ouïe} & \dots & v_{N,D}^{ouïe} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$V_{odorat}^{(t)} = \begin{bmatrix} v_{1,1}^{odorat} & v_{1,2}^{odorat} & \dots & v_{1,D}^{odorat} \\ v_{2,1}^{odorat} & v_{2,2}^{odorat} & \dots & v_{2,D}^{odorat} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{N,1}^{odorat} & v_{N,2}^{odorat} & \dots & v_{N,D}^{odorat} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Et $\epsilon^{(t)}$ est un terme aléatoire (bruit) pour maintenir la diversité et éviter la convergence prématurée

IV.3.4 Mise à jour complète

La position de chaque renard à l'itération $t + 1$ est donc mise a jour en combinant ces trois composantes :

$$X^{(t+1)} = X^{(t)} + \alpha V_{vue}^{(t)} + \beta V_{ouïe}^{(t)} + \gamma V_{odorat}^{(t)} + \epsilon^{(t)} \quad (4.21)$$

Où α, β, γ sont des coefficients adaptatifs équilibrant exploration et exploitation. [31]

IV.4 Conclusion

Dans ce Chapitre on a exploré les méthodes d'optimisation, soulignant l'évolution des algorithmes déterministes vers les méta heuristiques bio-inspirées, plus aptes à résoudre les problèmes non linéaires et complexes du monde réel en évitant les optima locaux. Deux algorithmes sont détaillés : l'Algorithme d'Optimisation par Étoile de Mer (SFOA) et l'Optimiseur de Renard de Rüppell (RFO). Le SFOA, inspiré du comportement des étoiles de mer, utilise des phases d'initialisation, d'exploration (avec des modèles de recherche à cinq dimensions ou unidimensionnels selon la complexité du problème) et d'exploitation (intégrant prédation et régénération) pour trouver des solutions globales. Le RFO, quant à lui, s'inspire des renards de Rüppell et de leurs capacités sensorielles (vision, ouïe, odorat) pour équilibrer exploration et exploitation, en initialisant une population de renards et en mettant à jour leurs positions via des phases d'exploration (vision) et d'exploitation (ouïe et odorat), avec des coefficients adaptatifs pour optimiser la recherche. Ces approches méta heuristiques offrent une grande flexibilité et ne nécessitent pas d'informations de gradient, les rendant idéales pour divers problèmes d'optimisation.

Chapitre V. RESULTAT ET DISCUSSION

V. Résultats ET Discussion:

En raison de leur importance pratique, le problème d'identification d'endommagements dans les structures a fait l'objet d'une enquête approfondie et de nombreuses méthodes ont été proposées. Dans ce travail la méthode d'indicateur d'endommagement de la Fonction Réponse Fréquentielle (FRF) a été utilisée.

Une fois détecter ces endommagements, deux méthodes d'optimisations sont utilisées pour les quantifier à savoir (RFO et SFOA), les résultats obtenus sont représentés dans des Tableaux ci-dessous. Pour chaque une des méthode d'optimisation nous avons fixé le nombre d'itérations à 100 en variant le nombre de populations de 50 et 200 en premier lieu, ensuite nous avons fixé le nombre de populations à 100 en variant le nombre d'itérations de 50 et 200 en deuxième lieu.

V.1 Treillis 3D

V.1.1 Cas 4 Élément 53

• Cas 4 - Élément 53 - Iter 100 Pop 50 et 200

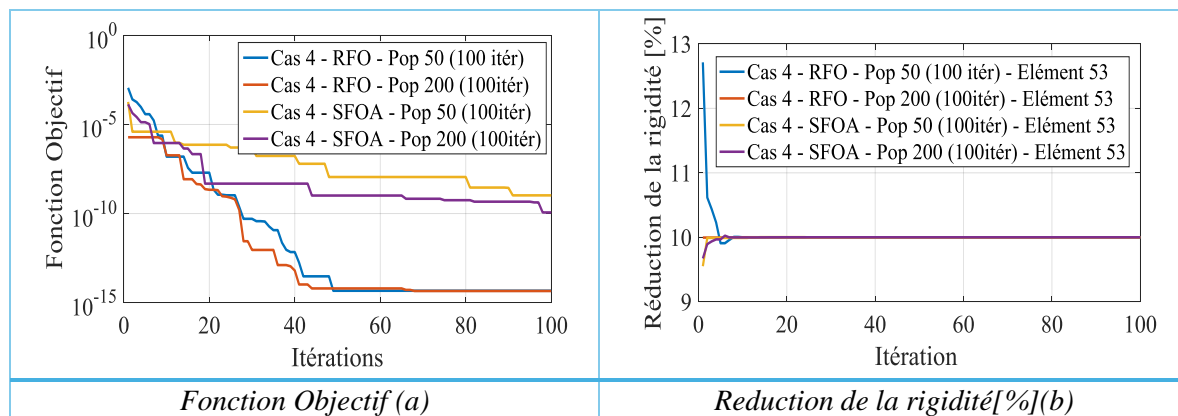


Figure V-1. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 4 (53 éléments)

La figure(V.1.a) représente l'évolution de la valeur de la fonction objectif pour le Cas 4, en comparant deux algorithmes d'optimisation, RFO (en rouge et bleu) et SFOA (en jaune et orange), avec une taille de population de 50 et 200 individus et un nombre maximal de 50 itérations. L'algorithme RFO surpasse le SFOA en termes de capacité de convergence. Dès les premières itérations, les deux algorithmes présentent une performance similaire, atteignant une valeur de fitness de l'ordre de 10^{-6} . Cependant, à partir de la 20ème itération, RFO montre une décroissance plus marquée, traduisant une amélioration progressive et continue de la solution, jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de 10^{-14} , tandis que SFOA stagne autour de 10^{-9} et 10^{-8} à partir de la 40ème itération, indiquant une convergence prématurée vers une solution sous-optimale. La figure(V.1.b) montre l'évolution de la réduction de la rigidité(%) de l'élément 53 pour le cas 4 en fonction du nombre d'itération 100 et de population 50 et 200 individus en comparant ces deux méthodes, on observe que RFO avec une population de 50, atteint une réduction de rigidité maximale avoisinant 12,5%, en particulier SFOA, qui reste constant autour de 10%. Cette performance constante de SFOA traduit un manque d'efficacité en optimisation locale, contrairement à RFO qui démontre une capacité d'exploration plus efficace.

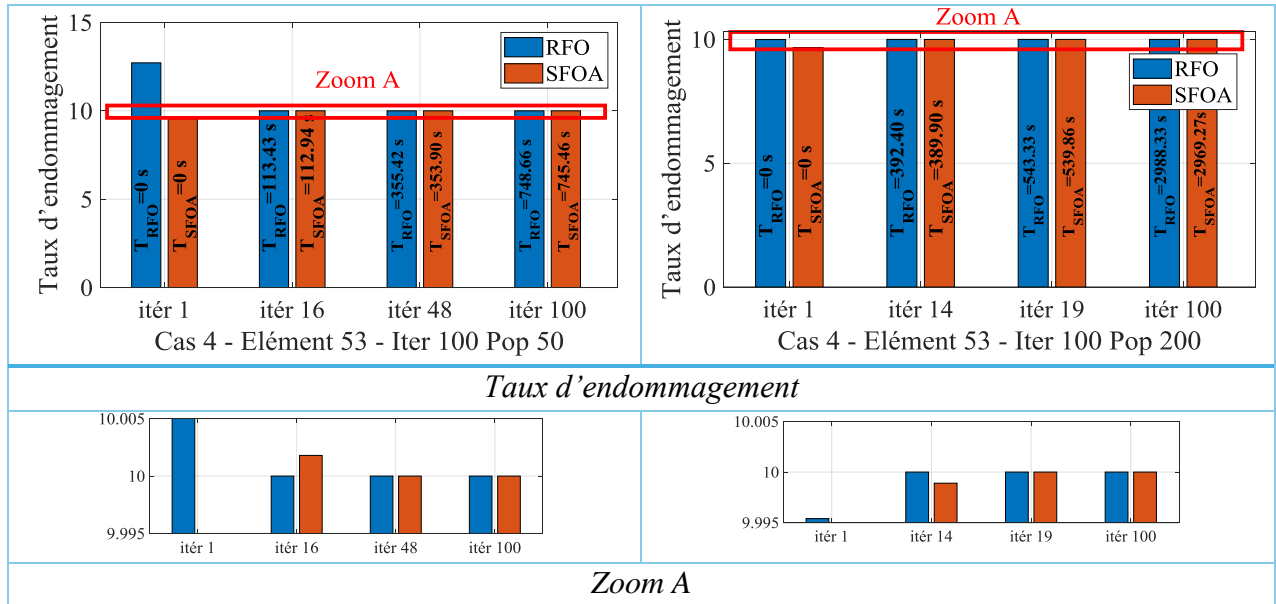


Figure V-2. Taux d'endommagement pour une barre 3D –cas 4- 50 et 200 population et 100 itérations

En premier temps, nous avons fixé le nombre d'itérations à 100 et variant le nombre de populations de 50, 200 (Figure V.2). Il est observé que la méthode RFO manifeste un taux d'endommagement de 10% à la 16ème itération et 50 populations pour l'élément 53 en un temps de (113,43 secondes), et un taux de 10% à la 48ème itération et 50 population avec un temps de (355,42secondes) qui correspondant au taux d'endommagement réel. Puis un taux d'endommagement de 10% à la 14ème itération et 200 populations avec un temps de (392,40secondes), et un taux de 10% à la 19ème itération et 200 population avec un temps de (543,33secondes).

Par contre, la méthode SFOA atteint un taux d'endommagement 10% à la 48ème itération et 50 populations avec un temps de (353,90secondes), et un taux d'endommagement 10% à la 19ème itération et 200 populations avec un temps de (539,86secondes).

• Cas 4 - Élément 53 - Pop 100 Iter 50 et 200

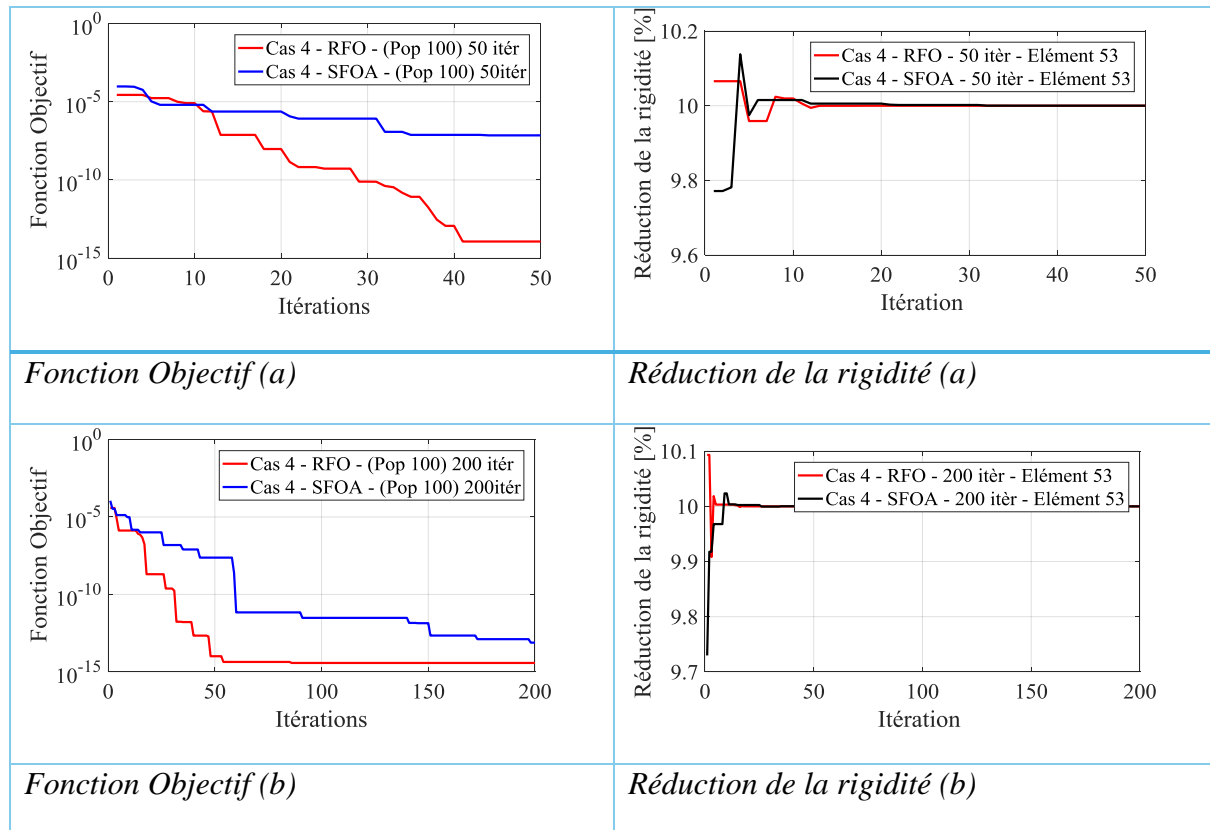


Figure V-3. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 4 (53 éléments)

La figure(V.3.a) représente l'évolution de la valeur de la fonction objectif pour le Cas 4, en comparant deux algorithmes d'optimisation, RFO (en rouge) et SFOA (en bleu), avec une taille de population fixe de 100 individus et un nombre maximal de 50 itérations. L'algorithme RFO surpasse le SFOA en termes de capacité de convergence. Dès les premières itérations, les deux algorithmes présentent une performance similaire, atteignant une valeur de fitness de l'ordre de 10^{-5} . Cependant, à partir de la 10ème itération, RFO montre une décroissance plus marquée, traduisant une amélioration progressive et continue de la solution, jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de 10^{-14} , tandis que SFOA stagne autour de 10^{-7} à partir de la 20ème itération, indiquant une convergence prématurée vers une solution sous-optimale. La figure(V.3.a) montre l'évolution de la réduction de la rigidité(%) de l'élément 53 pour le cas 4 en fonction du nombre d'itération 50 et de population fixe de 100 individus en comparant ces deux méthodes, on observe que les deux algorithmes présentent une phase initiale instable, en particulier SFOA, qui montre une fluctuation marquée dans les dix premières itérations. Par la suite, les deux courbes se stabilisent progressivement autour de 10% de réduction, avec une convergence légèrement plus régulière pour RFO.

La figure(V.3.b) représente l'évolution de la valeur de la fonction objectif pour le Cas 4, en comparant deux algorithmes d'optimisation, RFO (en rouge) et SFOA (en bleu), avec une taille de population fixe de 100 individus et un nombre maximal de 200 itérations. L'algorithme RFO surpasse le SFOA en termes de capacité de convergence. Dès les premières itérations, les deux

algorithmes, atteignant une valeur de fitness de l'ordre de 10^{-5} . Cependant, à partir de la 10ème itération, RFO montre une décroissance plus marquée, traduisant une amélioration progressive et continue de la solution, jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de 10^{-1} , tandis que SFOA stagne autour de 10^{-12} à partir de la 60ème itération, indiquant une convergence prématurée vers une solution sous-optimale. La figure(V.3.b) montre l'évolution de la réduction de la rigidité(%) de l'élément 53 pour le cas 4 en fonction du nombre d'itération 200 et de population fixe de 100 individus en comparant ces deux méthodes, on observe que les deux algorithmes présentent une phase initiale instable, en particulier SFOA, qui montre une fluctuation marquée dans les premières itérations. Par la suite, les deux courbes se stabilisent progressivement autour de 10% de réduction, avec une convergence légèrement plus régulière pour RFO.

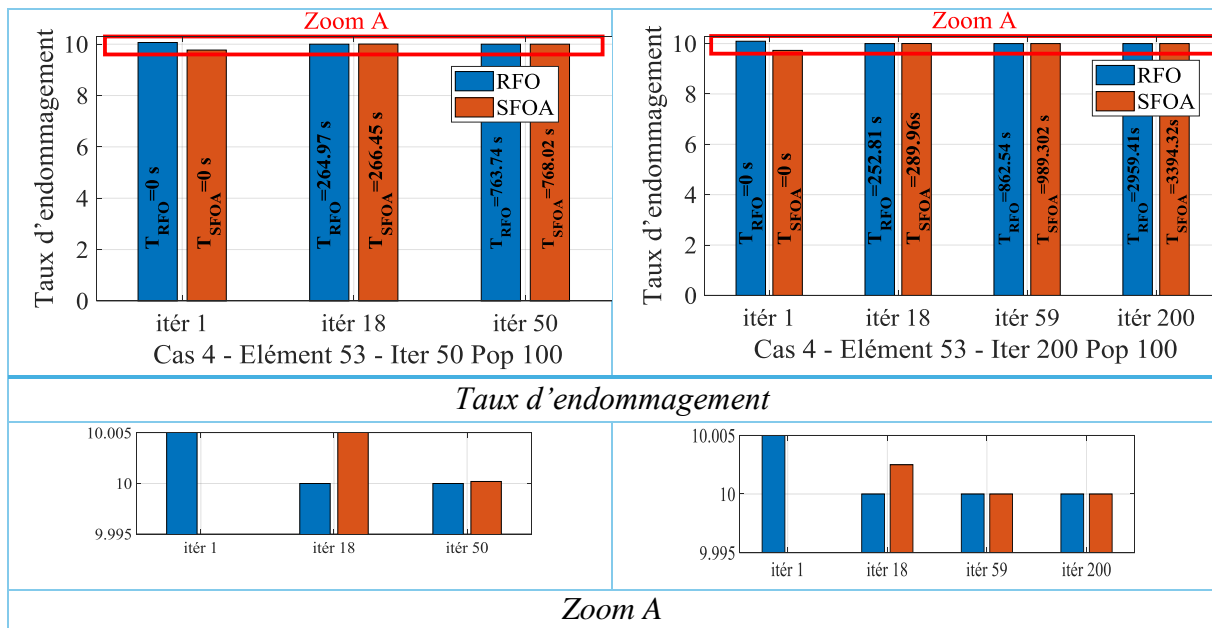


Figure V-4. Taux d'endommagement pour une barre 3D –cas 4- 100 population et 50,200 itération

Dans un second temps, en maintenant le nombre de populations à 100 et en variant le nombre d'itérations à 50, 200, les résultats (Figure V.4.c) révèlent que la méthode RFO manifeste pour l'élément 53 un taux d'endommagement de 10% à la 18ème itération pour 50 itérations en un temps de (264,97secondes), correspondant au taux d'endommagement réel. Puis un taux d'endommagement de 10% à la 18ème itération pour 200 itérations avec un temps de (252,81secondes), et un taux de 10% à la 59ème itération et 200 population avec un temps de (862,54secondes)

Par contre, la méthode SFOA atteint un taux d'endommagement de 10% à la 50ème itération pour 50 itérations en un temps de (768,02secondes), correspondant au taux d'endommagement réel. Puis un taux d'endommagement de 10% à la 59ème itération pour 200 itérations avec un temps de (989,302secondes).

V.1.2 Cas 3 Elément 6

• Cas 3 élément 6 itérations 100, populations 50 et 200

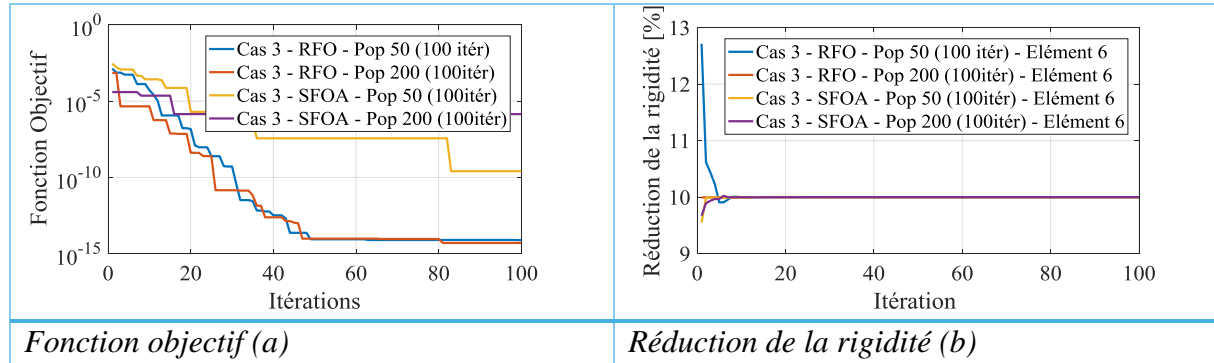


Figure V-5. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 3 (6 éléments)

La figure(V.5.a) représente l'évolution de la valeur de la fonction objectif pour le Cas 3, en comparant deux algorithmes d'optimisation, RFO (en rouge et bleu) et SFOA (en jaune et orange), avec une taille de population de 50 et 200 individus et un nombre maximal de 100 itérations. L'algorithme RFO surpasse le SFOA en termes de capacité de convergence. Dès les premières itérations, les deux algorithmes présentent une performance similaire, atteignant une valeur de fitness de l'ordre de 10^{-7} . Cependant, à partir de la 20ème itération, RFO montre une décroissance plus marquée, traduisant une amélioration progressive et continue de la solution, jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de 10^{-14} , tandis que SFOA stagne autour de 10^{-7} et 10^{-6} à partir de la 40ème itération, indiquant une convergence prématurée vers une solution sous-optimale. La figure(V.5.c) montre l'évolution de la réduction de la rigidité(%) de l'élément 6 pour le cas 3 en fonction du nombre d'itération 100 et de population 50 et 200 individus en comparant ces deux méthodes, on observe que RFO avec une population de 50, atteint une réduction de rigidité maximale avoisinant 12,5%, en particulier SFOA, qui reste constant autour de 10%. Cette performance constante de SFOA traduit un manque d'efficacité en optimisation locale, contrairement à RFO qui démontre une capacité d'exploration plus efficace.

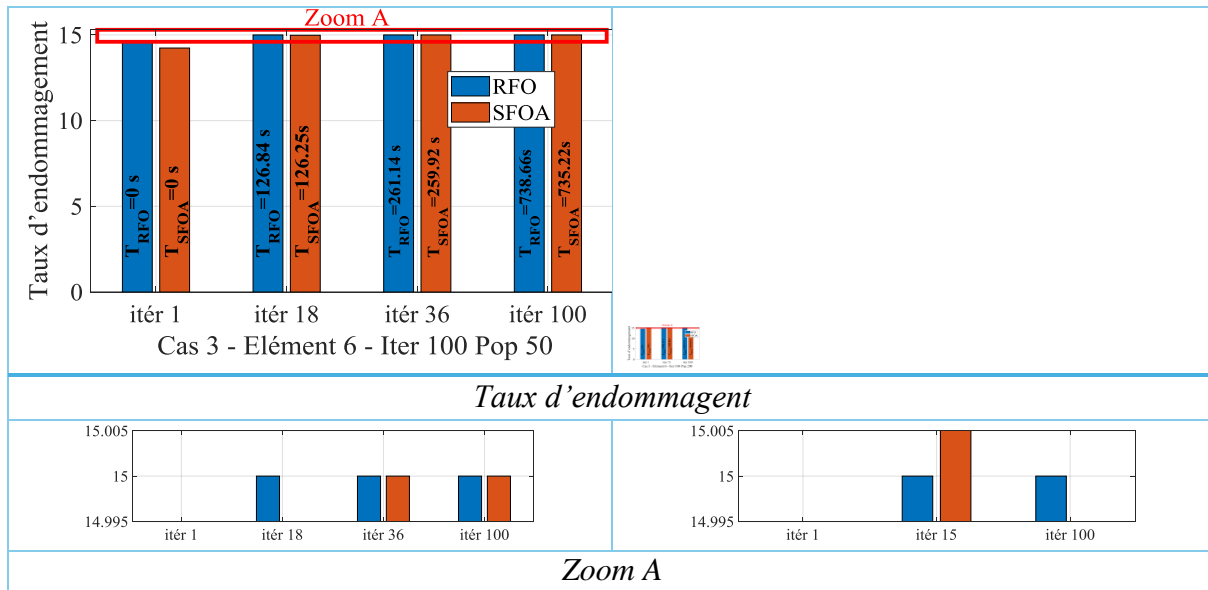


Figure V-6. Taux d'endommagement pour une barre 3D –cas 3- 50 et 200 population et 100 itérations

Dans ce cas, premièrement, nous avons fixé le nombre d'itérations à 100 et variant le nombre de populations de 50 et 200 (Figure V.6). Il est observé que la méthode RFO manifeste un taux d'endommagement de 15% à la 18ème itération et 50 populations pour l'élément 6 en un temps de (126,84 secondes), correspondant au taux d'endommagement réel. Puis un taux d'endommagement de 15% à la 15ème itération et 200 populations avec un temps de 592,13secondes).

Par contre, la méthode SFOA atteint un taux d'endommagement 15% à la 36ème itération et 50 populations avec un temps de (259,92secondes), À l'itération 100, le taux d'endommagement dépasse le seuil de référence (fixé à 10 %). Cette surélévation indique que la méthode n'a pas encore convergé efficacement vers la solution optimale.

• Cas 3 élément 6 itérations 50, populations 100

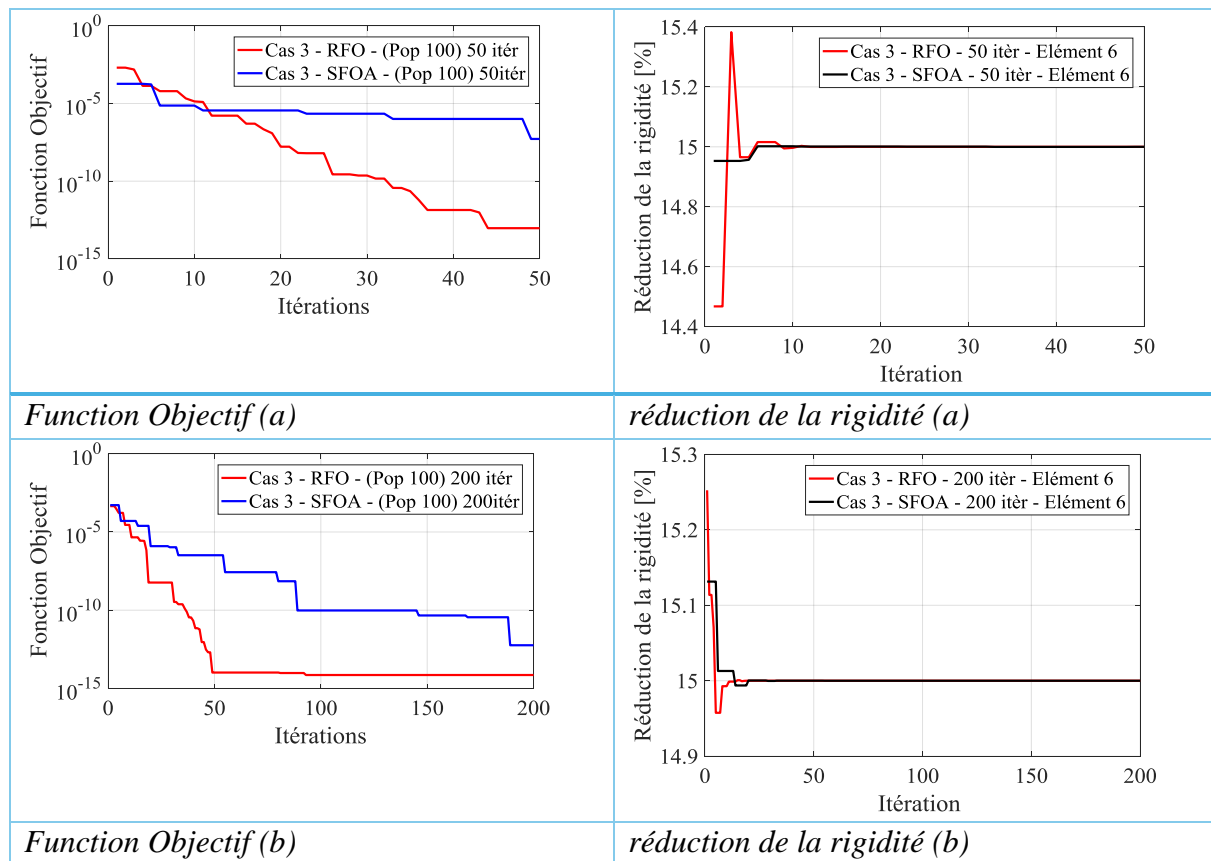


Figure V-7. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 3 (6 éléments)

La figure(V.7.a) représente l'évolution de la valeur de la fonction objectif pour le Cas 3, en comparant deux algorithmes d'optimisation, RFO (en rouge) et SFOA (en bleu), avec une taille de population fixe de 100 individus et un nombre de 50 itérations. L'algorithme RFO surpasse le SFOA en termes de capacité de convergence. Dès les premières itérations, les deux algorithmes présentent une performance similaire, atteignant une valeur de fitness de l'ordre de 10^{-6} . Cependant, à partir de la 10ème itération, RFO montre une décroissance plus marquée, jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de 10^{-14} , tandis que SFOA stagne autour de 10^{-10} à partir de la 80ème itération, indiquant une convergence prématurée vers une solution sous-optimale.

La figure(V.7.a) montre l'évolution de la réduction de la rigidité(%) de l'élément 6 pour le cas 3 en fonction du nombre d'itération 50 et de population fixe de 100 individus en comparant ces deux méthodes, on observe que les deux algorithmes présentent une phase initiale instable, en particulier SFOA, qui montre une fluctuation marquée dans les dix premières itérations. Par la suite, les deux courbes se stabilisent progressivement autour de 15% de réduction, avec une convergence légèrement plus régulière pour RFO.

La figure(V.7.b) représente l'évolution de la valeur de la fonction objectif pour le Cas 3, en comparant deux algorithmes d'optimisation, RFO (en rouge) et SFOA (en bleu), avec une taille

de population fixe de 100 individus et un nombre maximal de 200 itérations. L’algorithme RFO surpasse le SFOA en termes de capacité de convergence. Dès les premières itérations, les deux algorithmes, atteignant une valeur de fitness de l’ordre de 10^{-6} . Cependant, à partir de la 10ème itération, RFO montre une décroissance plus marquée, traduisant une amélioration progressive et continue de la solution, jusqu’à atteindre des valeurs de l’ordre de 10^{-14} , tandis que SFOA stagne autour de 10^{-10} à partir de la 90ème itération, indiquant une convergence prématurée vers une solution sous-optimale. La figure(V.7.b) montre l’évolution de la réduction de la rigidité(%) de l’élément 6 pour le cas 3 en fonction du nombre d’itération 200 et de population fixe de 100 individus en comparant ces deux méthodes, on observe que les deux algorithmes présentent une phase initiale instable, en particulier SFOA, qui montre une fluctuation marquée dans les premières itérations. Par la suite, les deux courbes se stabilisent progressivement autour de 15% de réduction, avec une convergence légèrement plus régulière pour RFO.

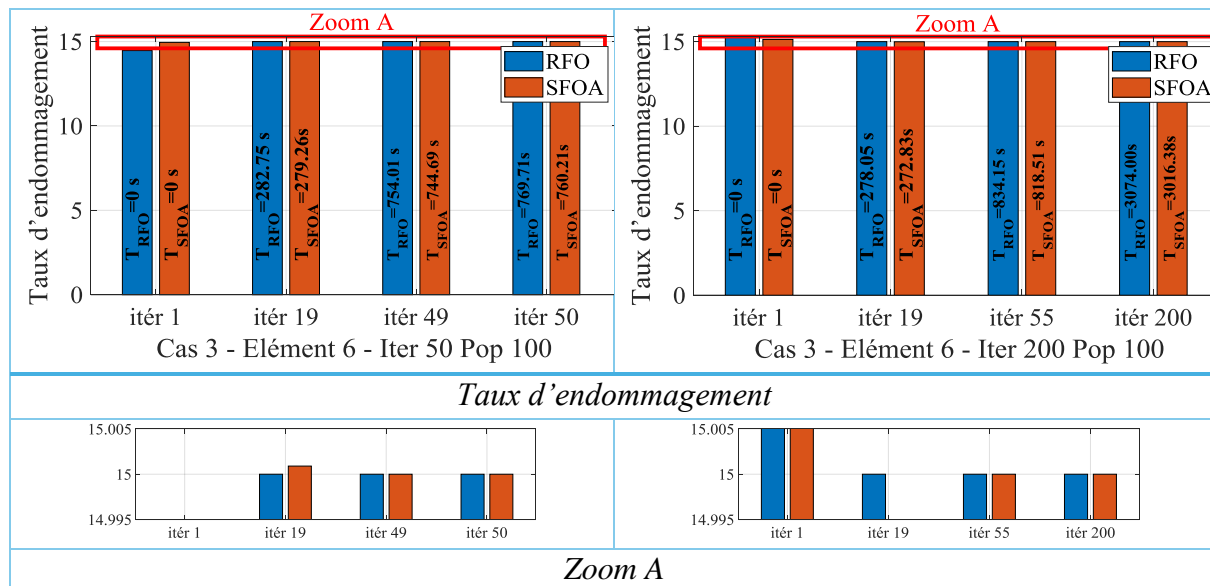


Figure V-8. Taux d'endommagement pour une barre 3D –cas 3- 50 et 200 itérations et 100 populations.

Dans ce cas, en maintenant le nombre de populations à 100 et en variant le nombre d’itérations à 50 et 200, les résultats (Figure V.8.c) révèlent que la méthode RFO manifeste pour l’élément 6 un taux d’endommagement de 15% à la 19ème itération pour 50 itérations en un temps de (282,75secondes), correspondant au taux d’endommagement réel. Puis un taux d’endommagement de 15% à la 19ème itération pour 200 itérations avec un temps de (278,05secondes). et un taux de 15% à la 49ème itération et 50 population avec un temps de (754,01secondes).

Par contre, la méthode SFOA atteint un taux d’endommagement de 15% à la 49ème itération pour 50 itérations en un temps de (749,69secondes), correspondant au taux d’endommagement réel. Puis un taux d’endommagement de 15% à la 55ème itération pour 200 itérations avec un temps de (818,51secondes).

V.2 Treillis 2D

V.2.1 Cas 2 Elément 40

• Cas 2 élément 40 itérations 100, populations 50

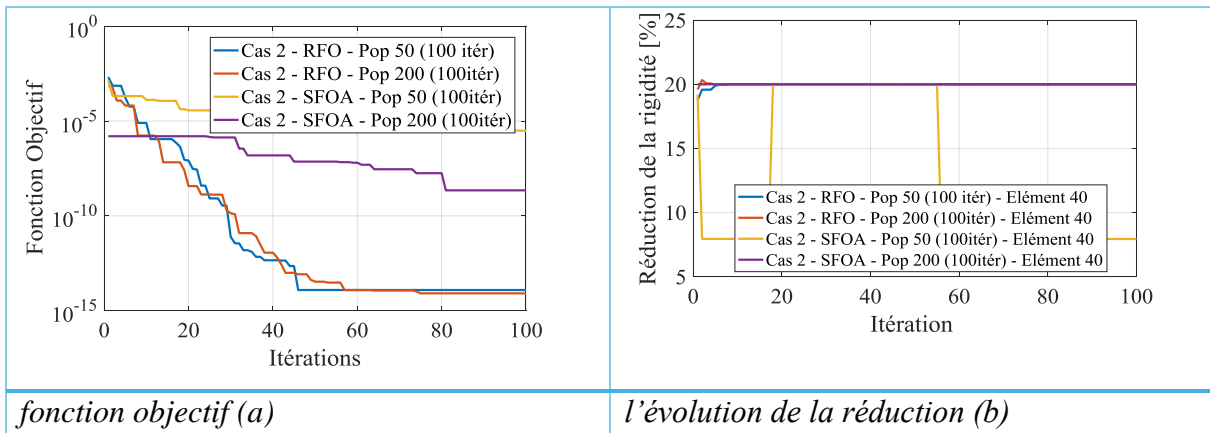


Figure V-9. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 2 (40 éléments)

La figure(V.9.a) représente l'évolution de la valeur de la fonction objectif pour le Cas 2, en comparant deux algorithmes d'optimisation, RFO (en rouge et bleu) et SFOA (en jaune et orange), avec une taille de population de 50 et 200 individus et un nombre maximal de 100 itérations. L'algorithme RFO surpasse le SFOA en termes de capacité de convergence. Dès les premières itérations, les deux algorithmes présentent une performance similaire, atteignant une valeur de fitness de l'ordre de 10^{-7} . Cependant, à partir de la 15ème itération, RFO montre une décroissance plus marquée, traduisant une amélioration progressive et continue de la solution, jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de 10^{-14} , tandis que SFOA stagne autour de 10^{-9} et 10^{-7} à partir de la 30ème itération, indiquant une convergence prématurée vers une solution sous-optimale. La figure(V.9.b) montre l'évolution de la réduction de la rigidité(%) de l'élément 53 pour le cas 4 en fonction du nombre d'itération 100 et de population 50 et 200 individus en comparant ces deux méthodes, on observe que RFO avec une population de 50, atteint une réduction de rigidité maximale avoisinant 12,5%, en particulier SFOA, qui reste constant autour de 10%. Cette performance constante de SFOA traduit un manque d'efficacité en optimisation locale, contrairement à RFO qui démontre une capacité d'exploration plus efficace. CORRIGE

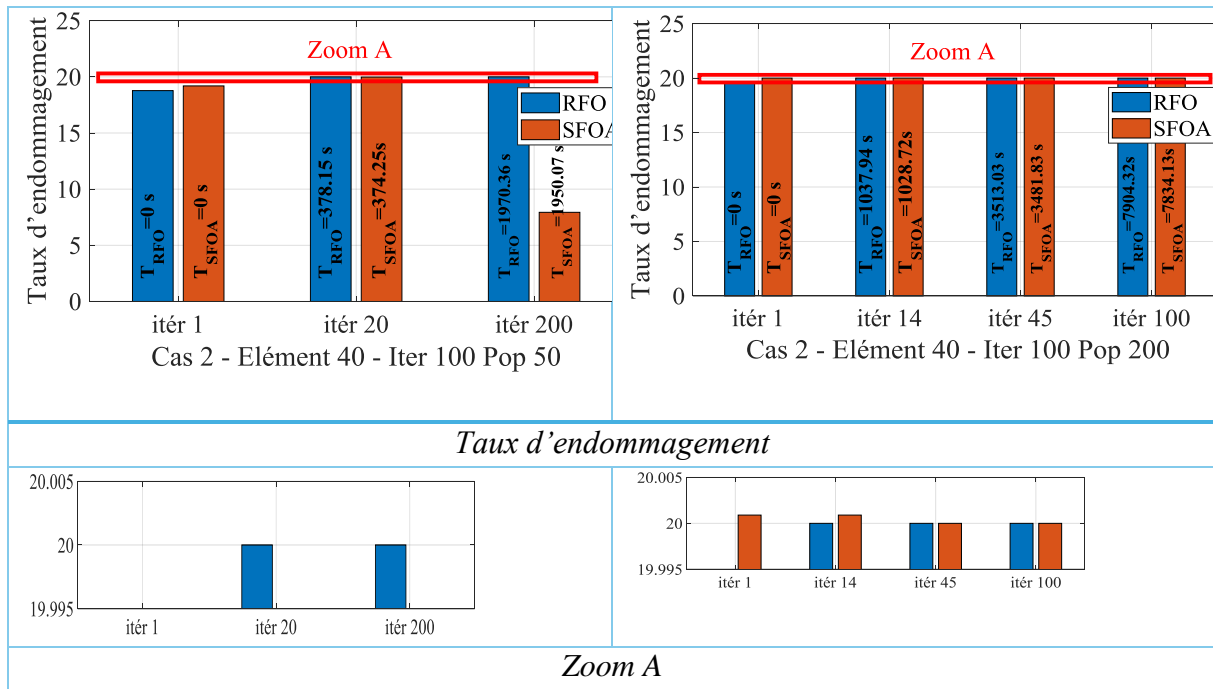


Figure V-10. Taux d'endommagement pour une barre 2D –cas 2- 50 et 200 population et 100 itérations.

Dans ce cas, premièrement, nous avons fixé le nombre d'itérations à 100 et variant le nombre de populations de 50 et 200 (Figure V.10.c). Il est observé que la méthode RFO manifeste un taux d'endommagement de 20% à la 20ème itération et 50 populations pour l'élément 40 en un temps de (378,15 secondes), et un taux de 20% à la 200ème itération et 50 population avec un temps de (1970,36secondes) qui correspondant au taux d'endommagement réel. Puis un taux d'endommagement de 20% à la 14ème itération et 200 populations avec un temps de (1037,94secondes) et un taux de 20% à la 45ème itération et 200 populations avec un temps d'endommagement de (3513,03 secondes).

Par contre, la méthode SFOA atteint un taux d'endommagement 20% à la 45ème itération et 200 populations avec un temps de (3481,83secondes), À l'itération 100 population 50, le taux d'endommagement obtenu par la méthode reste inférieur à la valeur de référence (~20 %), indiquant que la convergence vers la solution optimale n'est pas encore atteinte à ce stade.

• Cas 2 élément 40 itérations 50, populations 100 :

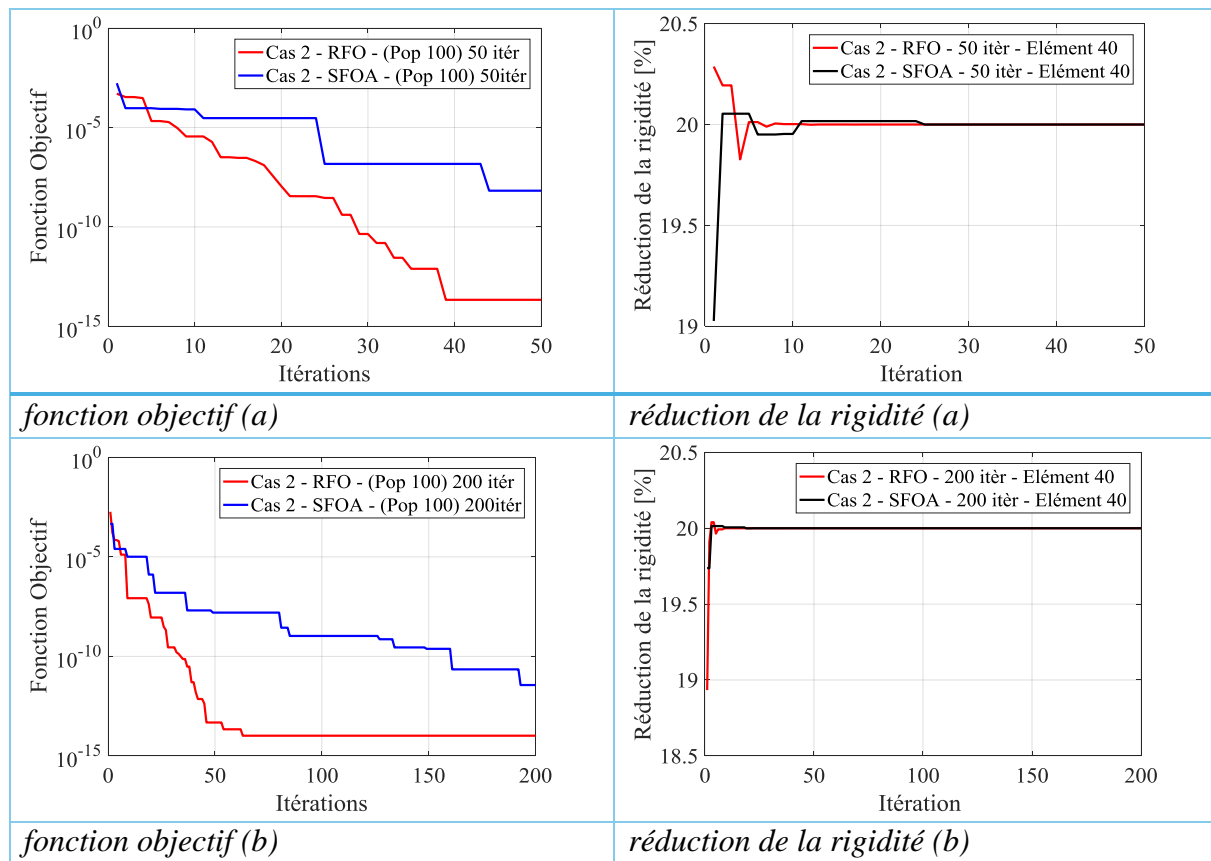


Figure V-11. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 2 (40 éléments)

La figure(V.11.a) représente l'évolution de la valeur de la fonction objectif pour le Cas 2, en comparant deux algorithmes d'optimisation, RFO (en rouge) et SFOA (en bleu), avec une taille de population fixe de 100 individus et un nombre de 50 itérations. L'algorithme RFO surpasse le SFOA en termes de capacité de convergence. Dès les cinq premières itérations, les deux algorithmes présentent une performance similaire, atteignant une valeur de fitness de l'ordre de 10^{-7} . Cependant, à partir de la 5ème itération, RFO montre une décroissance plus marquée, jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de 10^{-14} , tandis que SFOA stagne autour de 10^{-11} et 10^{-7} à partir de la 40ème itération, indiquant une convergence prématurée vers une solution sous-optimale.

La figure(V.11.a) montre l'évolution de la réduction de la rigidité(%) de l'élément 40 pour le cas 2 en fonction du nombre d'itération 200 et de population fixe de 100 individus en comparant ces deux méthodes, on observe que SFOA montre une fluctuation marquée dans les dix premières itérations. Par la suite, les deux courbes se stabilisent progressivement autour de 20% de réduction, avec une convergence légèrement plus régulière pour RFO.

La figure(V.11.b) représente l'évolution de la valeur de la fonction objectif pour le Cas 2, en comparant deux algorithmes d'optimisation, RFO (en rouge) et SFOA (en bleu), avec une taille de population fixe de 100 individus et un nombre maximal de 200 itérations. L'algorithme RFO

surpasse le SFOA en termes de capacité de convergence. Dès les premières itérations, les deux algorithmes, atteignant une valeur de fitness de l'ordre de 10^{-7} . Cependant, à partir de la 4ème itération, RFO montre une décroissance plus marquée, traduisant une amélioration progressive et continue de la solution, jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de 10^{-14} , tandis que SFOA stagne autour de 10^{-11} et 10^{-7} à partir de la 40ème itération, indiquant une convergence prématurée vers une solution sous-optimale, et La figure(V.11.b) montre l'évolution de la réduction de la rigidité(%) de l'élément 40 pour le cas 2 en fonction du nombre d'itération 200 et de population fixe de 100 individus en comparant ces deux méthodes, on observe que les deux algorithmes présentent une phase initiale instable, en particulier SFOA, qui montre une fluctuation marquée dans les premières itérations. Par la suite, les deux courbes se stabilisent progressivement autour de 15% de réduction, avec une convergence légèrement plus régulière pour RFO.

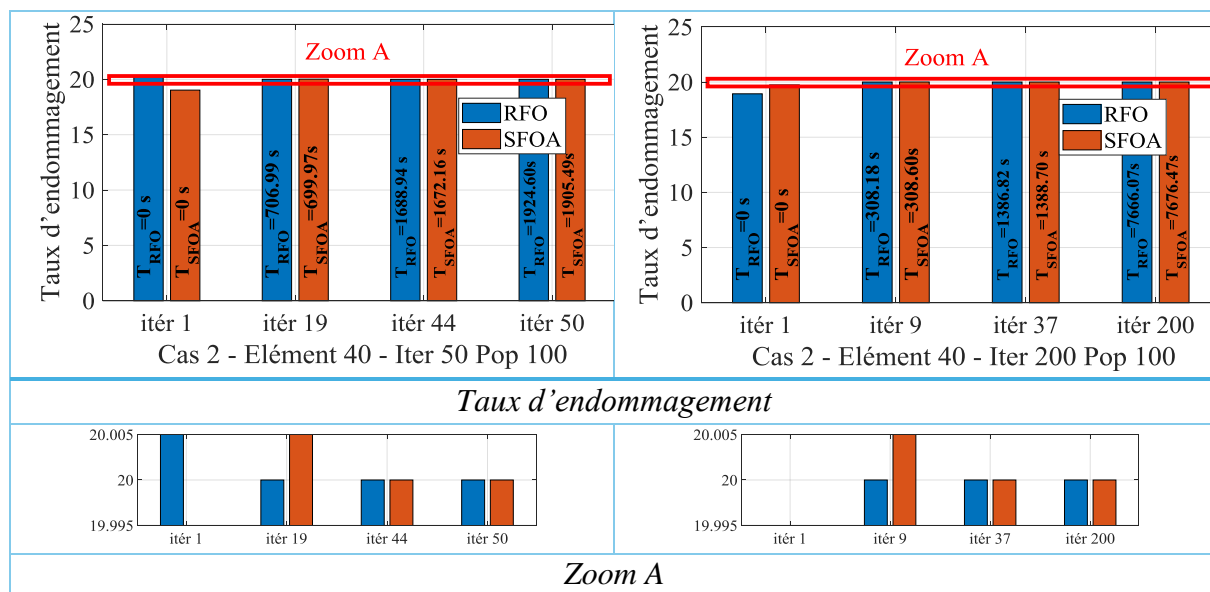


Figure V-12. Taux d'endommagement pour une barre 2D –cas 2- 50 et 200 itération et 100 itération .

Dans ce cas, en maintenant le nombre de populations à 100 et en variant le nombre d'itérations à 50 et 200, les résultats (Figure V.12.c) révèlent que la méthode RFO manifeste pour l'élément 6 un taux d'endommagement de 20% à la 19ème itération pour 50 itérations en un temps de (308,18secondes), et un taux de 20% à l'itération 44ème on a un temps de (1688,94secondes) correspondant au taux d'endommagement réel. Puis un taux d'endommagement de 20% à la 19ème itération pour 200 itérations avec un temps de (278,05secondes).

Par contre, la méthode SFOA atteint un taux d'endommagement de 20% à la 44ème itération pour 50 itérations en un temps de (1672,16secondes), correspondant au taux d'endommagement réel. Puis un taux d'endommagement de 20% à la 37ème itération pour 200 itérations avec un temps de (1388,70secondes).

V.2.2 Cas 1 Elément116

• Cas 1 élément 116 itérations 100, populations 50, 200

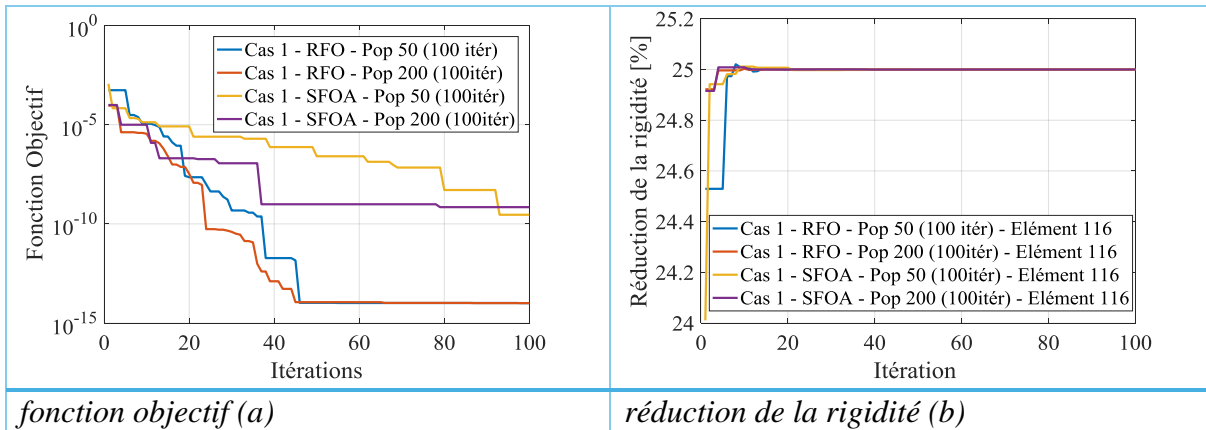
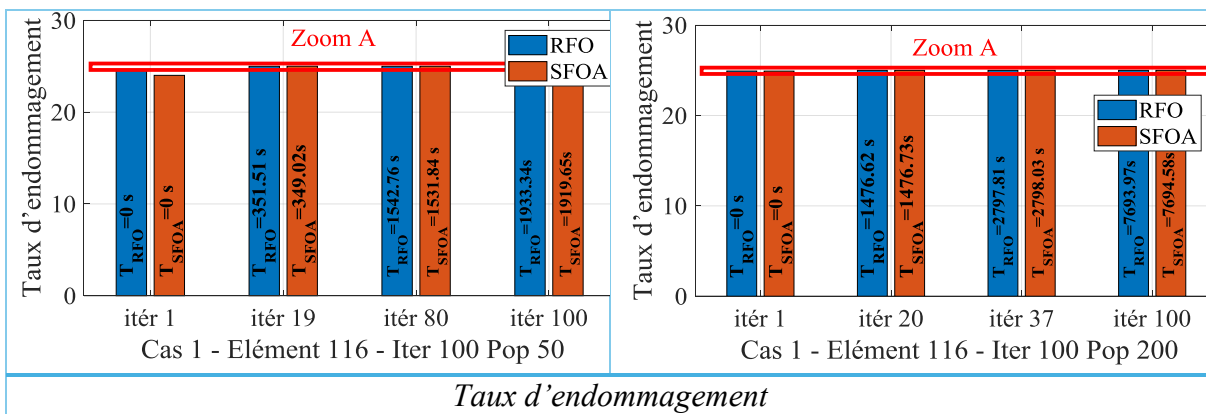


Figure V-13. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 1 (116 éléments)

La figure(V.13.a) représente l'évolution de la valeur de la fonction objectif pour le Cas 1, en comparant deux algorithmes d'optimisation, RFO (en rouge et bleu) et SFOA (en jaune et orange), avec une taille de population de 50 et 200 individus et un nombre maximal de 100 itérations. L'algorithme RFO surpasse le SFOA en termes de capacité de convergence. Dès les premières itérations, les deux algorithmes présentent une performance similaire, atteignant une valeur de fitness de l'ordre de 10^{-7} . Cependant, à partir de la 10ème itération, RFO montre une décroissance plus marquée, traduisant une amélioration progressive et continue de la solution, jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de 10^{-14} , tandis que SFOA stagne autour de 10^{-9} et 10^{-6} à partir de la 38ème itération, indiquant une convergence prématurée vers une solution sous-optimale, et La figure(V.13.b) montre l'évolution de la réduction de la rigidité(%) de l'élément 116 pour le cas 1 en fonction du nombre d'itération 100 et de population 50 et 200 individus en comparant ces deux méthodes, on observe que RFO avec une population de 200, atteint une réduction de rigidité maximale avoisinant 25,1%, en particulier SFOA, qui reste constant autour de 25%. Cette performance constante de SFOA traduit un manque d'efficacité en optimisation locale, contrairement à RFO qui démontre une capacité d'exploration plus efficace.



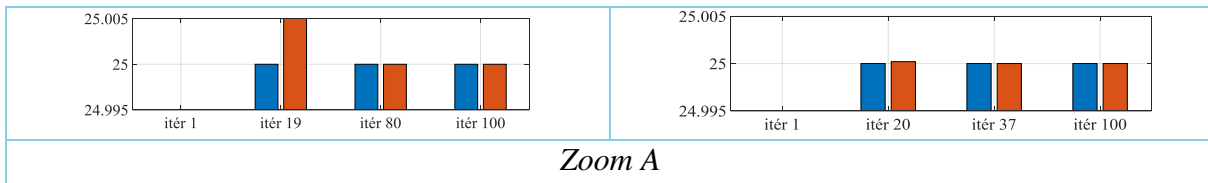


Figure V-14. Taux d'endommagement pour une barre 2D –cas 1- 50 et 200 population et 100 itérations

Dans ce cas, premièrement, nous avons fixé le nombre d'itérations à 100 et variant le nombre de populations de 50 et 200 (Figure v.14.c). Il est observé que la méthode RFO manifeste un taux d'endommagement de 25% à la 19ème itération et 50 populations pour l'élément 116 en un temps de (351,51 secondes), et un taux de 25% 80ème itération et 50 population avec un temps de (1542,76), Correspondant au taux d'endommagement réel. Puis un taux d'endommagement de 25% à la 20ème itération et 200 populations avec un temps de (1476,62secondes), et a l'itération 37ème avec un temps de (2797,31) avec un taux de 25%.

Par contre, la méthode SFOA atteint un taux d'endommagement 25% à la 80ème itération et 50 populations avec un temps de (1531,84secondes), Puis un taux d'endommagement de 25% à la 20ème itération et 200 populations avec un temps de (1476,73secondes), et a l'itération 37ème avec un temps de (2798,03) avec un taux de 25%.

• Cas 1 élément 116 itérations 50 et 200, populations 100

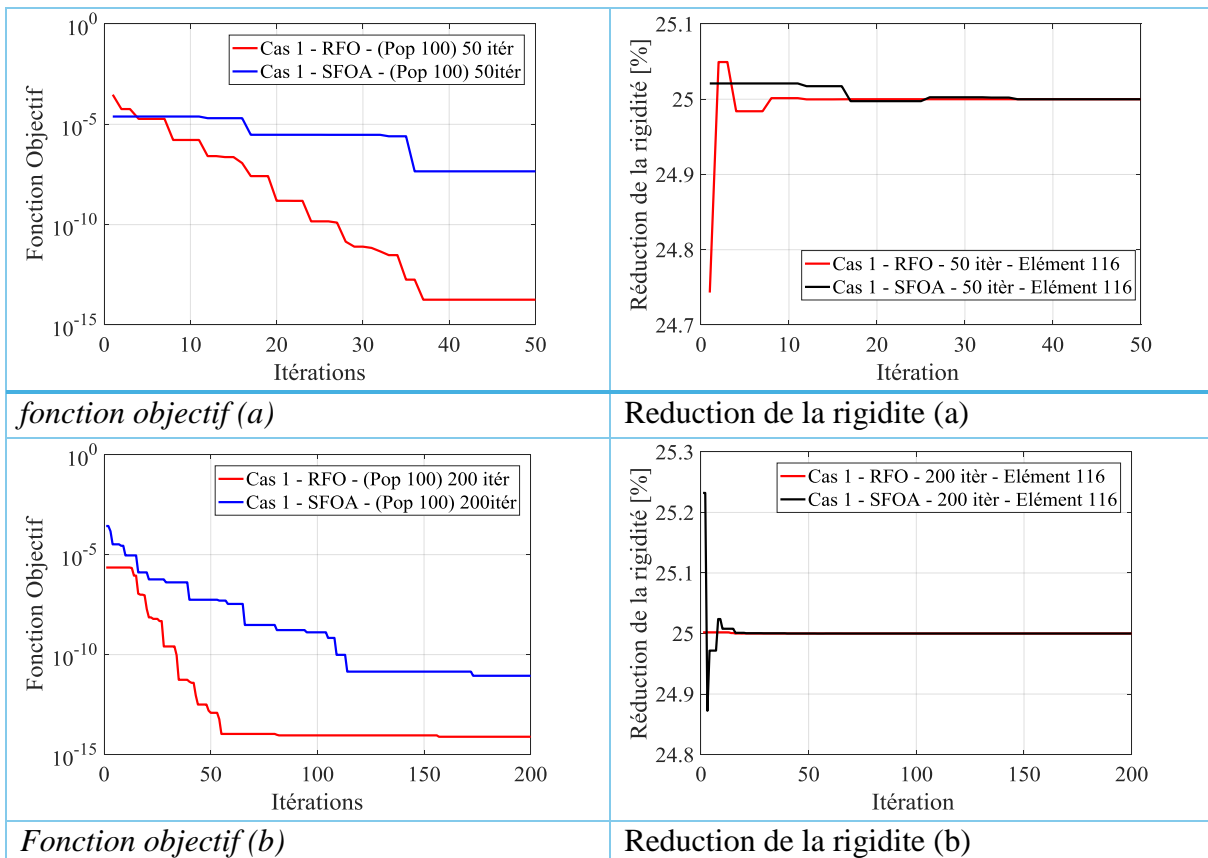
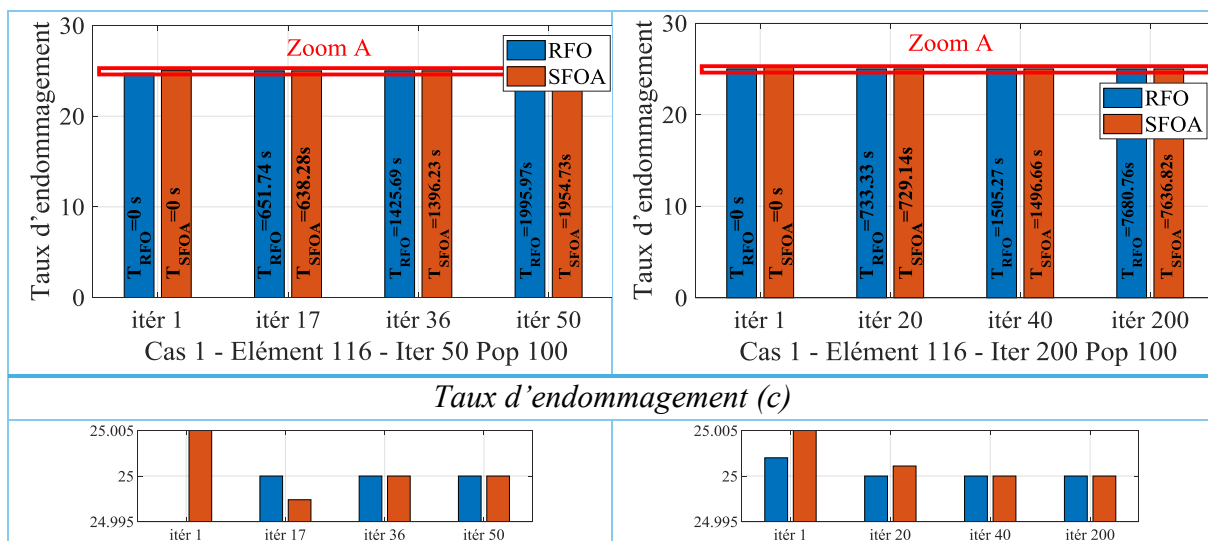


Figure V-15. Évolution de la fonction objectif et de la réduction de la rigidité pour le Cas 1 (116 éléments)

La figure(V.15.a) représente l'évolution de la valeur de la fonction objectif pour le Cas 1, en comparant deux algorithmes d'optimisation, RFO (en rouge) et SFOA (en bleu), avec une taille de population fixe de 100 individus et un nombre de 50 itérations. L'algorithme RFO surpasse le SFOA en termes de capacité de convergence. Dès les premières itérations, les deux algorithmes présentent une performance similaire, atteignant une valeur de fitness de l'ordre de 10^{-6} . Cependant, à partir de la 8ème itération, RFO montre une décroissance plus marquée, jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de 10^{-14} , tandis que SFOA stagne autour de 10^{-9} à partir de la 110ème itération, indiquant une convergence prématurée vers une solution sous-optimale, et La figure(V.15.b) montre l'évolution de la réduction de la rigidité(%) de l'élément 116 pour le cas 1 en fonction du nombre d'itération 50 et de population fixe de 100 individus en comparant ces deux méthodes, on observe que les deux algorithmes présentent une phase initiale instable, en particulier SFOA, qui montre une fluctuation marquée dans les dix premières itérations. Par la suite, les deux courbes se stabilisent progressivement autour de 25% de réduction, avec une convergence légèrement plus régulière pour RFO.

La figure(V.15.b) représente l'évolution de la valeur de la fonction objectif pour le Cas 3, en comparant deux algorithmes d'optimisation, RFO (en rouge) et SFOA (en bleu), avec une taille de population fixe de 100 individus et un nombre maximal de 200 itérations. L'algorithme RFO surpasse le SFOA en termes de capacité de convergence. Dès les premières itérations, les deux algorithmes, atteignant une valeur de fitness de l'ordre autour de 10^{-6} et 10^{-4} . Cependant, à partir de la 10ème itération, RFO montre une décroissance plus marquée, traduisant une amélioration progressive et continue de la solution, jusqu'à atteindre des valeurs de l'ordre de 10^{-14} , tandis que SFOA stagne autour de 10^{-9} à partir de la 110ème itération, indiquant une convergence prématurée vers une solution sous-optimale, et La figure(V.15.b) montre l'évolution de la réduction de la rigidité(%) de l'élément 116 pour le cas 1 en fonction du nombre d'itération 200 et de population fixe de 100 individus en comparant ces deux méthodes, on observe que les deux algorithmes présentent une phase initiale instable, en particulier SFOA, qui montre une fluctuation marquée dans les premières itérations. Par la suite, les deux courbes se stabilisent progressivement autour de 25% de réduction, avec une convergence légèrement plus régulière pour RFO.



Zoom A

Figure V-16. Taux d'endommagement pour une barre 3D –cas 4- 50 et 200 itérations et 100 populations.

Dans ce cas, en maintenant le nombre de populations à 100 et en variant le nombre d'itérations à 50 et 200, les résultats (Figure V.16.c) révèlent que la méthode RFO manifeste pour l'élément 6 un taux d'endommagement de 25% à la 17ème itération pour 50 itérations en un temps de (651,74secondes), et un taux de 25% à l'itération 36ème on a un temps de (1425,69secondes) correspondant au taux d'endommagement réel. Puis un taux d'endommagement de 25% à la 40ème itération pour 200 itérations avec un temps de (733,33secondes).

Par contre, la méthode SFOA atteint un taux d'endommagement de 20% à la 40ème itération pour 50 itérations en un temps de (1496,66secondes), correspondant au taux d'endommagement réel. Mais à l'itération 20, le taux d'endommagement dépasse le seuil de référence (fixé à 25 %). Cette surélévation indique que la méthode n'a pas encore convergé efficacement vers la solution optimale.

V.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présente les résultats d'optimisation pour nos deux structures 2D et 3D, par les méthodes RFO et SFOA, les simulations nous ont permis d'évaluer les valeurs de la fonction objectif, la réduction de la rigidité et le taux d'endommagement.

Les résultats ont clairement démontré la supériorité de l'algorithme RFO par rapport au SFOA, pour les treillis 3D et 2D. RFO a montré une convergence plus rapide et plus précise vers le taux d'endommagement réel, avec une meilleure stabilité et une capacité d'exploration et d'exploitation plus efficace. Il a systématiquement surpassé le SFOA en atteignant les valeurs réelles plus rapidement et avec une décroissance plus marquée de la fonction objectif. Le SFOA, bien que capable de converger, a souvent été caractérisé par une fluctuation initiale plus marquée, une convergence plus lente, voire une stagnation prématurée dans certains scénarios.

En résumé, l'algorithme RFO s'est avéré être un outil prometteur pour la surveillance de la santé structurelle en raison de sa rapidité de convergence et de sa précision, ouvrant la voie à des recherches futures pour affiner et appliquer ces méthodes à des cas plus complexes

Conclusion générale

La détection d'endommagements au sein des structures treillis constitue une problématique centrale en ingénierie mécanique, directement liée à la fiabilité et à la sécurité des systèmes soumis à des sollicitations dynamiques. C'est à cet enjeu majeur que nos travaux se sont consacrés.

Notre démarche a débuté par une étude bibliographique approfondie, essentielle pour contextualiser notre recherche. Cette exploration nous a permis de recenser et d'analyser les principales approches existantes en matière de détection de dommages, en mettant en lumière celles s'appuyant sur l'analyse vibratoire et la modélisation numérique. Cette phase initiale a établi les fondations théoriques indispensables à la compréhension et à l'avancement de notre projet.

Nous avons ensuite mis en œuvre la Méthode des Éléments Finis (MEF), un outil numérique fondamental. La MEF a été cruciale pour modéliser le comportement mécanique et vibratoire des structures treillis avec une grande précision. Grâce à cette approche, nous avons pu simuler divers scénarios de dégradations et en évaluer l'impact sur la réponse dynamique globale de la structure.

Poursuivant notre investigation, nous avons développé, dans l'environnement MATLAB, une méthode de détection s'appuyant sur la fonction de réponse fréquentielle (FRF). Cette technique, largement reconnue en analyse vibratoire, nous a permis de caractériser et de comparer efficacement la signature dynamique des structures saines et endommagées.

Afin d'affiner la localisation et la quantification des dommages, nous avons intégré deux méthodes d'optimisation bio-inspirées au sein de notre algorithme MATLAB : le Starfish Optimizer algorithme (SFOA) et le Rappel Fox Optimizer (RFO). Une étude approfondie de ces deux approches a été menée pour comparer leurs performances respectives. Ces algorithmes ont démontré leur capacité à identifier avec une précision accrue les zones affectées, en minimisant les écarts entre les données simulées et les réponses observées.

En somme, cette étude a mis en évidence la synergie puissante entre la modélisation numérique, l'analyse fréquentielle et les algorithmes d'optimisation pour la détection d'endommagements. Ce travail ouvre la voie à de nombreuses avenues de recherche, incluant l'intégration de données expérimentales réelles, l'amélioration des algorithmes d'optimisation existants, ou encore l'exploration de techniques hybrides pour l'analyse de structures plus complexes.

Références bibliographique:

- [1] Charles Farrar, Keith Worden, *Structural Health monitoring a machine Learning perspective. 2012.*
- [2] Serge Loroze, *Mécanique des Structures_Tome2_(Les livres de Génie civil). 2005.*
- [3] A. A. Griffith, *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids.* The Royal Aircraft Establishment.1920.
- [4] Thi Thu Ha LE PETIT, *Contribution à la détection et à la localisation d'endommagements par des méthodes d'analyse dynamique des modifications structurales d'une poutre avec tension. Application au suivi des câbles du génie civil.* L'UNIVERSITE PARIS-EST.2014
- [5] Gyungmin Toh and Junhong Park, *Review of Vibration-Based Structural Health Monitoring Using Deep Learning.* Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea.
- [6] Madi Billal, *Mémoire de fin d'étude sur SUIVI DE L'ENDOMMAGEMENT DES MATERIAUX COMPOSITES PAR VIBRATIONS LINEAIRES.* Université 8 Mai 1945 Guelma.
- [7] Fan, W., & Qiao, P. (2011). *Vibration-based damage identification methods: A review and comparative study.* Structural Health Monitoring, 10(1), 83-101.
- [8] Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., & Shevitz, D. W. (1996). *Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review.* Los Alamos National Laboratory Report.
- [9] Pandey, A. K., Biswas, M., & Samman, M. M. (1991). *Damage detection from changes in curvature mode shapes.* Journal of Sound and Vibration, 145(2), 321-332.
- [10] Salawu, O. S. (1997). *Detection of structural damage through changes in frequency: à review.* Engineering Structures, 19(9), 718-723.
- [11] Allemang, R. J., & Brown, D. L. (1987). *A correlation coefficient for modal vector analysis.* Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference.
- [12] Ratcliffe, C. P., & Ostachowicz, W. M. (2000). *Damage Detection in Structures Using Vibration Measurements.* John Wiley & Sons.
- [13] Gouri DHATT, Gilbert TOUZOT, *une Présentation de la Méthodes des Eléments finis. L'université de LAVAL Québec MALOIVE S.A Editeur PARIS .1981.*
- [14] G.P.Nikishkov, *Introduction to the Finite Elément Method.* Unversity of Aizu. 2004.
- [15] Hervé Oudin, *Introduction à la Méthode Des Eléments Finis.* École d'ingénieur. Nantes, France. 2008.
- [16] Nouredine BOURAHILA, *Résistance Des Matériaux de Bases.* Université Sâad Dahleb de Blida. 2000.
- [17] Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L, *The Finite Element Method (Vol. 1: The Basis)*

University of California at Berkeley. 2013.

- [18] Jean-Louis Batoz, Gilbert Dhatt. *Modélisation des structures par éléments finis_Tome1_* Hermès Science Publications, Lavoisier. 1990.
- [19] Maia, N. M. M., Silva, J. M. M., & Sampaio, R. P. C. (1999). *Damage detection using the frequency-response-function curvature method*. Journal of Sound and Vibration, 226(5), 1029-1042
- [20] Allemang, R. J., & Brown, D. L. (1917). *A complete review of the complex modulus*. Journal of Sound and Vibration, 56 (1), 1-13.
- [21] Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., & Shevitz, D. W. (1996). *Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review*. Los Alamos National Laboratory.
- [22] Salawu, O. S. (1997). *Detection of structural damage from changes in modal parameters*. Engineering Structures, 19(9), 718-723.
- [23] Pandey, A. K., Biswas, M., & Samman, M. M. (1991). *Damage detection from changes in curvature mode shapes*. Journal of Sound and Vibration, 145(2), 321-332.
- [25] Sampaio, R. P. C., Maia, N. M. M., & Silva, J. M. M. (1999). *Damage detection using the frequency-response-function curvature method*. Journal of Sound and Vibration, 226(5), 1029-1042.
- [26] Peeters, B., & De Roeck, G. (2001). *Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis*. Journal of Sound and Vibration, 243(5), 879-896.
- [27] Kumar A, Wu G, Ali MZ, Mallipeddi R, Suganthan PN, Das S. *A test-suite of non-convex constrained optimization problems from the real-world and some baseline results*. Swarm Evol Comput 56.2020.
- [28] Meng Z, Guo L, Wang X. *A general fidelity transformation framework for reliability-based design optimization with arbitrary precision*. Struct Multidiscip Optim.2022.
- [29] Houssein EH, Oliva D, C, elik E, Emam MM, Choniem RM. *Boosted sooty tern optimization algorithm for global optimization and feature selection*. Expert Syst Appl.2023.
- [30] Changting Zhong • Gang Li • Zeng Meng • Haijiang Li • Ali Riza Yildiz • Seyedali Mirjalili. *Starfish optimization algorithm (SFOA): a bio-inspired metaheuristic algorithm for global optimization compared with 100 optimizers*. 2024.
- [31] Braik, Malik, and Heba Al-Hiary. *Rüppell's fox optimizer: A novel meta-heuristic approach for solving global optimization problems*. Cluster Computing 28.5 (2025): 1-77.

Résumé

L'objectif principal de ce travail est la détection des endommagements dans les structures en treilles à l'aide des techniques qui exploitent des mesures vibratoires, afin d'évaluer la durée de vie des structures. Nous avons présente une méthodologie d'identification d'endommagements dans les structures. La méthode des éléments finis (MEF) est utilisée pour construire les modèles des structures saines et endommagées.

Afin d'évaluer les endommagements on utilisant la méthode fonctions réponses fréquentielles (FRF) qui a été applique au structures en treilles pour identifier les éléments endommages pour deux structures dont les dimensions sont 2D et 3D. Les résultats obtenus sont valides à l'aide d'une référence expérimentale.

Nous avons rajoute, une présentation de deus algorithmes génétiques (AG), appelés algorithme d'optimisation par Etoile de Mer (SFOA) et l'optimiseur du Renard de Ruppell (RFO) afin de quantifier précisément les éléments endommages. Nous avons pu quantifier nos endommagements et nous avons comparé ces deux méthodes pour leurs précisions et le temps de calcule.

Mots clés : Analyse vibratoire, Détection d'endommagement, optimisation, Structure a 2D et 3D, Méthodes des éléments finis(MEF), Fonction réponse fréquentielle (FRF), Algorithme génétique (AG),

Abstract

The main objective of this work is to detect damage in truss structures using techniques that exploit vibration measurements in order to assess the service life of the structures. We present a methodology for identifying damage in structures. The finite element method (FEM) is used to construct models of healthy and damaged structures.

In order to assess damage, we use the frequency response function (FRF) method, which has been applied to lattice structures to identify damaged elements for two structures with 2D and 3D dimensions. The results obtained are validated using an experimental reference.

We added a presentation of two genetic algorithms (GA), called the Starfish Optimisation Algorithm (SFOA) and the Ruppell's Fox Optimiser (RFO), in order to accurately quantify the damaged elements. We were able to quantify our damage and compared these two methods for their accuracy and calculation time.

Keywords: Vibration analysis, Damage detection, Optimisation, 2D and 3D structures, Finite element methods (FEM), Frequency response function (FRF), Genetic algorithm (GA)

