

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU

FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

Tasdawit n Lmulud At Meammer

Tazeddayt n Tasmedna n Taskekt

Agezdu n Tasmedna n Tamicanict



Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER EN ELECTOMECHANIQUE
SPECIALITE MAINTENANCE
INDUSTRIELLE

**Exploitations des méthodes d'analyse dynamique et
des méthode d'optimisations pour l'identifications
d'endommagements dans des structures plaques.**

Réalisé par :

Mr DAHMOUNE Said

Mr ALIOUI Jugurta

Encadré par :

Mr TIACHACHT Samir

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

Nous remercions le bon dieu tout puissant de nous avoir donné la force, le courage et la patience d'arriver à terme de ce travail.

En tiens à exprimer nous vifs remerciements à :

Nos chers parent de nous avoir soutenue tout au long de notre parcours ;

*On présente nos remerciements à **Monsieur TIACHACHT Samir**, enseignant à la faculté de génie de la construction de l'Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou, d'avoir bien voulu diriger ce travail pour la rédaction de notre mémoire de fin d'études.*

*Nous tenons à remercier nos amis **BEDDEK Amar, AKRED Ali et HALICHE Ammar** et toutes les personnes que nous affectionnons qui ont contribué à la réalisation et l'accomplissement de ce mémoire de fin d'études par leurs précieux soutient.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*À ma très chère mère. Je ne te remercierai jamais assez, quoi que je dise, pour tout
Ce que tu as fait pour moi, pour tous tes sacrifices ;*

*À mon très cher père, l'homme de référence à mes yeux. Merci de toujours être là
Pour moi, de me montrer la voie et de croire en moi.
Que ce travail et ma réussite traduisent ma gratitude et mon affection ;*

À mes très chers frères et sœurs, ceux sur lesquels je peux toujours compter ;

À mon très chère épouse, avec laquelle j'ai partagé que des moments de joie et de bonheur

*À mes amis et frères de cœur, avec lesquels j'ai pu grandir,
Qui m'ont toujours soutenu et qui ne m'ont jamais laissé le temps de m'ennuyer
Ni de manquer le bonheur d'une aventure ;*

Merci !

DAHMOUNE Said

Dédicaces

Je dédie ce présent travail :

A mes chers parents, que nulle dédicace ne peut exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leur encouragement continu, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices.

A mes très chers frères, pour leur aide et encouragement

Toute ma famille

Ainsi qu'à tous mes amis(es)

A tous ceux qui m'ont soutenu, aidé, et encouragé.

A tous ceux que j'aime.

Merci !

Alioui Jugurta

Table des matières

Table des matières	
Introduction générale.....	1
I Chapitre 1 : Théorie des plaques.....	3
I.1 Introduction	3
I.2 Historique des plaque	3
I.3 Définition d'une plaque	4
I.4 Théories des plaques en flexion.....	5
I.4.1 Théorie des plaques minces	5
I.4.1.1 Hypothèses pour l'étude des plaques minces	5
I.4.1.2 Relations cinématiques	6
I.4.1.2.1 Champs de déplacement	6
I.4.1.2.2 Champs de déformation	7
I.4.1.3 Relations contraintes-déformations	8
I.4.1.4 Loi de comportement.....	9
I.4.1.5 Equations d'équilibre d'une plaque	11
I.4.1.6 Energie de Déformation.....	13
I.5 Théorie des plaques épaisses	13
I.5.1 Hypothèses pour l'étude des plaques épaisses.....	14
I.5.2 Relations cinématiques	14
I.5.2.1.1 Champs de déplacement	14
I.5.2.1.2 Champs de déformation	15
I.5.3 Relations contraintes-déformations.....	16
I.5.4 Relations efforts résultants-déformations	17
I.5.5 Energie de déformation.....	18
I.6 Formulation en statique linéaire	19
I.6.1 Principe des travaux virtuels.....	19
I.6.2 Discrétisation du champ de déplacements	21
I.6.3 Discrétisation du champ de déformations.....	22
I.6.4 Matrice de rigidité :.....	23
I.6.5 Vecteur charge équivalente.....	25
I.7 Dynamique des structures sur les plaque.....	26
I.7.1 Formulation des équations de mouvement en dynamique linéaire	26
I.7.2 Formulation des équations de mouvement.....	26
I.7.3 Matrice de masses élémentaires	28
II Chapitre 2 : Recherche Bibliographiques.....	29

Table des matières

II.1	Introduction	29
II.2	Détection et localisation de défauts	29
II.3	Bibliographie des méthodes de détection et de localisation	29
II.3.1	Méthode basée changement de fréquence	31
II.3.2	Méthodes basée sur données modales	33
II.3.2.1	Méthodes basées sur la forme des modes	34
II.3.2.2	Méthodes basées sur les courbures modales.....	34
II.3.3	Méthode basées sur la matrice de flexibilité	35
II.3.4	Méthode basée sur le vecteur de force résiduelle.....	37
II.3.5	Méthode basée sur la régularisation éparse d'impédance électromécanique.....	38
II.4	Conclusion	39
III	Chapitre 3 : Méthode de l'énergie de déformations	40
III.1	Introduction	40
III.2	Présentation de la Méthode énergie déformation modale.....	40
III.3	3. Méthode de détection des dommages basée sur l'énergie de déformation modale	42
III.3.1	Théorie de la méthode d'énergie de déformation modale	42
III.3.2	Procédure de détection des dommages basée sur l'énergie déformation de modale	45
III.4	Application et résultats	49
III.4.1	Première partie	49
III.4.2	Deuxième partie	51
III.5	Conclusion	54
IV	Chapitre 4 : Méthodes d'optimisations	55
IV.1	Introduction	55
IV.2	Méthodes d'optimisation	55
IV.2.1	Optimisation de capucin.....	55
IV.2.1.1	Inspiration	56
IV.2.1.2	Algorithme de recherche des capucins.....	59
IV.2.1.2.1	Recherche globale (mouvement de saut)	60
IV.2.1.2.2	Recherche locale (Mouvement de balancement)	62
IV.2.1.2.3	Recherche locale (Mouvement d'escalade)	63
IV.2.1.3	Modèle mathématique de CapSA	64
IV.2.1.3.1	Initialisation de CapSA	65
IV.2.1.3.2	Processus évolutif de CapSA	66
IV.2.1.3.3	Évaluation de l'aptitude de la fonction	72

Table des matières

IV.2.1.4	Analyse de CapSA Naturellement	72
IV.2.2	Méthode de honey badger	77
IV.2.2.1	Algorithme Honey Badger	80
IV.2.2.1.1	Biologie générale du blaireau à miel.....	81
IV.2.2.1.2	Inspiration	81
IV.2.2.1.3	Modèle mathématique.....	82
IV.2.2.1.4	Phases d'exploration et d'exploitation	86
IV.3	Application et résultats	87
IV.4	Conclusion	100
Conclusion générale		101

Listes des figures

Liste des figures

Figure I.1-1 : Portion d'une Plaque	4
Figure I-2: Plaques minces de côtés a , b	5
Figure I-3: Géométries non déformée et déformée d'un bord d'une plaque	6
Figure I-4 : Contraintes appliquées sur un tronçon de plaque.....	8
Figure I-5 : Résultantes positives et charge sur un élément de plaque.....	11
Figure I-6 : Plaques épaisses de côtés a , b	13
Figure I-7 : Cinématique de Reissner – Mindlin	14
Figure I-8 : (a) Coordonnées intrinsèques Élément parent et (b) Coordonnées physiques : élément iso paramétrique	21
Figure I-9 : Intégration de Gauss (2×2) pour le quadrilatère.....	25
Figure III-1 : Schéma des éléments pour une plaque carrée	44
Figure III-2 : Plaque carrée.....	47
Figure III-3 : (a) Avant troncature. (b) Après troncature.....	48
Figure III-4 : premier scénario d'endommagement	51
Figure III-5 : deuxième scénario d'endommagement	52
Figure III-6 : troisième scénario d'endommagement.....	52
Figure III-7 : premier scénario d'endommagement.....	53
Figure III-8 : deuxième scénario d'endommagement	53
Figure III-9 : troisième scénario d'endommagement.....	54
Figure IV-1 : (a) Différentes étapes du mouvement des capucins lors du saut d'un arbre à un autre et (b) différentes étapes du mouvement des capucins lors du saut d'une rivière à une autre.....	60
Figure IV-2 : (a) Un modèle réaliste de saut de capucin utilisant un mouvement courbe approximatif et (b) un modèle courbe simulant le mouvement de saut du capucin en (a).	60
Figure IV-3 : (a) Un mouvement de balancement pour un capucin sur une branche d'arbre à l'aide de sa queue et (b) un mouvement de balancement pour un capucin sur une branche d'arbre à l'aide de ses mains.....	62
Figure IV-4 : (a) Un modèle conceptuel simulant le mouvement de balancement d'un capucin sur une branche d'arbre à l'aide de ses mains et (b) un modèle de pendule représentant le mouvement d'un objet comme un mouvement de pendule.	63
Figure IV-5 : (a) Un capucin grimpe à un arbre et (b) un capucin descend d'un arbre	64
Figure IV-6 : (a) Un modèle conceptuel d'un capucin grimpant à un arbre et (b) un modèle approximatif du comportement d'escalade d'un capucin	65
Figure IV-7 : (a) Le blaireau à miel attaque le lion, et (b) Le blaireau à miel grimpe aux branches supérieures des arbres [46]	79
Figure IV-8 : Loi du carré inverse. I est l'intensité de l'odeur, S est l'emplacement de la proie et r est un nombre aléatoire compris entre 0 et 1	83
Figure IV-9 : Phase de creusement : le contour bleu représente l'intensité de l'odeur, la ligne circulaire noire indique l'emplacement des proies. (Pour l'interprétation des références à la couleur dans cette légende de la figure	84
Figure IV-10 : fitness du premier scénario d'endommagement $PP=100$, $IT=500$	88
Figure IV-11 : BEST bar du premier scénario $PP=100$, $IT=500$	88
Figure IV-12 : fitness du premier scénario d'endommagement $PP=500$, $IT=100$	89
Figure IV-13 : BEST bar du premier scénario $PP=500$, $IT=100$	89
Figure IV-14 : fitness du deuxième scénario d'endommagement $PP=100$, $IT=500$	91
Figure IV-15 : BEST bar du deuxième scénario $PP=100$, $IT=500$	91

Listes des figures

<i>Figure IV-16 : fitness du deuxième scenario d'endommagement PP=500, IT=100</i>	<i>92</i>
<i>Figure IV-17 : BEST bar du deuxième scenario PP=500, IT=100</i>	<i>92</i>
<i>Figure IV-18: fitness du premier scenario d'endommagement PP=100, IT=500.....</i>	<i>94</i>
<i>Figure IV-19 : BEST bar du premier scenario PP=100 , IT=500.....</i>	<i>94</i>
<i>Figure IV-20: fitness du premier scenario d'endommagement PP=500, IT=100.....</i>	<i>95</i>
<i>Figure IV-21 : BEST bar du premier scenario PP=500, IT=100.....</i>	<i>95</i>
<i>Figure IV-22 : fitness du deuxième scenario d'endommagement PP=100, IT=500</i>	<i>97</i>
<i>Figure IV-23 : BEST bar du deuxième scenario PP=100, IT=500:</i>	<i>97</i>
<i>Figure IV-24 : fitness du deuxième scenario d'endommagement PP=500, IT=100</i>	<i>98</i>
<i>Figure IV-25 : BEST bar du deuxième scenario PP=500, IT=100</i>	<i>98</i>

Liste des tableaux

Liste des tableaux

<i>Tableau III-1: caractéristiques mécaniques et géométriques des deux structures</i>	50
<i>Tableau III-2: les trois scénarios d'endommagements pour les deux structures</i>	50
<i>Tableau III-3: les fréquences saines et endommagées pour la structure SSSS avec les trois scénarios d'endommagements</i>	50
<i>Tableau III-4: les fréquences saines et endommagées pour la structure CCCF avec les trois scénarios d'endommagements</i>	51
<i>Tableau IV-1 : Valeur best des méthodes CapSA et HBA pour le premier scénario d'endommagement de structure SSSS pour des itérations fixées à 100 est 500.</i>	90
<i>Tableau IV-2 : Valeur best des méthodes CapSA et HBA pour le deuxième scénario d'endommagement de structure SSSS pour des itérations fixées à 100 est 500.</i>	93
<i>Tableau IV-3 : Valeur best des méthodes CapSA et HBA pour le premier scénario d'endommagement de structure CCCF pour des itérations fixées à 100 est 500.</i>	96
<i>Tableau IV-4 : Valeur best pour les méthodes CapSA et HBA pour le deuxième scénario d'endommagement de la structure CCCF , pour des itérations fixées à 100 est 500.</i>	99

Nomenclature

Liste des symboles

w : Représente le déplacement vertical.

E : Module d'élasticité.

G : Coefficient de Poisson.

ν : Module de cisaillement élastique.

$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$: Contrainte normale.

M_x, M_y : Moment de flexion.

D : Rigidité flexionnelle.

$\beta_x(x, y), \beta_y(x, y)$: Les rotations.

$\{\varepsilon_c\}$ ou $\{\gamma\}$: Déformations de cisaillements.

$\{\varepsilon_f\}$: Déformation de flexion.

$\{x\}$: Vecteur de variation de courbure.

$[C]$: Matrice de constantes élastiques.

$\{\sigma_c\}$: Contribution de cisaillement.

$\{\sigma_f\}$: Contribution de flexion.

Q_{ij} : Coefficients de rigidité.

k : Coefficient de correction de cisaillement transversal.

$[D_f]$: Matrice de rigidité à la flexion.

$[D_c]$: Matrice de rigidité cisaillement transversal.

U : Énergie déformation.

U_F : Énergie de déformation de flexion.

U_C : Énergie de déformation de cisaillement.

D_τ : Matrice constitutive de cisaillement.

$[K]$: Représente la matrice de rigidité de la structure.

$\{q\}$: Vecteur de déplacements nodaux.

$\{F\}$: Vecteur chargement extérieur.

V : volume du corps.

S : Surface extérieure du corps où les forces surfaciques sont appliquées.

Nomenclature

f_i^V : Forces volumiques.

f_i^S : Forces surfaciques appliquées à la surface extérieure S du corps.

Q_i : Forces concentrées.

σ_{ij} : Tenseur des contraintes.

ε_{ij} : Tenseur des déformations infinitésimales.

$\langle \varepsilon \rangle$: Vecteur des déformations, transposé.

$\{ \sigma \}$: Vecteur des contraintes.

$\langle u \rangle$: Vecteur des déplacements, transposé.

$\{ f_V \}$: Vecteur des forces volumiques.

$\{ f_S \}$: Vecteur des forces surfaciques.

$\{ Q_i \}$: Vecteur des forces concentrées.

V : Énergie potentielle totale.

W : Travail des forces appliquées.

n_e : Indique le nombre de nœuds par élément.

$[J]$: Matrice Jacobéenne de la transformation géométrique.

ξ_i, η_j : Les coordonnées des points d'intégration.

W_i, W_j : Les coefficients de pondérations (ou poids) correspondants.

$F_i(t)$: Force définie par le travail virtuel des forces extérieures.

$[M]^e$: Matrice de masse cohérente de l'élément e.

$(\varphi^A)_{ij}$ et $(\varphi^B)_{ij}$: Désignent la valeur des déplacements modaux pour le j mode en un point i pour les états A et B, respectivement.

Ω : Matrice diagonale des valeurs propres.

Nomenclature

Liste des abréviations

- (MAC)** : Critère d'assurance modale.
- (COMAC)** : Critère d'assurance modale coordonnée.
- (CDF)** : Facteur damage courbure modale.
- (CDM)** : Méthode de différence centrale.
- (DCI)** : Indicateur de capacité de détection.
- (CapSA)** : Algorithme de recherche capucin.
- (HBA)** : Algorithme du blaireau du miel.
- (PSO)** : Optimisation des essaims de particules.
- (SI)** : Algorithmes d'intelligence en essaim.
- (EA)** : Algorithmes évolutifs.
- (NP)** : Algorithmes de phénomènes naturels.
- (TEO)** : Optimisation de l'échange thermique.
- (NFL)** : Théorème du No-Free-Lunch.
- (GOA)** : Algorithme d'optimisation Grasshopper
- (WOA)** : Algorithme d'optimisation des baleines
- (EHO)** : Optimisation de l'élevage d'éléphants
- (MFO)** : Optimisation de la mite
- (GAs)** : Algorithme génétique
- (ES)** : Stratégie d'évolution
- (CMA-ES)** : Matrice de covariance Adaptation Stratégie évolutive

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale :

La détection d'endommagements dans des structures mécaniques est une opération très importante afin d'assurer leur intégrité structurelle et réhabiliter les dommages et ainsi l'âge fonctionnel des structures augmentera. Par conséquent éviter les dégâts pouvant être irréversible sur la vie humaine. À cette fin, La surveillance des dommages structurels a commencé par l'inspection visuelle et a évolué avec le temps grâce à d'énormes développements dans les domaines de la surveillance de la santé structurelle (SHM) et de la détection des dommages structurels. Un grand nombre de techniques ont été développées pour détecter, localiser et quantifier les dommages structurels dans le but de rendre le processus de surveillance plus réalisable. De nombreuses techniques de détection des dommages basées sur les vibrations ont été étudiées. La réponse vibratoire de la structure surveillée est enregistrée et analysée pour évaluer les dommages structurels et prendre des décisions sur l'état de santé de la structure.

Durant ces dernières années, la technique non-destructive (CND) qui contient deux catégories est la plus largement utilisée vu qu'elle laisse la structure intacte. La première catégorie comprend les méthodes locales telles que les ultrasons, la radiographie par rayon X est le test par émission acoustique. La deuxième catégorie comprend des méthodes globales pour surveiller l'état d'une structure plus complexe, Cependant, ces méthodes ne nous permettent pas de suivre la structure en continu pendant son service et nous renseigne sur le comportement mécanique de la structure et sur les changements des caractéristiques vibratoires. Le développement technologique, dans les domaines de capteurs, acquisition de données, le traitement du signal et l'outil informatique, a favorisé la surveillance de la structure en temps réel, et a fait que l'émergence de ce type de contrôle soit l'évolution naturelle des méthodes traditionnelles.

L'idée fondamentale pour l'identification des dommages basée sur les vibrations est que les changements induits par les dommages dans les propriétés physiques (masse, amortissement et rigidité) entraîneront des changements détectables dans les propriétés modales (fréquences naturelles, amortissement modal et formes modales). Par conséquent, on comprend que les dommages puissent être identifiés en analysant les changements dans les caractéristiques vibratoires de la structure.

Dans ce mémoire nous nous focalisons, sur l'étude d'une méthode numérique de détection d'endommagements dans une structure plaques en utilisant l'énergie de déformation modale, et sur la quantification des endommagements en utilisant les deux méthodes d'optimisation intitulées ; CapSA et HBA.

Ce travail sera partagé en quatre chapitres :

Introduction générale

Chapitre 1 : il est subdivisé en deux parties, nous allons présenter la méthode des éléments finis et un rappel sur la dynamique des structures pour l'élément plaque.

Chapitre 2 : nous présentons une synthèse bibliographique sur les méthodes de détection et localisation d'endommagements.

Chapitre 3 : nous présentons la méthode proposée de détection des endommagements basée sur l'énergie de déformation modale et son application afin de pouvoir détecter et localiser les endommagements.

Chapitre 4 : il sera divisé en deux parties, la première a pour contenu une description de nos deux méthodes d'optimisation utilisées dans ce présent travail, et pour la deuxième partie, une discussion des résultats de simulation numérique suivie d'une conclusion sur le travail termine le mémoire.

Chapitre I : Théorie des plaques

I Chapitre 1 : Théorie des plaques

I.1 Introduction

Les plaques sont des éléments structurels très importants. Elles sont principalement utilisées comme dalles dans les bâtiments et les tabliers des ponts, dans l'industrie sous-marine, aérospatial, dans la conception industrielle (turbines, pièces de mécanique, carrosserie de voiture), et même dans le monde du vivant (artères, bronches, ...), etc. tous ces domaines sont stratégiques et économiquement très importants. C'est pour cette raison que les plaques ont fait l'objet de très grand nombre de travaux depuis plus d'un siècle.

I.2 Historique des plaque

D'un point de vue historique, Euler fut l'un des premiers, en 1766, à formuler le premier modèle mathématique du problème représentant le comportement d'une plaque assimilée à une membrane en vibration libre. Puis, le physicien allemand Chladni (1787) découvrit les premiers modes propres de vibrations d'une plaque carrée horizontale, C'est ensuite Lagrange qui développa (1811) la première équation différentielle correcte pour décrire les vibrations d'une plaque libre d'épaisseur constante, mais sans démonstration ni explication. Pour les mathématiciens, la détermination des fréquences naturelles fût une grande priorité. Sophie Germain a été récompensé en 1816 pour sa contribution au développement de l'équation de la plaque mince. Quelques temps après, Navier introduit la méthode pour calculer les modes et les fréquences propres d'une plaque pour certaines conditions aux frontières.

Ce n'est qu'en 1850 que Kirchhoff a établi de façon correcte pour la première fois des conditions aux limites en partant du principe des déplacements virtuels et de l'expression du travail des contraintes de la plaque.

Lord Rayleigh (1877) ou encore Ritz (1909), furent parmi les premiers à formuler la théorie qu'on connaît aujourd'hui. Ritz, a amélioré la procédure de Rayleigh en se basant sur les fonctions de forme qui caractérisent le mouvement dynamique propre. Cette procédure est appelée « Méthode de Rayleigh Ritz ou Méthode de Ritz ». C'est la méthode approximative la plus populaire et la plus utilisée dans l'analyse des structures en vibrations.

En 1921 Timoshenko montre que la prise en compte des effets respectifs de l'inertie rotatoire et du cisaillement a pour incidence de réduire sensiblement les fréquences propres de vibration des poutres, Dans le même contexte, l'étude vibratoire des plaques a évolué en injectant des hypothèses supplémentaires telles que la prise en compte de l'effet de cisaillement pour le cas des plaques épaisses. Ce qui a conduit à des modèles plus raffinés comme celui de Love (1944) qui appliqua les travaux de Kirchhoff aux plaques épaisses.

Depuis lors, de très nombreuses études ont été menées, surtout avec le développement des industries navales et aéronautiques. C'est ainsi que dans les années de l'après-guerre, de nouvelles théories des plaques minces élastiques furent élaborées par Reissner (1945). Il propose une extension de la théorie des plaques avec cisaillement dans le cas statique. Ensuite, Waburton et Leissa (1969) ont contribué d'après plusieurs travaux de recherches contemporaines à mieux appréhender le problème de vibration des plaques en tenant compte des différentes hypothèses pour la prédiction sensiblement exacte du comportement dynamique inhérent aux vibrations des plaques.

En 1973 Leissa proposa un catalogue élargi à différent cas d'hypothèse pour la solution des vibrations libres des plaques rectangulaires. En parallèle, Liew (1995) fournit une contribution effective pour les plaques épaisses.

I.3 Définition d'une plaque

Une plaque est un solide bidimensionnel, défini comme des structures dont la géométrie particulière est caractérisée par l'existence d'un plan moyen. L'épaisseur est faible devant les deux autres dimensions qui sont la longueur et la largeur et l'axe z est perpendiculaire au plan de la plaque définie par x et y [1]. Une plaque peut être constituée d'un matériau homogène, ou être obtenue par l'empilement de différentes couches de matériaux orthotropes [2].

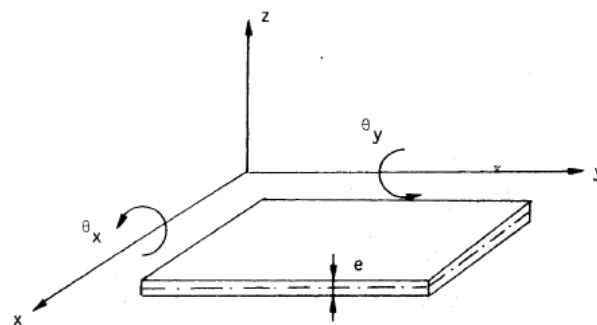


Figure I.I-1 : Portion d'une Plaque

I.4 Théories des plaques en flexion

I.4.1 Théorie des plaques minces

La théorie de Kirchhoff relative aux plaques minces qui revient à ne pas prendre en compte le cisaillement transverse, est applicable lorsque le rapport de la plus petite de leurs dimensions sur l'épaisseur est supérieur ou égal à 20 [3].

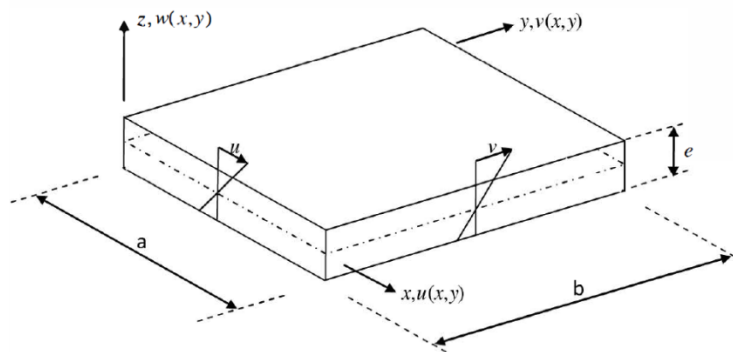


Figure I-2: Plaques minces de côtés a , b .

I.4.1.1 Hypothèses pour l'étude des plaques minces

Hypothèse de Kirchhoff, qui se compose des parties suivantes (figure I.3) :

- 1) Un élément vertical de la plaque avant la flexion reste perpendiculaire à la surface médiane de la plaque après la flexion ;
- 2) Les normales transversales ne subissent pas d'allongement (c'est-à-dire qu'elles ne sont pas extensibles) ;
- 3) Les normales transversales tournent de telle sorte qu'elles restent perpendiculaires à la surface centrale après déformation ;
- 4) La déformation en cisaillement transverse est donc négligée [2].

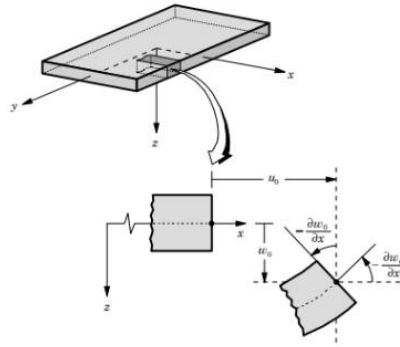


Figure I-3: Géométries non déformée et déformée d'un bord d'une plaque

I.4.1.2 Relations cinématiques

I.4.1.2.1 Champs de déplacement

Le Déplacement du point B dans le sens x est

$$u = -z \tan \theta \quad (1.1)$$

Le déplacement étant petit

$$\tan \theta = \theta = \frac{\partial w}{\partial x} \quad (1.2)$$

Ainsi

$$u = -z \frac{\partial w}{\partial x} \quad (1.3)$$

Et dans la direction y

$$v = -z \frac{\partial w}{\partial y} \quad (1.4)$$

Donc le champ des déplacements est défini uniquement par une variable

$$\begin{aligned} u &= -z \frac{\partial w}{\partial x} \\ v &= -z \frac{\partial w}{\partial y} \\ w &= W(x, y, z) \end{aligned} \quad (1.5)$$

Où w représente le déplacement vertical du plan médian de la plaque.

I.4.1.2.2 Champs de déformation

En raison de l'hypothèse numéro 1, c'est-à-dire que "l'élément vertical de la plaque avant la flexion reste perpendiculaire à la surface médiane de la plaque après la flexion", la déformation en cisaillement transversal est négligeable.

Les déformations dans le plan peuvent donc être écrites en termes de déplacements comme suit [4] :

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = 0\end{aligned}\tag{1.6}$$

Après substitution des déplacements dans (1.6), nous obtenons les composantes du tenseur de déformations.

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \varepsilon_y &= -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ \gamma_{xy} &= -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\end{aligned}\tag{1.7}$$

Les déformations γ_{xz} et γ_{yz} sont nulles.

Soient en fonction des courbures :

$$\varepsilon_f = z\{x\}\tag{1.8}$$

Avec :

$$\{x\}^T = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{pmatrix}\tag{1.9}$$

I.4.1.3 Relations contraintes-déformations

Dans le cas général d'un état de contraintes tridimensionnelles, les contraintes et les déformations sont liés par la loi de Hooke généralisée, valable pour un matériau isotrope homogène :

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] & ; & \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] & ; & \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] & ; & \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \end{aligned} \tag{1.10}$$

Dans ces équations, Les constantes E , ν et G représentent le module d'élasticité, le coefficient de Poisson et le module de cisaillement élastique, respectivement. La relation entre ces quantités s'écrit :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \tag{1.12}$$

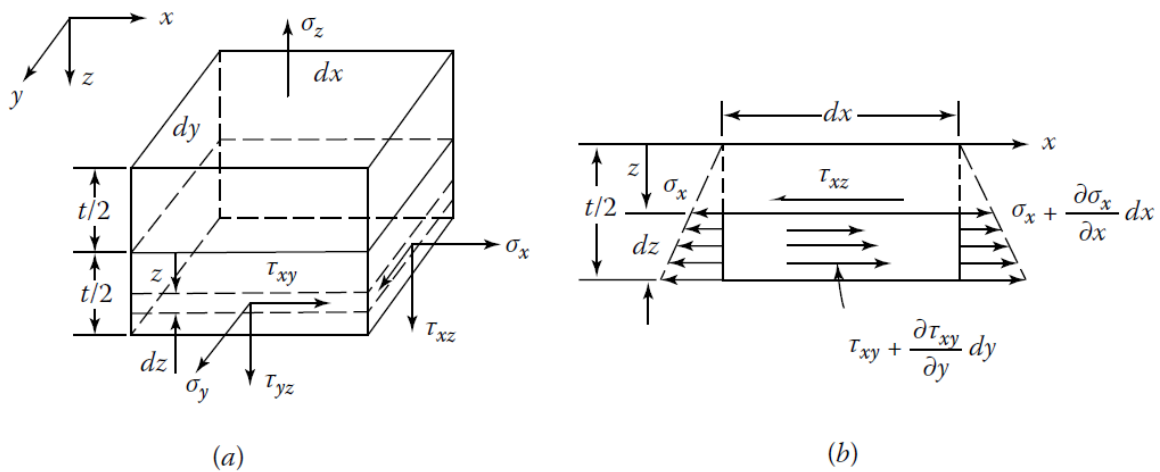


Figure I-4 : Contraintes appliquées sur un tronçon de plaque

Notation :

La notation en double indice pour les contraintes est interprétée comme suit :

- Le premier indice indique la direction de la normale à la face sur laquelle la composante de la contrainte est appliquée.
- Le second indice est relié à la direction de la contrainte elle-même. Les indices répétés seront simplifiés. En effet, les contraintes normales σ_{xx} , σ_{yy} et σ_{zz} seront notées

σ_x , σ_y et σ_z . Une face (ou un plan) est habituellement identifiée par l'axe qui est normal, e. g. la face x est perpendiculaire à l'axe x.

Convention de signe :

La convention de signe pour les contraintes se base sur la relation entre la direction de la normale sortante à une face et la direction de la contrainte appliquée sur la même face. La contrainte est positive si les deux directions coïncident. Sur cette base, toutes les contraintes représentées sur la figure 1.2 sont positives.

En considérant que $\varepsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{xz} = 0$, les équations (1.10) s'écrivent :

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \\ \tau_{xy} &= G\gamma_{xy}\end{aligned}\tag{1.13}$$

En considérant les relations cinématiques, les contraintes peuvent alors s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E z}{1-\nu^2}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right) \\ \sigma_y &= \frac{E z}{1-\nu^2}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right) \\ \tau_{xy} &= \frac{E z}{1+\nu} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\end{aligned}\tag{1.14}$$

I.4.1.4 Loi de comportement

En état plan de contraintes et pour des matériaux isotropes, hypothèse généralement admise pour le calcul des structures minces (poutres, plaques et coques), la loi de comportement s'écrit :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}\tag{1.15}$$

Afin d'aboutir à une théorie bidimensionnelle, il faut intégrer les distributions des contraintes à travers l'épaisseur pour les remplacer par leurs résultantes équivalentes qui sont les efforts intérieurs.

Détermination des moments de flexion M_x, M_y .

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} z \, dz \quad (1.16)$$

avec $M_{xy} = M_{yx}$. De même :

$$\begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \end{pmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{pmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} dz \quad (1.17)$$

La convention de signe pour les forces de cisaillement est la même que pour les contraintes de cisaillement. Un moment de flexion positif est celui qui produit des contraintes positives dans la moitié inférieure de la plaque.

En substituant les équations (1.14) dans les équations (1.16), nous obtenons les expressions suivantes pour les moments de flexion et de torsion en fonction de la flèche :

Ou bien sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = D \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{pmatrix} \quad (1.20)$$

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (1.18)$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$$

$$M_{xy} = -D(1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (1.19)$$

Le paramètre D étant la rigidité flexionnelle de la plaque.

$$D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)} \quad (1.21)$$

Avec E le module d'Young, h l'épaisseur de la plaque et ν le coefficient de poisson.

I.4.1.5 Equations d'équilibre d'une plaque

Les composantes des différentes contraintes (et leurs résultantes) varient généralement d'un point à l'autre d'une plaque chargée. Ces variations sont gouvernées par les équations d'équilibre de la statique.

Considérons un élément $dx dy$ de la plaque uniformément chargée de la (figure I.5).

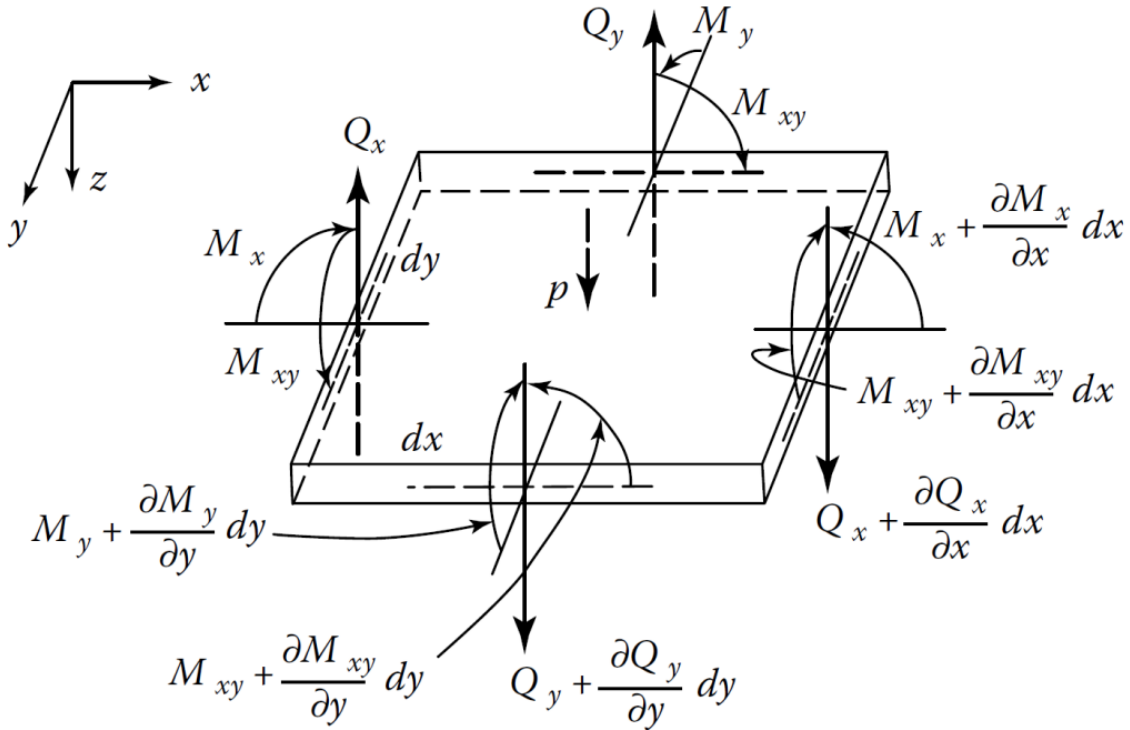


Figure I-5 : Résultantes positives et charge sur un élément de plaque

La somme des forces dans la direction z est nulle, ce qui s'écrit :

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} dx dy + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dx dy + p dx dy = 0 \tag{1.22}$$

Ce qui se traduit par :

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + p = 0 \tag{1.23}$$

L'équilibre des moments autour de l'axe x s'écrit :

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} dx dy + \frac{\partial M_y}{\partial y} dx dy - Q_y dx dy = 0 \tag{1.24}$$

Ce qui donne :

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} - Q_y = 0 \tag{1.25}$$

Dans ces expressions, le produit des quantités infinitésimales, comme le moment due à p et le moment due à la variation de Q_y sont omis.

De la même manière, l'équilibre des moments autour de l'axe y , nous permet d'écrire que :

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial M_x}{\partial x} - Q_x = 0 \quad (1.26)$$

Finalement, en introduisant les expressions de Q_x et Q_y nous obtenons :

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -p \quad (1.27)$$

Cette expression représente l'équation différentielle de l'équilibre des plaques minces.

Les expressions des forces de cisaillement peuvent alors s'écrire en fonction de la flèche w , en se basant sur les équations (1.25) et (1.26) :

$$\begin{aligned} Q_x &= -D \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ Q_y &= -D \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \end{aligned} \quad (1.28)$$

Remarque :

On a trois équations d'équilibre pour cinq grandeurs inconnues ($M_x, M_y, M_{xy}, Q_x, Q_y$). Le problème est hyperstatique et pour lever l'indétermination il faut tenir compte des déformations.

L'équation différentielle qui gouverne la flexion des plaques peut être obtenue en utilisant les résultats des sections précédentes. Introduisons les expressions de M_x, M_y et M_{xy} dans l'équation (1.27), nous obtenons :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{D} \quad (1.30)$$

Cette équation présentée par Lagrange en 1811, peut s'écrire sous la forme compacte suivante

$$\nabla^4 w = \frac{p}{D} \quad (1.31)$$

L'équation de Lagrange est l'équation différentielle gouvernante de la flexion des plaques minces. Pour déterminer la flèche w , il est nécessaire d'intégrer cette équation en utilisant les conditions aux limites appropriées.

I.4.1.6 Energie de Déformation

L'énergie potentielle totale s'écrit :

$$U = \frac{1}{2} \int_V \{\sigma\}^T \{\varepsilon\} dV \quad (1.32)$$

En tenant compte des équations de σ et ε

$$U = \frac{1}{2} \int_V \left(z \sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + z \sigma_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2z \tau_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \cdot dV \quad (1.33)$$

Puisque $\sigma_z = 0$, les relations contrainte-déformation prennent la forme suivante

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \quad (1.34)$$

En substituant (1.34) dans (1.32), on obtient

$$U = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} dV \quad (1.35)$$

I.5 Théorie des plaques épaisses

La théorie des plaques de Mindlin ou théorie de la déformation en cisaillement de premier ordre pour les plaques inclut l'effet des déformations en cisaillement transversal [5]. Et cette théorie s'applique quand les rapports dimensions-épaisseur sont compris entre 4 et 20 ($0,25 < h/L < 0,05$) [3].

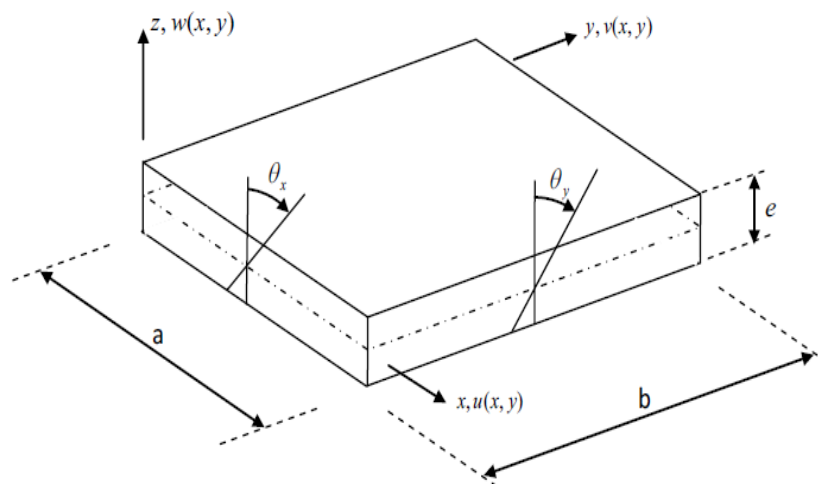


Figure I-6 : Plaques épaisses de côtés a, b .

I.5.1 Hypothèses pour l'étude des plaques épaisses

- 1) Les lignes normales au plan médian avant déformation restent droites mais pas forcément perpendiculaires à la surface moyenne après déformation à cause de l'effet du cisaillement transversale.
- 2) Ils ont également supposé que la contrainte normale σ_z est négligeable par rapport aux autres composantes du tenseur de contraintes (l'hypothèse de déformation plane).

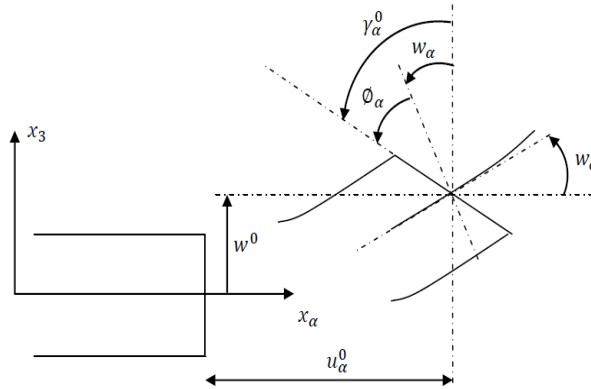


Figure I-7 : Cinématique de Reissner – Mindlin

Φ_α : La rotation de la normale au plan moyen autour des axes x.

$\gamma_\alpha^0 = (w_{,\alpha} + \Phi_{,\alpha})$: la déformation en cisaillement transversal mesurée sur le plan moyen.

I.5.2 Relations cinématiques

I.5.2.1.1 Champs de déplacement

Dans la théorie de Hencky-Mindlin, (prise en compte du cisaillement transversal), on se donne un modèle de déplacements basé sur trois variables indépendantes :

le déplacement transversal $w(x, y)$ et les deux rotations $\beta_x(x, y)$ et $\beta_y(x, y)$

Le champ des déplacements s'exprime alors en fonction de ces trois variables par la relation suivante :

$$\begin{aligned}
 u(x, y, z) &= u_0(x, y) + z \beta_x(x, y) = z \beta_x \\
 v(x, y, z) &= v_0(x, y) + z \beta_y(x, y) = z \beta_y \\
 w(x, y, z) &= w_0(x, y)
 \end{aligned}
 \tag{1.36}$$

I.5.2.1.2 Champs de déformation

L'état de déformation en coordonnées cartésiennes est défini par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\
 \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\
 2\varepsilon_{xy} = \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\
 2\varepsilon_{xz} = \gamma_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\
 2\varepsilon_{yz} = \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}
 \end{aligned} \tag{1.37}$$

Après substitution des déplacements dans (1.37), nous obtenons les composantes du tenseur de déformations en fonction des trois degrés de liberté w, β_x, β_y :

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= z \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \\
 \varepsilon_y &= z \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \\
 \gamma_{xy} &= z \left(\frac{\partial \beta_x}{\partial x} + \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \right) \\
 \gamma_{xz} &= \beta_x + \frac{\partial w}{\partial x} \\
 \gamma_{yz} &= \beta_y + \frac{\partial w}{\partial y}
 \end{aligned} \tag{1.38}$$

Le vecteur de déformation peut être décomposé en deux parties, l'une indépendante de z traduisant les déformations de cisaillement notée $\{\varepsilon_c\}$ ou $\{\gamma\}$, et l'autre partie $\{\varepsilon_f\}$ dépendante de z représente les déformations de flexion :

$$\{\varepsilon\} = \left\{ \{\varepsilon_f\}^T, \{\varepsilon_c\}^T \right\}^T = \{z\{x\}^T, \{\gamma\}^T\}^T \tag{1.39}$$

$$\{\varepsilon_f\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \end{Bmatrix} = z\{x\} \quad \{\varepsilon_c\} = \{\gamma\} \begin{Bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \beta_x + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \beta_y + \frac{\partial w}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (1.40)$$

Avec :

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta_x}{\partial y} + \frac{\partial \beta_y}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (1.41)$$

$\{x\}$: est le vecteur des variations de courbure.

D'où on peut écrire :

$$\{\bar{\varepsilon}\} = \{\{x\}^T, \{\gamma\}^T\}^T \quad (1.42)$$

I.5.3 Relations contraintes-déformations

Nous considérons les relations linéaires entre les contraintes et les déformations (loi de Hooke généralisée). Pour les matériaux orthotropes, la relation liant les contraintes aux déformations s'écrit :

$$\{\sigma\} = [C] \{\varepsilon\} \quad (1.43)$$

Telle que :

[C] : matrice de constantes élastiques.

Lorsque le cisaillement transversal est pris en considération, le vecteur de contraintes peut être également décomposé en une contribution de cisaillement $\{\sigma_c\}$, et une contribution de flexion $\{\sigma_f\}$.

$$\begin{Bmatrix} \{\sigma_f\} \\ \{\sigma_c\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [C_f] & [0] \\ [0] & [C_c] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\varepsilon_f\} \\ \{\gamma\} \end{Bmatrix} \quad (1.44)$$

$$\{\sigma_f\} = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}\}^T \quad \{\sigma_c\} = \{\sigma_{xz}, \sigma_{yz}\}^T \quad (1.45)$$

Les relations constitutives linéaires sont [6]:

$$[C_f] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \quad [C_c] = \begin{bmatrix} Q_{44} & 0 \\ 0 & Q_{55} \end{bmatrix} \quad (1.46)$$

Les coefficients de rigidité Q_{ij} peut être exprimée par :

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{21} \nu_{12}} \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12} E_2}{1 - \nu_{21} \nu_{12}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{21} \nu_{12}} \quad (1.47)$$

$$Q_{44} = Q_{55} = Q_{66} = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Avec ;

$$Q_{66} = G_{12} \quad Q_{44} = G_{13} \quad Q_{55} = G_{23}$$

Tels que :

E_1 : Module de Young dans la direction (x).

E_2 : Module de Young dans la direction (y).

ν_{12}, ν_{21} : Coefficients de poisson.

G_{12}, G_{13}, G_{23} : Modules de cisaillement.

I.5.4 Relations efforts résultants-déformations

Pour la conception et le calcul des éléments de la mécanique, il est souvent intéressant de connaître les efforts de résistance des matériaux. Les moments résultants de flexion sont :

$$\{M\} = \begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} z \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}\}^T dz = [D_f] \{x\} \quad (1.48)$$

Les efforts tranchants sont :

$$\{Q\} = \begin{Bmatrix} Q_X \\ Q_Y \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \{\sigma_{xz}, \sigma_{yz}, \dots\}^T dz = [D_c] \{y\} \quad (1.49)$$

Pour une plaque constituée d'un seul matériau orthotrope, on a

$$[D_f] = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{21} \nu_{12}} & \frac{E_2 \nu_{12}}{1 - \nu_{21} \nu_{12}} & 0 \\ \frac{E_2 \nu_{12}}{1 - \nu_{21} \nu_{12}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{21} \nu_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}; [D_c] = hk \begin{bmatrix} G_{13} & 0 \\ 0 & G_{23} \end{bmatrix} \quad (1.50)$$

Avec :

K : Coefficient de correction de cisaillement transversal.

$[D_f]$: Matrice de rigidité à la flexion.

$[D_c]$: Matrice de rigidité cisaillement transversal.

Pour des plaques constituées d'un matériau isotrope.

$$[D_f] = \frac{E h^3}{12(1 - \nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} \end{bmatrix}; [D_c] = \frac{Eek}{2(1 + \nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.51)$$

I.5.5 Energie de déformation

En tenant compte de cisaillement transversal l'énergie de déformation s'écrit sous la forme

$$U = U_F + U_C \quad (1.52)$$

U_F : énergie de déformation de flexion

U_C : énergie de déformation de cisaillement l'énergie de déformation de flexion et celle de cisaillement sont évaluées par :

$$U_F = \frac{1}{2} \int_S \{K\}^T [D_f] \{K\} dx dy \quad (1.53)$$

$$U_C = \frac{1}{2} \int_S \{\tau\}^T [D_\tau] \{\tau\} dV = \frac{1}{2} \int_V \{\gamma\}^T [D_\tau] \{\gamma\} dV \quad (1.54)$$

Ou D_τ Matrice constitutive de cisaillement tel que $\{\tau\} = [D_\tau] \{\gamma\}$

La prise en compte du cisaillement transverse dépend de facteurs de correction déterminés a priori par des équivalences énergétiques des modèles tridimensionnels, ou de fréquence propre associée au mode de vibration par cisaillement transverse. Ceci est fait de façon à ce que la rigidité en cisaillement transverse du modèle de plaque soit la plus proche

possible de celle définie par la théorie de l'élasticité tridimensionnelle. Ainsi le calcul de la matrice $[D_C]$ en fonction $[D_\tau]$ de s'effectue généralement en adoptant certain hypothèses sur la répartition de cisaillement suivant l'axe z , dans le cas général, on écrira l'expression suivante :

$$[D_C] = kh [D_\tau] \quad (1.55)$$

Avec k : Facteur de correction de cisaillement.

$$w = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T \cdot \{\sigma\} \cdot dV = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon_f\}^T \cdot \{\sigma_c\} \cdot dV + \frac{k}{2} \int_V \{\varepsilon_c\}^T \cdot \{\sigma_c\} \cdot dV \quad (1.56)$$

Ce coefficient k est généralement pris égal à $5/6$ ce qui correspond à la section d'effort tranchant d'une section rectangulaire. Cela signifie que la théorie de Henky-Mindlin s'apparente à celle de Timoshenko relative aux poutres avec cisaillement transverse.

I.6 Formulation en statique linéaire

On aboutit, dans le cas de la formulation en statique et élasticité linéaire, au système

D'équations :

$$[K] \{q\} = \{F\} \quad (1.57)$$

$[K]$: représente la matrice de rigidité de la structure.

$\{q\}$: vecteur de déplacements nodaux.

$\{F\}$: vecteur chargement extérieur.

Le théorème qui conduit à la relation (1.57), dans le cas d'une approche de type

<< déplacement >>, est celui des travaux virtuels [7].

I.6.1 Principe des travaux virtuels

Soit un corps solide en équilibre sous l'action de forces : de volume de f_i^V , de surface f_i^S , et des forces concentrées Q_i . Considérons un champ de déplacement virtuel δu_i cinématiquement admissible.

Le théorème des travaux virtuels [7] [8] exprime le bilan des travaux virtuels interne et externe, lorsque le corps est en équilibre :

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV = \int_V f_i^V \delta u_i dV + \int_S f_i^S \delta u_i dS + Q_i \delta u_i \quad (1.58)$$

V : est le volume du corps ;

S : la surface extérieure du corps où les forces surfaciques sont appliquées ;

f_i^V : Forces volumiques ;

f_i^S : Forces surfaciques appliquées à la surface extérieure S du corps ;

Q_i : Forces concentrées ;

σ_{ij} : Tenseur des contraintes ;

ε_{ij} : Tenseur des déformations infinitésimales.

Sous forme matricielle, nous avons :

$$\int_V \langle \delta \varepsilon \rangle \{ \sigma \} dV = \int_V \langle \delta u \rangle \{ f_V \} dV + \int_V \langle \delta u \rangle \{ f_S \} dS + \sum_i \langle \delta u_i \rangle \{ Q_i \} \quad (1.59)$$

$\langle \varepsilon \rangle$: Vecteur des déformations, transposé ;

$\{ \sigma \}$: Vecteur des contraintes ;

$\langle u \rangle$: Vecteur des déplacements, transposé ;

$\{ f_V \}$: Vecteur des forces volumiques ;

$\{ f_S \}$: Vecteur des forces surfaciques ;

$\{ Q_i \}$: Vecteur des forces concentrées.

On peut introduire la fonctionnelle énergie potentielle totale V , et le principe du travail virtuel s'écrit :

$$\delta U = \delta W$$

Où :

$$\delta V = \delta(U - W) = 0 \quad (1.60)$$

Avec :

V : Énergie potentielle totale.

U : Énergie de déformation.

W : Travail des forces appliquées

I.6.2 Discrétisation du champ de déplacements

Nous considérons des éléments de type quadrilatère auxquels nous appliquons la formulation iso paramétrique.

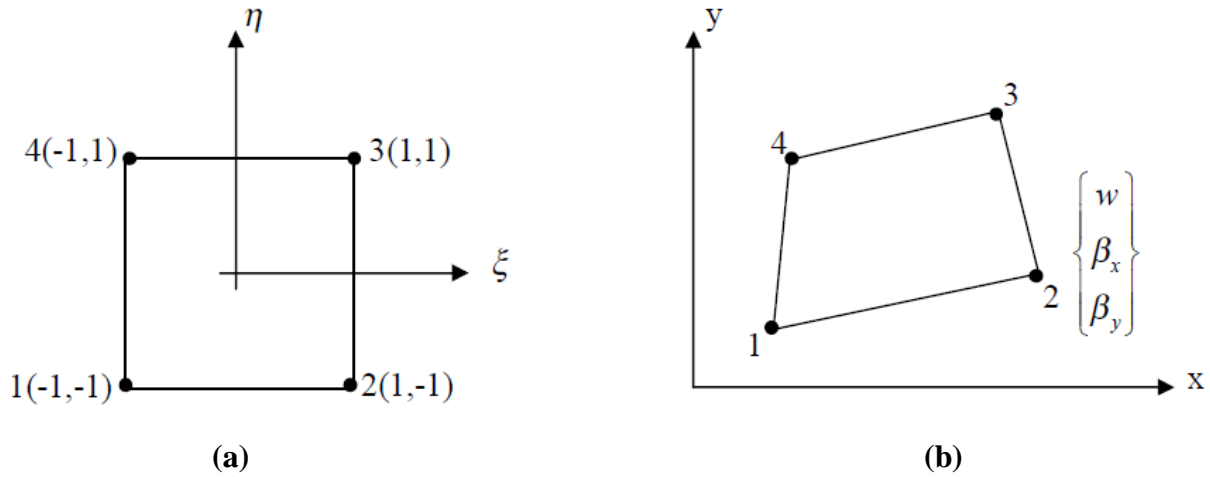


Figure I-8 : (a) Coordonnées intrinsèques Elément parent et (b) Coordonnées physiques : élément iso paramétrique

Pour tout élément iso paramétrique quadrilatéral à quatre nœuds nous avons les approximations suivantes :

$$\begin{aligned}
 x &= [N]^T (\xi, \eta) \{Y\} \\
 y &= [N]^T (\xi, \eta) \{X\} \\
 w &= [N]^T (\xi, \eta) W \\
 \beta_x &= [N]^T (\xi, \eta) \hat{\beta}_x \\
 \beta_y &= [N]^T (\xi, \eta) \hat{\beta}_y
 \end{aligned}
 \tag{1.61}$$

Où :

$$\begin{aligned}
 W &= \sum_{i=1}^{n_e} N_i w_i \\
 \beta_x &= \sum_{i=1}^{n_e} N_i \beta_{xi} \\
 \beta_y &= \sum_{i=1}^{n_e} N_i \beta_{yi}
 \end{aligned}
 \tag{1.62}$$

n_e : indique le nombre de nœuds par élément.

Les fonctions d'interpolation utilisées sont les fonctions d'interpolation habituelles des quadrilatères iso paramétriques.

Dans le cas du quadrilatère linéaire, on a :

$$N^T = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \quad (1.63)$$

$$N_i(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i) \quad (1.64)$$

Avec :

ξ_i ou η_i : prenant les valeurs (+1) ou (-1) suivant le nœud considéré.

$$w = \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{Bmatrix} \quad \hat{\beta}_x = \begin{Bmatrix} \hat{\beta}_{x1} \\ \hat{\beta}_{x2} \\ \hat{\beta}_{x3} \\ \hat{\beta}_{x4} \end{Bmatrix} \quad \hat{\beta}_y = \begin{Bmatrix} \hat{\beta}_{y1} \\ \hat{\beta}_{y2} \\ \hat{\beta}_{y3} \\ \hat{\beta}_{y4} \end{Bmatrix} \quad (1.65)$$

$$X = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{Bmatrix} \quad Y = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{Bmatrix} \quad (1.66)$$

I.6.3 Discrétisation du champ de déformations

Par substitution de (1.61), dans les relations de déformations (1.40) et (1.41), on obtient les matrices d'interpolation des déformations de flexion et de cisaillement :

$$\{x\} = \{\bar{\varepsilon}_f\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \beta_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \beta_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \beta_x}{\partial y} + \frac{\partial \beta_y}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial N^T}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N^T}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial N^T}{\partial y} & \frac{\partial N^T}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W \\ \hat{\beta}_x \\ \hat{\beta}_y \end{Bmatrix} \quad (1.67)$$

$$\{\varepsilon_c\} = \{\gamma\} = \begin{Bmatrix} \beta_x + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \beta_y + \frac{\partial w}{\partial y} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N^T}{\partial x} & N^T & 0 \\ \frac{\partial N^T}{\partial y} & 0 & N^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} W \\ \hat{\beta}_x \\ \hat{\beta}_y \end{Bmatrix} \quad (1.68)$$

Soit :

$$\{x\} = \{\bar{\varepsilon}_f\} = [\bar{\beta}_f]\{q\} \quad \{\gamma\} = [\beta_\gamma]\{q\} \quad (1.69)$$

Ou :

$$[\bar{\beta}_f] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial N^T}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N^T}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial N^T}{\partial y} & \frac{\partial N^T}{\partial x} \end{bmatrix} \quad [\beta_\gamma] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N^T}{\partial x} & N^T & 0 \\ \frac{\partial N^T}{\partial y} & 0 & N^T \end{bmatrix} \quad (1.70)$$

I.6.4 Matrice de rigidité :

L'expression de l'énergie de déformation permet de calculer la matrice de rigidité, soit :

$$U = U_F + U_C$$

$$\frac{1}{2} \int_{V_e} \{\varepsilon_f\}^T \{\sigma_f\} dV + \frac{1}{2} \int_{V_e} \{\gamma\}^T \cdot \{\sigma_c\} \cdot dV \quad (1.71)$$

$$\frac{1}{2} \int_{S_e} \{x\}^T [D_f] \{x\} dx dy + \frac{1}{2} \int_{S_e} \{\gamma\}^T \cdot [D_c] \{\gamma\} dx dy \quad (1.72)$$

Après substitution des expressions de déformations (1.69) dans l'énergie de déformation, nous obtenons :

$$U = U_F + U_C = \frac{1}{2} \{q\}^T \int [\bar{\beta}_f]^T [D_f] [\bar{\beta}_f] dx dy \{q\} + \frac{1}{2} \{q\}^T \int [\beta_\gamma]^T [D_c] [\beta_\gamma] dx dy \{q\} \quad (1.73)$$

D'où :

$$[K] = [K_f] + [K_c] = \int_{S_e} [\bar{\beta}_f]^T [D_f] [\bar{\beta}_f] dS + \int_{S_e} [\beta_\gamma]^T [D_c] [\beta_\gamma] dS \quad (1.74)$$

$$[K] = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [\bar{\beta}_f]^T [D_f] [\bar{\beta}_f] \det[J] d\xi d\eta + \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [\beta_\gamma]^T [D_c] [\beta_\gamma] \det[J] d\xi d\eta \quad (1.75)$$

[J] : est la matrice Jacobéenne de la transformation géométrique.

La matrice jacobéenne $[J. (\xi. \eta)]$ est :

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N^T}{\partial \xi} X & \frac{\partial N^T}{\partial \xi} Y \\ \frac{\partial N^T}{\partial \eta} X & \frac{\partial N^T}{\partial \eta} Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (1.76)$$

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x} \right\} = [j] \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \right\} \quad [j] = [J]^{-1} \quad (1.77)$$

$$[j] = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} \\ j_{21} & j_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{\det[J]} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \quad (1.78)$$

Les déformations $\{x\}$ et $\{y\}$ sont définies en fonction des variables nodales :

$$\{x\} = [\bar{\beta}_f] \{q\} \quad \{y\} = [\beta_\gamma] \{q\} \quad (1.79)$$

Avec :

$$[\bar{\beta}_f] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N^T}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N^T}{\partial y} \\ \frac{\partial N^T}{\partial y} & \frac{\partial N^T}{\partial x} \end{bmatrix} \quad \frac{\partial N^T}{\partial x} = j_{11} \frac{\partial N^T}{\partial \xi} + j_{12} \frac{\partial N^T}{\partial \eta} \quad (1.80)$$

$$[\beta_\gamma] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N^T}{\partial x} & N^T & 0 \\ \frac{\partial N^T}{\partial y} & 0 & N^T \end{bmatrix} \quad \frac{\partial N^T}{\partial y} = j_{21} \frac{\partial N^T}{\partial \xi} + j_{22} \frac{\partial N^T}{\partial \eta} \quad (1.81)$$

La matrice de rigidité $[K]$ est obtenue par intégration numérique de (1.75) de type Gauss.

L'intégrale peut être évaluée en utilisant la formule :

$$\int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} f(\xi. \eta) d\xi d\eta = \sum_{i=1}^{r_1} \sum_{j=1}^{r_2} W_i W_j f(\xi_i. \eta_j) \quad (1.82)$$

Où :

ξ_i, η_j : sont les coordonnées des points d'intégration.

W_i, W_j : sont les coefficients de pondérations (ou poids) correspondants.

Les intégrales de la matrice de rigidité et du vecteur force sont calculées par intégration numérique. L'intégrale de rigidité est résolue en considérant pour l'élément Q4, 2x2 points de Gauss pour la contribution à la flexion et 1 point pour la contribution au cisaillement.

Cette intégration sélective s'est avérée être l'un des remèdes les plus simples pour éviter le blocage en cisaillement [9] [10].

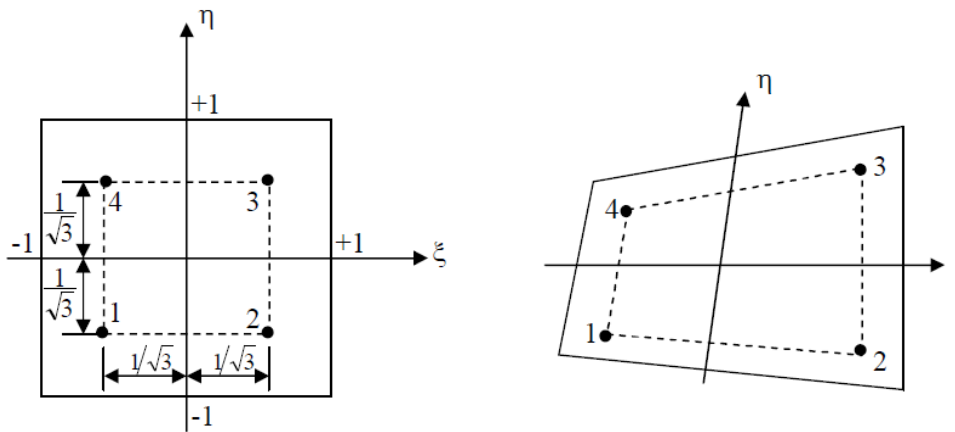


Figure I-9 : Intégration de Gauss (2x2) pour le quadrilatère

I.6.5 Vecteur charge équivalente

L'énergie potentielle des forces extérieures exprimée à l'aide des forces de surface et de volume, s'écrit :

$$W = \int_{V^e} \{u\}^{eT} \{f_v\} dV + \int_{S^e} \{u\}^{eT} \{f_s\} dS = \{q\}^{eT} \{F\}^e \quad (1.83)$$

Nous avons :

$$\{u\}^e = [N]^e \{q\}^e \quad (1.84)$$

$$W = \langle q \rangle^e \int_{V^e} [N]^{eT} \{f_v\} dV + \langle q \rangle^e \int_{S^e} [N]^{eT} \{f_s\} dS = \langle q \rangle^e \{F\}^e \quad (1.85)$$

D'où :

$$\{F\}^e = \int_{V^e} [N]^{eT} \{f_v\} dV + \int_{S^e} [N]^{eT} \{f_s\} dS \quad (1.86)$$

Pour une charge uniforme répartie $z.f$ suivant z , le vecteur des charges équivalentes associées aux variables W , a la forme habituelle :

$$\{F\}^e = \int_{V^e} [N]^e{}^T DS \quad (1.87)$$

I.7 Dynamique des structures sur les plaque

I.7.1 Formulation des équations de mouvement en dynamique linéaire

A partir du principe de Hamilton nous formulons l'équation différentielle du second ordre, caractérisant le mouvement de la structure au cours du temps, ensuite nous procédons à la construction des matrices de masse. Enfin, nous exposons la méthode de calcul utilisée (Méthode d'intégration directe de Newmark) pour la résolution du système d'équations différentielles du second ordre [8].

I.7.2 Formulation des équations de mouvement

Les équations de Lagrange permettent d'obtenir les équations du mouvement du système discret à partir des expressions des énergies cinétiques, potentielle et de dissipation.

Soit le Lagrangien : $L = T - V$

On a respectivement pour l'énergie cinétique T et l'énergie potentielle totale V :

$$T = \int_V \rho \dot{u}_i \dot{u}_i dV \quad (1.88)$$

$$V = U - W = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV - \int_V f_i^V u_i dV - \int_S f_i^S u_i dS \quad (1.89)$$

U : Energie de déformation.

W : Potentiel des forces conservatives de surface et de volume.

f_i^V : Forces de volume.

f_i^S : Forces surfaciques appliquées à la surface extérieure du corps.

L'approximation nodale pour le déplacement $\{u(t)\}$ d'un point quelconque d'un élément a pour expression :

$$\{u(x, y, z, t)\}^e = [N(x, y, z)]^e \{q(t)\}^e$$

On a de même pour la composante de vitesse :

$$\{\dot{u}(x, y, z, t)\}^e = [N(x, y, z)]^e \{\dot{q}(t)\}^e$$

On peut ainsi exprimer le Lagrangien à l'aide des déplacements aux nœuds q_i et de Leurs dérivées :

$$L = T(\dot{q}_i) - V(q_i) \quad (1.90)$$

Pour une structure sans amortissement, nous avons les équations d'Euler Lagrange suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (1.91)$$

Ou encore :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} F_i(t) \quad (1.92)$$

Avec :

$F_i(t)$: force définie par le travail virtuel des forces extérieures : $\delta W = F_i \delta q_i$

Pour les petits mouvements des systèmes élastiques, les énergies cinétiques et de déformation s'expriment comme suit [11] :

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \dot{q}_i M_{ij} \dot{q}_j = \frac{1}{2} \dot{q}^T M \dot{q} \quad (1.93)$$

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n q_i K_{ij} q_j = \frac{1}{2} q^T K q \quad (1.94)$$

Les équations de Lagrange deviennent alors :

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = \{F(t)\} \quad (1.95)$$

I.7.3 Matrice de masses élémentaires

L'expression de l'énergie cinétique permet de calculer la matrice masse :

$$T = \frac{1}{2} \int_{V_e} \rho \{\dot{U}\}^{e^t} \{\dot{U}\}^e dV = \frac{1}{2} \{\dot{q}\}^{e^t} [M]^e \{\dot{q}\}^e \quad (1.96)$$

On a :

$$\{\dot{U}\}^e = [N] \{\dot{q}\}^e \quad (1.97)$$

D'où :

$$T = \frac{1}{2} \{\dot{q}\}^{e^t} \int_{V_e} \rho [N]^T [N] dV \{\dot{q}\}^e \quad (1.98)$$

Avec :

$$[M]^e = \int_{V_e} \rho [N]^T [N] dV \quad (1.99)$$

$[M]^e$: Matrice de masse cohérente de l'élément e.

Chapitre II : Recherche bibliographique

II Chapitre 2 : Recherche Bibliographiques

II.1 Introduction

L'initiation et la propagation de l'endommagement dans les structures peuvent conduire à des défaillances catastrophiques. Par conséquent, en fournissant une évaluation des endommagements en temps opportun et en maintenant ainsi des performances élevées, l'identification précoce des endommagements joue un rôle essentiel dans l'exploitation des structures. Par conséquent, l'identification des endommagements a attiré l'attention de la communauté scientifique et de nombreuses recherches ont été menées au cours des deux dernières décennies.

Dans ce chapitre nous allons essayer d'introduire quelques méthodes de détection d'endommagement.

II.2 Détection et localisation de défauts

La détection de défauts s'effectue par comparaison des paramètres modaux correspondant respectivement à la structure saine (état de référence) et à la structure endommagée (état actuel). Il est possible d'évaluer de manière probabiliste le degré d'incertitude sur les paramètres modaux identifiés.

La localisation du dommage quant à elle peut être basée sur une analyse combinée du changement de raideur et de flexibilité de la structure, lesquelles sont estimées à partir des paramètres modaux identifiés [12].

II.3 Bibliographie des méthodes de détection et de localisation

La capacité de surveiller et de détecter une structure endommagée considérée comme une technique efficace pour améliorer la sécurité et réduire les coûts dans les industries aérospatiale, civile et mécanique.

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de l'endommagement comme les méthodes acoustiques ou à ultrasons, les méthodes de champ magnétique, la radiographie, la méthode des courants Foucault ou les méthodes de champ thermique (Doherty, 1997). Toutes ces techniques exigent que la proximité du dommage soit connue et que la partie de la structure à inspecter soit facilement accessible. Le besoin de méthodes quantitatives globales d'identification des

endommagements pouvant être appliquées à des structures complexes a conduit au développement et à la recherche de méthodes examinant les changements des caractéristiques vibratoires de la structure.

Plusieurs développements réalisés dans les années 1970 et au début des années 1980 sont utilisés dans l'industrie pétrolière offshore. Plus tard, les méthodes de détection d'endommagement à partir des réponses vibratoires sont approuvées et sont très utilisées pour de nombreux types de structures [13].

Selon Rytter 1993 [14], l'identification des endommagements peut être classée en quatre niveaux :

Niveau 1 : Détection

Niveau 2 : Localisation

Niveau 3 : Quantification

Niveau 4 : Evolution

- Le niveau 1 fournit uniquement l'information concernant la détermination de l'existence d'un endommagement dans la structure. Pour de nombreuses applications pratiques, cela est suffisant.
- Le niveau 2 consiste à déterminer l'emplacement ou la localisation de l'endommagement.
- Le niveau 3 consiste à quantifier la sévérité d'un endommagement. Cette étape fait appel à des modèles d'endommagement, détectés, localisés et classés, dont le but est de décrire l'endommagement par des paramètres, tels que la longueur de la fissure, le diamètre d'un impact, la taille d'un délaminage ou la diminution de la rigidité sur le comportement dynamique de la structure.
- Le niveau 4 a pour objectif de prédire l'évolution future de l'endommagement et d'estimer la durée de vie résiduelle de la structure. Cette étape nécessite une combinaison du modèle structurel global avec des modèles de lésions locales.

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

Dans ce qui va suivre, nous allons présenter quelques méthodes d'identification d'endommagements actuelles proposées dans la littérature, à savoir :

- Méthodes fondée sur changement de fréquence
- Méthodes fondées sur données modales

- Méthodes fondées la forme des modes
- Méthodes fondées sur les courbures modales
- Méthodes fondées sur la matrice de flexibilité
- Méthodes fondées sur le vecteur de force résiduelle
- Méthodes fondées sur la régularisation éparse d'impédance électromécanique

Les données des réponses vibratoires utilisées pour identifier l'endommagement peuvent être classées en 3 types différents :

- **Type 1** : deux essais vibratoires correspondant à deux états (l'état sain et l'état à vérifier). L'objectif est de comparer les 2 états pour vérifier s'il y a un défaut dans le deuxième état et ensuite le localiser et le quantifier
- **Type 2** : un essai vibratoire. L'endommagement apparaît pendant la mesure. L'objectif est de localiser le défaut en temps (trouver l'instant où apparaît le défaut) et le localiser en espace. Ces méthodes mettent en œuvre des techniques trop différentes de celles utilisées dans cette thèse.
- **Type 3** : une série d'essais au cours de la vie de la structure. L'endommagement n'apparaît pas pendant un essai mais entre deux essais successifs. L'objectif est de détecter le défaut en temps (à partir de quel essai le défaut apparaît) et le localiser en espace.

II.3.1 Méthode basée changement de fréquence

Les méthodes de détection des dommages employant la mesure des changements des fréquences sont basées sur le fait qu'un dommage réduit la rigidité locale de la structure et affecte ainsi ses fréquences de résonance.

Vandiver [15] a été le premier à examiner les changements de fréquences dus à la présence de dommages. (L'auteur) a remarqué jusqu'à 17% de changement de fréquence dans le premier mode en supprimant des membres d'un modèle numérique représentant une tour de phare offshore qu'il étudiait. Tandis qu'une diminution des fréquences modales est révélatrice d'un endommagement, le vrai problème inverse consiste non seulement à identifier qu'un endommagement existe mais aussi à déterminer sa localisation et sa taille. Pour caractériser complètement l'endommagement en résolvant le problème inverse, deux approches différentes sont utilisées : la technique de mise à jour du modèle et l'approche analytique.

Dans l'approche basée sur un modèle, un modèle numérique est développé dont les caractéristiques dynamiques correspondent parfaitement à celles de la structure non endommagée. Ensuite, les raideurs des éléments du modèle non endommagé sont progressivement altérées jusqu'à obtenir un bon accord avec les réponses mesurées sur la

structure endommagée [16]. A noter que l'endommagement est modélisé comme une variation de la raideur des éléments locaux. Lorsque la réponse du modèle endommagé correspond à celles de la structure endommagée, l'emplacement de l'endommagement et la réduction de rigidité représentant la gravité de l'endommagement sont connus. L'approche analytique consiste à modéliser la fissure en tant que discontinuité de rigidité et à dériver théoriquement les fréquences de résonance de la structure fissurée. Ces équations sont à nouveau utilisées pour résoudre le problème inverse de la caractérisation de l'endommagement à partir des réponses dynamiques mesurées.

L'investigation systématique de changement de fréquence dans la détection d'endommagement peut être attribuée à Adam et al [17]. En partant du principe que le changement de raideur est indépendant de celui des fréquences, le rapport de changement de fréquence en deux modes est fonction seulement de la localisation de l'endommagement.

Kessler [18].a dit que les endommagements changent la rigidité et la masse de la structure. Ce qui se traduit, en général, par une modification des fréquences propres de cette structure. Ainsi, certains endommagements peuvent être détectés en surveillant les fréquences propres d'une structure. Ces fréquences propres peuvent être mesurées en utilisant un nombre de capteurs limité, mais cette mesure reste très sensible aux perturbations. Parmi ces perturbations, citons : la sensibilité aux changements de température, la masse non négligeable des capteurs, les conditions limites.

Nicholson et Alnefaie [19] ont introduit un autre paramètre sensible à l'endommagement nommé l'indice du moment modal (Modal Moment Index MMI), qui extrait des paramètres modaux expérimentaux. L'indice a un changement brusque à l'endroit de l'endommagement et peut servir à le quantifier.

Humar et al, [20]. Cette facilité et rapidité de mesure explique que cette méthode soit la plus souvent mise en œuvre, cependant une modification de la fréquence n'implique pas automatiquement l'existence des endommagements. En effet, la présence de bruit de mesures vient compliquer la prise de décision ou masquer certaines modifications. Ainsi, les bruits de mesures peuvent causer des changements de fréquences de grandeurs semblables à celles produites par des endommagements.

En résolvant un problème inverse des trois premières fréquences naturelles, Chaudhari et Maiti [21] ont utilisé la technique Frobenius qui gouverne des équations différentielles, et ont obtenu ainsi la localisation du défaut par une approche semi-numérique.

Chakraverty et al. [22] et Leandro et al. [23] ont étudié l'effet de la non-homogénéité et de différents paramètres sur les fréquences naturelles de vibration pour la détection d'endommagement des plaques.

II.3.2 Méthodes basée sur données modales

Au cours des dernières décennies, diverses méthodes basées sur des données modales ont été introduites pour identifier et localiser les dommages dans les structures.

Pandey et al. [24] ont montré que la courbure de la forme modale est un paramètre sensible à l'endommagement.

Wu et Law [25] ont développé le concept de courbure de mode dans deux directions pour les structures de plaques.

Lee et Eun [26] ont utilisé la forme modale et ses dérivés, obtenus à partir des résultats d'essais expérimentaux statiques et dynamiques, pour examiner le comportement structurel dans diverses conditions d'endommagement.

Whalen [27] a utilisé des dérivées de forme de mode d'ordre supérieur pour détecter les dommages sur un faisceau simple.

Nicknam et Hosseini [28] ont proposé une nouvelle méthode basée sur les changements de fréquences naturelles et de formes modales de la plaque endommagée en utilisant une approche d'optimisation appelée algorithme de compétition coloniale .

Bai et al. [29] a appliqué la technique de courbure de forme de mode pour des structures de grille planes à deux dimensions.

Katunin [30] a proposé un indice de dommage basé sur l'analyse modale des structures endommagées et une analyse plus poussée des ondelettes des formes de mode acquises en utilisant des ondelettes en quinconce non séparables .

De plus, l'indice de dommages proposé est comparé aux indices de dommages proposés introduits par Abdel Wahab et De Roeck [31] ainsi qu'à celui de Yazdanpanah et al. [32] pour montrer la capacité de l'indice parmi les autres. Ce document est organisé comme suit; la section suivante est un aperçu des méthodes de détection des dommages basées sur la réponse dynamique. Ensuite, après une brève description de la théorie de la plaque, le processus d'obtention de l'indice de dommage proposé basé sur la forme du mode et ses dérivées est présenté. Par la suite, l'indice présenté est validé et son efficacité est démontrée à travers quelques exemples. La section finale contient quelques conclusions qui conviennent à l'identification des dommages dans les structures en forme de plaque.

II.3.2.1 Méthodes basées sur la forme des modes

L'une des réponses dynamiques sensibles aux dommages est la forme des modes qui présente une caractéristique unique de l'amplitude d'une structure mécanique pour chaque fréquence de résonance.

Cela implique que tout dommage local peut modifier les formes de mode. Par conséquent, les changements de formes de mode avant et après les dommages peuvent être utilisés comme un critère d'identification des dommages.

Allemang et Brown 1983 [33] ont présenté une méthode, appelée "modal assurance criterion" (MAC) se basant sur la comparaison entre 2 suites de déformées modales correspondant à 2 états différents, pour détecter l'endommagement. Le coefficient MAC est considéré comme l'indice de similarité entre 2 modes. Supposons que φ^A de taille $n \times m_A$ et φ^B de taille $n \times m_B$ représentent 2 collections des déformées modales correspondant aux 2 états différents où n est le nombre de degrés de liberté, m_A et m_B le nombre des modes à considérer de l'état A et B. Le coefficient MAC est défini par :

$$MAC_{j,k} = \frac{|\sum_{i=1}^n \varphi_{i,j}^A \varphi_{i,k}^B|^2}{\sum_{i=1}^n (\varphi_{i,j}^A)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (\varphi_{i,k}^B)^2} \quad (\forall j = 1, \dots, m_A \quad k = 1, \dots, m_B) \quad (2.1)$$

La valeur $MAC_{j,k}$ peut être utilisée comme un indicateur d'endommagement. Lorsque le coefficient MAC est égal à 1, les deux modes sont parfaitement corrélés ; au contraire lorsque le coefficient MAC est égal à 0, les deux modes sont complètement décorrélés.

Lieven et Ewins [34].ont proposé l'indicateur "co-ordinate modal assurance criterions (COMAC) "en un point i situé entre deux ensembles de formes modales est donné par la formule suivante :

$$COMAC_{(i)} = \frac{|\sum_{j=1}^m \varphi_{i,j}^A \varphi_{i,j}^B|^2}{\sum_{j=1}^m (\varphi_{i,j}^A)^2 \cdot \sum_{j=1}^m (\varphi_{i,j}^B)^2} \quad (\forall i = 1, \dots, m) \quad (2.2)$$

$(\varphi^A)_{ij}$ et $(\varphi^B)_{ij}$ Désignent la valeur des déplacements modaux pour le j mode en un point i pour les états A et B, respectivement.

II.3.2.2 Méthodes basées sur les courbures modales

Les dérivées de la forme de mode telles que la courbure sont largement utilisées comme alternative aux méthodes de détection de dommages basées sur les changements de forme de mode qui peuvent être traités pour obtenir des informations sur les changements de vibration.

Pandey et al. [13] ont indiqué que le changement absolu de la courbure de la forme de mode peut être un indice efficace pour identifier les défauts dans les structures. La méthode des différences finies centrales a été utilisée pour obtenir la courbure en un point de la structure

$$\phi''_{i,j} = \frac{\phi_{i-1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j}}{h^2} \quad (2.3)$$

Où h est la distance entre les points de mesure. $\phi_{i,j}$ est défini comme les déplacements modaux du $i^{\text{ème}}$ nœud dans le j mode. La courbure modale (MSC) définie par Pandey et al. [13] est donné par :

$$MSC_i = \sum_{j=1}^k \left| (\phi_{i,j}^{\text{damaged}})'' - (\phi_{i,j}^{\text{undamaged}})'' \right| \quad (2.4)$$

Où k définit le nombre de modes considérés. Alternativement, pour considérer l'effet des modes supérieurs pour détecter des dommages multiples, Abdel Wahab et De Roeck ont proposé le facteur de dommage de courbure (CDF) [35].

$$CDF_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \left| (\phi_{i,j}^{\text{damaged}})'' - (\phi_{i,j}^{\text{undamaged}})'' \right| \quad (2.5)$$

La forme normalisée de CDF, qui est utilisée à des fins de comparaison, est décrite comme suit :

$$nCDF_i = \max \left[0, \left(\frac{CDF_i - \text{mean}(CDF)}{\text{std}(CDF)} \right) \right] \quad (2.6)$$

$\text{mean}(CDF)$ et $\text{std}(CDF)$ représentent la moyenne et l'écart type du CDF dans tous les nœuds..

II.3.3 Méthode basées sur la matrice de flexibilité

La matrice de flexibilité est considérée comme la plus appropriée car elle peut être estimée avec précision en utilisant uniquement les modes de vibration les plus faibles, et peut être extrêmement sensible aux dommages. Comme la matrice de flexibilité est définie comme l'inverse de la matrice de rigidité, chaque colonne représente le déplacement causé par une force d'unité appliquée à un degré de liberté.

La matrice de flexibilité peut être estimée à partir des modes propres normalisés par rapport à la matrice de masse et les fréquences propres correspondantes :

$$S = \varphi \Omega i^{\text{ème}} e^{-1} \varphi^T = \sum_{i=1}^n \frac{1}{w_i^2} \varphi_i \varphi_i^T \quad (2.7)$$

Où w_i est la $i^{\text{ème}}$ pulsation propre de la structure. Ω est la matrice diagonale des valeurs propres représentant la matrice diagonale des rigidités modales donnée par :

$$\Omega = \text{diag}(w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (2.8)$$

φ_i représente $i^{\text{ème}}$ mode propre (forme de mode) et φ est la matrice des modes propres donnée par :

$$\varphi = [\varphi_1 \varphi_2 \dots \varphi_n] \quad (2.9)$$

En considérant l'expression (2.7), nous constatons qu'avec l'augmentation de la pulsation, la contribution modale de la matrice de flexibilité diminue, c'est-à-dire qu'en augmentant le nombre de fréquences, la matrice de flexibilité converge rapidement. L'identification d'endommagements en utilisant la matrice de flexibilité est plus sensible avec le changement des modes basses fréquences, c'est-à-dire en utilisant les premiers modes de vibration de la structure.

Afin de déterminer les dommages dans les structures en forme de plaque, Kim et al. [36, 37] ont présenté un indice basé sur les caractéristiques de flexion, puisqu'il existe une relation linéaire entre les courbures de flexibilité et les dommages de flexion, c'est-à-dire :

$$\Theta \beta = \tilde{\kappa} \quad (2.10)$$

β est le vecteur d'indice d'endommagement inconnu, est $\tilde{\kappa}$ le vecteur de courbure. Θ La matrice représente les courbures de la structure non endommagées, calculées à l'aide des vecteurs de flexibilité modaux.

Li et all [38] ont mis une approche basée sur le changement de la matrice de flexibilité modale généralisée. Cette dernière réduit l'effet de troncature des modes d'ordre supérieur par rapport à l'approche non généralisée.

Reynders et all [39] ont proposé une méthode basée sur la flexibilité quasi-statique, la matrice de flexibilité modale est combinée avec des forces virtuelles qui causent des contraintes non nulles sur des parties de la structure, d'où le changement de raideur.

La variation de flexibilité modale a été utilisée par Kazemi et al. [40] pour détecter les endommagements sur des plaques minces. L'indicateur d'endommagement est formulé à partir de la matrice de flexibilité modale et des équations différentielles de variation des efforts.

II.3.4 Méthode basée sur le vecteur de force résiduelle

Le vecteur de force résiduelle est largement utilisé dans de nombreuses méthodes de détection de dommages utilisant une modification de matrice optimale.

Ricles et Kosmatka [41] ont utilisé les forces résiduelles pour identifier l'emplacement et la gravité des endommagements. En combinant les données modales mesurées avec le modèle structurel associé, ils ont appliqué les vecteurs forces résiduelles pour déterminer l'emplacement possible des endommagements.

Chen et al. [42] ont avancé une théorie pour évaluer l'occurrence, la localisation et l'étendue des dommages potentiels à l'aide de mesures de réponse en orbite. Cette méthode détecte les dommages en utilisant la solution de norme minimale de l'équation de la force résiduelle.

Zimmerman et al. [43] a utilisé une théorie de mise à jour de rang minimum pour détecter les dommages structurels. Les sites de dommages sont localisés d'abord par le vecteur de force résiduelle et les étendues de dommages sont évaluées par la théorie de mise à jour de rang minimum.

Doebling [44] a amélioré cette méthode et présenté une nouvelle technique appelée mise à jour élémentaire de rang minimum en calculant les mises à jour de rang minimum directement aux paramètres de rigidité élémentaire.

Leandro et al. [45] et Damir et al. [46]. Chiang et al. [47] ont présenté une méthode de détection des dommages structurels en deux étapes. Le vecteur de force résiduelle est utilisé pour localiser les dommages de manière préliminaire et la méthode d'évolution simulée est utilisée pour déterminer l'étendue des dommages.

Liu et Yang [48] ont utilisé la matrice de forme de mode et la matrice de force résiduelle pour déterminer le nombre d'éléments endommagés et localisé les éléments de dommage par la matrice de localisation des dommages. Et les étendues de dégâts peuvent être facilement obtenues.

Mares et Surace [49] ont proposé un algorithme génétique pour identifier les dommages dans les structures élastiques. La localisation et la quantification de l'étendue des dommages sont effectuées avec des techniques génétiques mises en œuvre en utilisant la méthode de la

force résiduelle, qui est basée sur la théorie classique de l'analyse modale. En bref, ces méthodes ci-dessus commencent toutes par le vecteur de force résiduelle mais utilisent des techniques différentes pour obtenir l'étendue des dommages, de sorte que la précision du vecteur de force résiduelle est très importante pour ces méthodes. La méthode de la norme minimale s'est avérée irréalisable dans l'identification des dommages en pratique car l'équation de la force résiduelle est mal conditionnée avec les bruits de mesure, tandis que les techniques de mise à jour du rang minimal ne peuvent obtenir de meilleurs résultats que lorsque le nombre de modes utilisés dans le calcul est égal au rang de matrice perturbée.

II.3.5 Méthode basée sur la régularisation éparse d'impédance électromécanique

Cette méthode est généralement appelée méthode basée sur l'impédance électromécanique (EMI). Par rapport aux méthodes SHM globales traditionnelles basées sur les informations modales, telles que les fréquences naturelles et les déformées modales, la méthode EMI est beaucoup plus sensible aux dommages structurels à plus petite échelle en raison de sa fréquence de travail élevée [50].

Soleil, et al. [51] ont présenté une méthode de détection des dommages basée sur la signature d'impédance du domaine fréquentiel utilisant la déviation quadratique moyenne (RMSD) pour décrire une telle différence.

Plus tard, le coefficient de corrélation (CC) entre les signatures d'impédance a été calculé pour refléter la gravité des dommages par Raju [52]. Tseng et Naidu [53] ont comparé les performances de l'utilisation d'indicateurs de dommages non paramétriques, à savoir RMSD, CC, écart moyen absolu en pourcentage (MAPD) et covariance (Cov), pour la surveillance basée sur les interférences électromagnétiques avec des enquêtes expérimentales sur des échantillons d'aluminium. Il a été constaté que le RMSD montre une sensibilité plus élevée à la nouvelle occurrence de dommage que les trois autres métriques.

Xu [54] a étudié le modèle d'impédance général et développé une méthode de détection des dommages en utilisant une programmation évolutive. Cependant, il y avait un écart non négligeable entre la signature d'impédance mesurée et le résultat de la simulation du modèle générique bidimensionnel (2D).

Wang et Tang [55] ont développé un modèle d'éléments spectraux pour identifier à la fois l'emplacement et la gravité des dommages structurels. L'efficacité de la méthode proposée a été vérifiée par des études expérimentales. Néanmoins, cette méthode de modélisation

numérique 2D avec une précision et une efficacité de calcul élevées n'est applicable qu'à des structures simples.

Plus tard, une méthode d'éléments finis spectrale tridimensionnelle a été développée par Sepehry et al.[56] basé sur la méthode de convolution singulière discrète. Les résultats numériques ont montré un bon accord avec les résultats expérimentaux pour un faisceau étroit. Une différence significative a été observée entre la simulation et les résultats expérimentaux pour une structure en plaque.

Cao, et al. [57] ont développé la méthode de détection des dommages structurels basée sur les interférences électromagnétiques en utilisant la mise à jour du modèle incorporé avec la technique de régularisation.

Fan, et al. [58] ont développé une nouvelle méthode d'identification des dommages structurels basée sur la sensibilité de la réponse à l'impédance et la technique de régularisation.

II.4 Conclusion

D'après l'analyse des différents travaux de recherches présentée ci-dessus, on note que les méthodes de détection des endommagements basée sur les vibrations ont reçu une attention particulière et étendue.

La notion de base dans toutes les techniques de détection de l'endommagement par essais vibratoires réside dans l'idée que les paramètres modaux (fréquences propres, modes propres, courbures modales) mesurés sont fonctions des propriétés physiques de la structure (rigidité. Masse. Amortissement).

De ce fait, les modifications pouvant intervenir sur les propriétés physique ou mécaniques doivent être détectables à travers le changement des paramètres modaux.

*Chapitre III : Méthode de l'énergie de
déformation*

III Chapitre 3 : Méthode de l'énergie de déformations

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la méthode de détection des dommages basée sur l'énergie de déformation modale, et afin de confirmer son efficacité, au début on a entamé cette étude de cas par un calcul comparatif de fréquences, par la suite on a affiné cette méthode sur nos deux structures en forme de plaque et avec des scénarios d'endommagements différents pour valider son approche tant qu'indicateur à ces altérations.

III.2 Présentation de la Méthode énergie déformation modale

La méthode de détection des dommages basée sur l'énergie de déformation modale a émergé avec l'avantage de la méthode SHM globale et de la méthode SHM locale. Comme le mentionnent Fan et Qiao[59].

Au cours des trois dernières décennies, la méthode de détection des dommages basée sur l'énergie de déformation modale s'est avérée très efficace pour détecter les dommages structurels, car la valeur de l'énergie de déformation modale est plus sensible aux dommages que la fréquence naturelle et la forme du mode. La méthode de l'énergie de déformation modale est résumée comme suit.

Stubbs [60, 61] a proposé la méthode de l'énergie de déformation modale pour détecter les dommages dans les structures de type poutre. Dans ces études, les emplacements des dommages ont été diagnostiqués avec succès.

Cornwell et al. [62] ont étendu l'étude de la méthode de l'énergie de déformation modale aux structures de type plaque. Un indice d'endommagement déterminant le changement de l'énergie de déformation modale due aux dommages.

Kim et al.[63] ont développé une détection des dommages basée sur l'énergie de déformation modale pour localiser avec précision les dommages au milieu et au quart de la portée d'une poutre en utilisant quelques modes.. Kim et al. [64] ont appliqué cette méthode pour surveiller la réduction de la rigidité dans une poutre en béton armé précontraint.

Hu et Wu [65] ont utilisé la méthode des quadratures différentielles pour calculer l'énergie de déformation modale afin de détecter l'emplacement en fissures dans une plaque d'aluminium mince avec des conditions aux limites libres.

Dixitet Hanagud[66] ont proposé une méthode basée sur l'énergie de déformation pour évaluer les dommages dans les poutres en utilisant la fréquence naturelle, la forme du mode et les caractéristiques physiques de la structure.

Seyedpoor[67] a proposé une méthode en deux étapes pour détecter l'emplacement et l'étendue des dommages en plusieurs endroits. La première étape consiste à identifier l'emplacement du dommage en utilisant un indice basé sur l'énergie de déformation modale (MS). L'utilisation d'un indice de déformation modale basé sur l'énergie (MSEDI). Consiste à déterminer la gravité des dommages en employant l'optimisation par essais de particules. Optimisation par essais de particules.

Cha et Buyukozturk[68]ont présenté une méthode de détection des dommages combinant l'énergie de déformation modale et l'optimisation multi objectif hybride pour les structures spatiales en acier. De diagnostiquer les dommages structurels de faible gravité. Vo Et al. [69] ont combiné la méthode d'énergie de déformation modale et l'algorithme d'évolution différentielle amélioré pour diagnostiquer les dommages structurels de faible gravité. L'algorithme d'évolution différentielle amélioré pour diagnostiquer l'emplacement et l'étendue des dommages pour les plaques composites laminées. L'influence des phénomènes de bruit sur les résultats de la détection a également été étudiée. Résultats de détection a également été étudiée.

Kaveh et Zolghadr [70] ont utilisé l'algorithme MSEBI développé par Seyedpoor [9] et l'algorithme de parthénogenèse cyclique pour détecter l'endommagement des éléments pour les structures à cadre plan.

Dinh [71] a présenté une méthode en deux étapes utilisant l'indice de dommages basé sur l'énergie de déformation modale normalisée (nMSEDI) et l'algorithme Jaya pour diagnostiquer les dommages dans les plaques. Deux fonctions objectives basées sur la modification de la flexibilité modale et la modification de la forme modale. Ont été réalisées. Récemment, Samir et al. [72]ont présenté une méthode de détection des dommages utilisant (nMSEDI) et un algorithme d'optimisation basé sur l'enseignement et l'apprentissage.

Algorithme d'optimisation basé sur l'enseignement et l'apprentissage pour détecter l'emplacement et l'étendue des dommages dans les structures de type poutre.

Wang et al. [73] ont développé une méthode itérative efficace en deux étapes pour l'identification des dommages structurels de plates-formes offshore. Un nouvel indice de dommages, Modal un nouvel indice de dommages, basé sur l'énergie modale (MEBI). Efficacement les éléments potentiellement endommagés dans la première étape. Le MEBI est calculé directement à partir de la forme des modes et des matrices de rigidité de chaque élément avant et après l'apparition des dommages. Recherche d'antenne de scarabée (BAS) est utilisé pour estimer la gravité des dommages de ces éléments dans l'étape suivante.

Kourehli[74] a proposé une méthode de réduction de modèle efficace pour surmonter la limitation du nombre de capteurs à l'aide de machines d'apprentissage extrême. Du nombre de capteurs en utilisant le machine Learning extrême. De l'approximation du second ordre de l'expansion de la série de Neumann a été utilisée pour condenser les matrices de masse et de rigidité.

Ghannadi et al. [75] ont présenté une approche fiable qui combine l'optimisation du loup gris et l'expansion des matrices, qui combine l'optimisation du loup gris et les formes de étendues avec le processus de réduction et d'expansion des équivalents du système pour déterminer la gravité et les emplacements des dommages des structures squelettiques.

III.3.3. Méthode de détection des dommages basée sur l'énergie de déformation modale

III.3.1 Théorie de la méthode d'énergie de déformation modale

Les formes modales qui sont les principales données d'entrée pour la méthode d'énergie de déformation modale peuvent être obtenues à partir d'une analyse modale utilisant la méthode des éléments finis. Pour les structures en forme de plaque, la forme modale peut être représentée par une surface bidimensionnelle. Dans cette étude, une plaque carrée mince divisée en éléments comme le montre la figure 1 est analysée pour les vibrations libres non amorties, où N_x et N_y sont le nombre d'éléments pour la direction x et la direction y, respectivement ; Les coordonnées à 4 points de l'élément (i,j) sont (x_i, y_j) , (x_{i+1}, y_j) , (x_i, y_{j+1}) , (x_{i+1}, y_{j+1}) ,

Respectivement. Pour la forme modale k , $\phi_k(x, y)$, l'énergie de déformation modale pour l'élément (i, j) est déterminée comme suit [4] :

$$U_{k,ij} = \frac{D_{ij}}{2} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \int_{y_j}^{y_{j+1}} \left[\left(\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 x} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 y} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 x} \right) \left(\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial^2 y} \right) + 2(1 - \nu) \left(\frac{\partial^2 \phi_k}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (3.1)$$

où D_{ij} est la rigidité en flexion de l'élément (i, j) ; ν est le coefficient de Poisson. Également pour la forme modale k^{th} , l'énergie de déformation modale pour l'ensemble de la plaque est déterminée comme suit :

$$U_k = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} U_{k,ij} \quad (3.2)$$

Après l'apparition d'un endommagement causé par la réduction de la rigidité en flexion, la forme modale k est modifiée en $k(x, y)$. Pour l'état endommagé, l'énergie de déformation modale pour l'élément (i, j) de $U * k, ij$ et l'énergie de déformation modale pour toute la plaque de $U * k$ sont déterminées de la même manière que (3.1) et (3.2), respectivement. Les énergies de déformation modales fractionnaires pour l'élément (i, j) sont déterminées comme suit :

$$F_{k,ij} = \frac{U_{k,ij}}{U_k} \quad (3.3)$$

$$F_{k,ij}^* = \frac{U_{k,ij}^*}{U_k} \quad (3.4)$$

où $\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} F_{k,ij} = 1$ va $\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} F_{k,ij}^* = 1$. Considérant m modes, un indice de dommage pour l'élément (i, j) est défini comme suit

$$\beta_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m F_{k,ij}^*}{\sum_{k=1}^m F_{k,ij}} \quad (3.5)$$

Un indice de dommage normalisé est proposé comme suit

$$Z_{ij} = \frac{\beta_{ij} - \bar{\beta}_{ij}}{\sigma_{ij}} \quad (3.6)$$

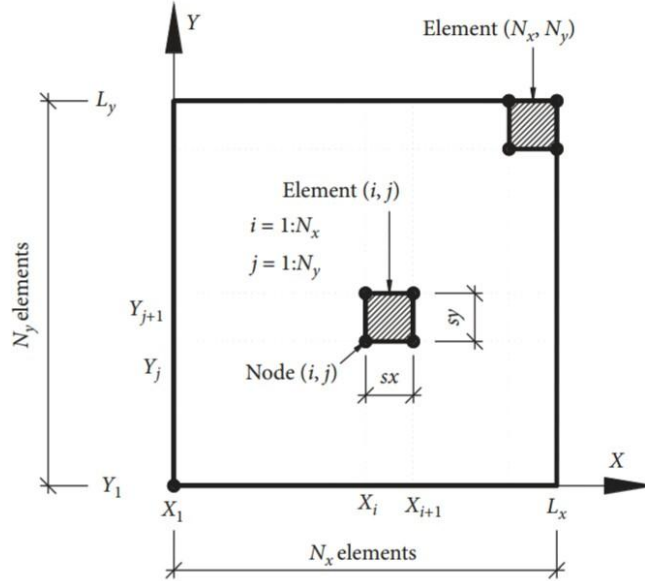


Figure III-1 : Schéma des éléments pour une plaque carrée

Où β_{ij} , σ_{ij} sont respectivement la valeur moyenne et l'écart type des indices de dommage qui sont déterminés comme suit :

$$\bar{\beta}_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \beta_{ij}}{\sum_{k=1}^m F_{k,ij}}$$

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{(N_x N_y) \left(\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (\beta_{ij})^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \beta_{ij} \right)^2}{(N_x N_y) (N_x N_y - 1)}} \quad (3.7)$$

Indice de dommage normalisé, Z_{ij} est utilisé pour localiser les dommages se produisant dans les plaques. Afin de déterminer l'énergie de déformation modale suivant (3.1), la dérivée seconde des déformées modales (courbures modales) doit être effectuée. Dans cette étude, la méthode de différence centrale (CDM) est utilisée pour calculer les courbures de forme de mode.

III.3.2 Procédure de détection des dommages basée sur l'énergie déformation de modale

Sur la base de la théorie de la méthode de détection des dommages basée sur l'énergie de déformation modale décrite dans la section précédente, une procédure de détection des dommages pour les structures en forme de plaque est proposée dans cette étude. La procédure comporte sept étapes comme suit.

Étape 1 : Obtenir les données de forme de mode

Les données de forme de mode peuvent être obtenues à partir de l'analyse modale de la vibration libre de la structure cible. Dans ce travail, la structure en forme de plaque est analysée en utilisant la méthode des éléments finis, avec certaines conditions aux limites est modélisée pour deux états qui étaient l'état intact et l'état endommagé. En conséquence, les données de forme de mode de la plaque sont obtenues à la fois pour l'état intact et l'état endommagé.

Étape 2 : Détermination des courbures de la déformée modale

Les courbures de la déformée modale qui sont la dérivée seconde des déformées modales sont déterminées en employant la méthode de différence centrale comme suit.

Pour les joints intérieurs ($i = 2, 3, \dots, N_x; j = 2, 3 \dots \dots, N_y$):

$$\left(\frac{\partial^2 \phi_{k,ij}}{\partial^2 x} \right) = \frac{\phi_{k,(i-1)j} - 2\phi_{k,ij} + \phi_{k,(i+1)j}}{(sx)^2},$$

$$\left(\frac{\partial^2 \phi_{k,ij}}{\partial^2 y} \right) = \frac{\phi_{k,0j} - 2\phi_{k,ij} + \phi_{k,i(j+1)}}{(sy)^2}, \quad (3.8)$$

Où sx, sy sont respectivement la taille du maillage de la direction x et de la direction y . Pour les joints limites, en considérant une plaque carrée, les courbures modales à quatre limites ($i = 1, N_x + 1; j = 1, N_y + 1$) sont déterminées comme suit :

Limite $x = 0$ ($i = 1; j = 1, 2 \dots \dots, N_y + 1$)

$$\left(\frac{\partial^2 \phi_{k,1j}}{\partial^2 x} \right) = \frac{\phi_{k,0j} - 2\phi_{k,1j} + \phi_{k,2j}}{(sx)^2} \quad (3.9)$$

Limite $x = L_x$ ($i = N_x + 1; j = 1, 2 \dots \dots, N_y + 1$)

$$\left(\frac{\partial^2 \phi_{k,(N_x+1)j}}{\partial^2 x} \right) = \frac{\phi_{k,N_xj} - 2\phi_{k,(N_x+1)j} + \phi_{k,(N_x+2)j}}{(sx)^2}, \quad (3.10)$$

Limite $y = 0$ ($i = 1, 2, \dots, N_x + 1 ; j = 1$)

$$\left(\frac{\partial^2 \phi_{k,i1}}{\partial^2 y} \right) = \frac{\phi_{k,i0} - 2\phi_{k,i1} + \phi_{k,i2}}{(sy)^2}, \quad (3.11)$$

Limite $y = L_y$ ($i = 1, 2, \dots, N_x + 1 ; j = N_y + 1$)

$$\left(\frac{\partial^2 \phi_{k,i(N_y+1)}}{\partial^2 y} \right) = \frac{\phi_{k,iN_y} - 2\phi_{k,i(N_y+1)} + \phi_{k,i(N_y+2)}}{(sy)^2}, \quad (3.12)$$

De toute évidence, la méthode de différence centrale utilise les données de forme de mode de trois joints continus pour déterminer les courbures de forme de mode. Il n'y a pas de problème pour les joints intérieurs ayant des données de forme de mode suffisantes. Cependant, il y a un manque de données de forme de mode pour calculer les courbures de forme de mode pour les joints limites suivant (3.9)–(3.12).

Les données de forme de mode telles que $\phi_{k,0j}, \phi_{k,(N_x+2)j}, \phi_{k,i0}, \phi_{k,i(N_y+2)}$ ne peuvent pas être obtenues à partir de l'analyse modale (à l'étape 1) en raison du fait qu'elles appartiennent aux joints extérieurs de la plaque cible. Afin de surmonter le problème, les frontières virtuelles sont nouvellement proposées dans cette étude. La plaque carrée a quatre limites virtuelles avec un total de $2(N_x + 1) + 2(N_y + 1)$ joints virtuels comme indiqué sur la (Figure III .2)

Les données de forme de mode au niveau des joints virtuels sont trouvées par la méthode d'extrapolation. Une courbe reliant trois joints continus est considérée, les données de forme de mode au niveau des joints virtuels sont prises de manière symétrique ou antisymétrique en fonction de la condition aux limites à travers les limites réelles correspondantes. Pour les conditions aux limites libres et les conditions aux limites articulées, la règle antisymétrique est proposée comme suit.

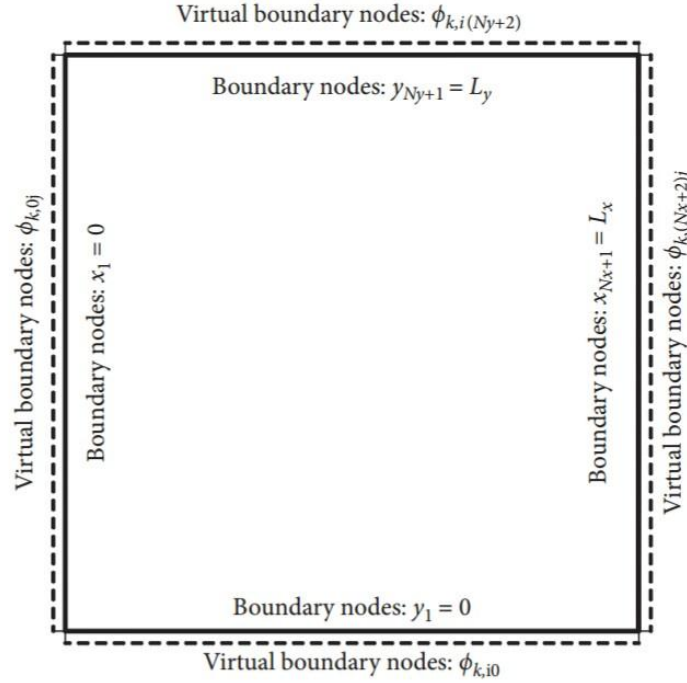


Figure III-2 : Plaque carrée

$$\begin{aligned}
 \phi_{k,0j} &= -\phi_{k,2j}, \\
 \phi_{k,(N_x+2)j} &= -\phi_{k,N_xj}, \\
 \phi_{k,i0} &= -\phi_{k,i2}, \\
 \phi_{k,i(N_y+2)j} &= -\phi_{k,iN_y}.
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

Pour des conditions aux limites fixes, la règle symétrique est proposée comme suit : $\phi_{k,0j}$

$$\begin{aligned}
 \phi_{k,0j} &= \phi_{k,2j}, \\
 \phi_{k,(N_x+2)j} &= \phi_{k,N_xj}, \\
 \phi_{k,i0} &= \phi_{k,i2}, \\
 \phi_{k,i(N_y+2)j} &= \phi_{k,iN_y}.
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

la quantité de $(\partial^2 \phi_k / \partial x \partial y)$ dans (3.1) est déterminée en prenant la dérivée première des formes modales pour la variable y, puis en prenant la dérivée première des formes modales pour la variable x.

Étape 3 : Déterminer l'énergie de déformation modale

Les énergies de déformation modale pour chaque élément et pour l'ensemble de la plaque correspondant à l'état intact et à l'état endommagé sont déterminées dans cette étape.

Pour la forme du mode de retour, $\Phi_k(x, y)$, les énergies de déformation modales pour l'élément (i, j) sont déterminées par (3.1) ; pendant ce temps, les énergies de déformation modales pour l'ensemble de la plaque sont déterminées par (3.2).

Étape 4 : Déterminer l'énergie de déformation modale fractionnaire

Les énergies de déformation modale fractionnaires pour l'élément (i, j) correspondant à l'état intact et à l'état endommagé sont déterminées par (3.3) et (3.4), respectivement.

Étape 5 : Déterminez l'indice de dommage normalisé

L'indice de dommage pour l'élément (i, j) en utilisant le mode m est déterminé par (3.5). Ensuite l'indice de dommage normalisé est déterminé par (3.6).

Étape 6 : Détecter l'emplacement et la durée des dommages

Dans cette étude, un seuil d'endommagement Z_0 est présenté pour alerter sur l'occurrence des endommagement. Le seuil d'endommagement Z_0 est calculé en pourcentage de l'indice de dommage maximum, Z_{ij}^{max} si $Z_{ij} \geq Z_0$, alors l'élément (i, j) est endommagé ; sinon, l'élément (i, j) n'est pas endommagé. L'emplacement et la durée des dommages sont déterminés à l'aide du tableau des indices de dommages après troncature. La (figure III 3) montre une illustration du graphique de l'indice de dommage pour les structures en forme de plaque.

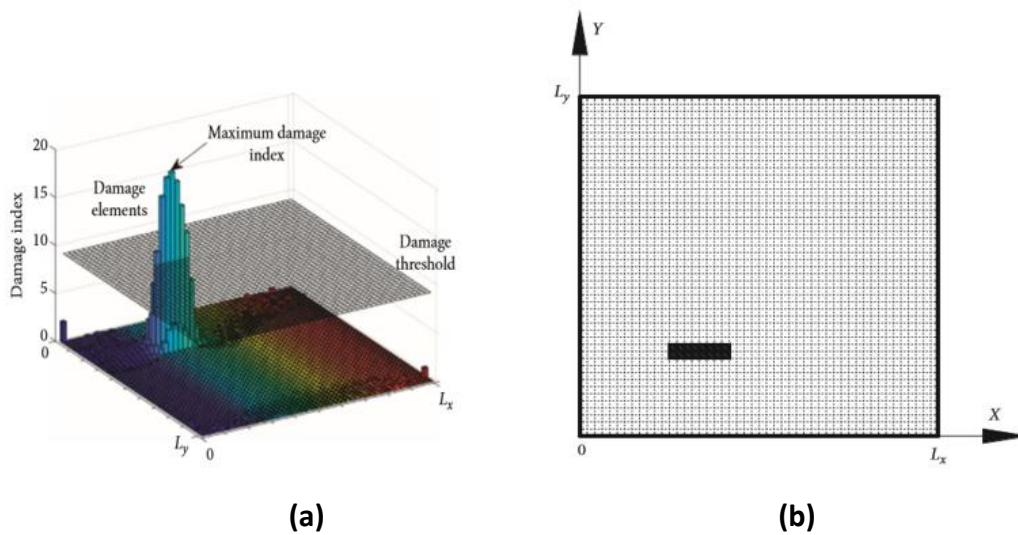


Figure III-3 : (a) Avant troncature. (b) Après troncature

Étape 7 : Évaluer la capacité de détection des dommages

Sur la base de la durée des dommages déterminée à l'étape 6, un indicateur de capacité de détection (DCI) est proposé pour évaluer la capacité de détection des dommages comme suit :

$$DCI = \frac{L_{pred}}{L_{real}} \times 100\% \quad (3.15)$$

Où L_{pred} est la durée prédite des dommages obtenue à partir de l'indice de dommages ; L_{real} est la durée réelle des dommages. Dans ce travail, l'évaluation de la capacité de détection des dommages est présentée comme dans les trois niveaux suivants :

- (i) Si $0 < DCI < 50\%$, la capacité de détection des dommages est faible (L)
- (ii) $50\% \leq DCI \leq 80\%$: la capacité de détection des dommages est moyenne (A)
- (iii) Si $80\% < DCI \leq 100\%$, la capacité de détection des dommages est élevée (H).

III.4 Application et résultats

Cette section est divisée en deux parties :

La première est consacrée à la détection de l'endommagement en utilisant la comparaison entre les fréquences (saines et endommagées)

La deuxième nous permet de localiser les éléments endommagés en utilisant la méthode d'énergie de déformation.

III.4.1 Première partie

Deux structures plaques simulées sont utilisées pour vérifier les résultats obtenus des fréquences saines par notre programme Matlab on prend comme référence l'article « ferreira » [76].

Pour pouvoir détecter la présence d'endommagement on effectue une étude comparative entre les fréquences saines et celle des scénarios endommagés.

Les caractéristiques mécaniques et géométriques sont indiquées dans le tableau suivant.

Avec :

(SSSS) : Simplement appuyée.

(CCCF) : Encastrée-libre.

Caractéristiques	Structure SSSS	Structure CCCF
Module de Young (Pa)	10920	10920
Coefficient de poisson	0,3	0,3
Rho (kg/m ³)	1	1
Moments d'inertie (N*m)	8,33*10 ⁻⁵	8,33*10 ⁻⁵
Épaisseur (m)	0,1	0,1
Largeur (m)	1	1
Longueur (m)	1	1
Kapa	0,83	0,8601

Tableau III-1: caractéristiques mécaniques et géométriques des deux structures

Afin de valider la technique d'évaluation des endommagements proposée, trois scénarios sont considérés, dans lesquels les endommagements simples ainsi que les endommagements multiples sont étudiés comme indiqué dans le tableau 2. Dans ce dernier, les numéros d'éléments et le pourcentage de réduction de la rigidité sont listés. Les fréquences naturelles de chaque scénario d'endommagements sont présentées dans les tableaux suivant.

Les scenarios d'endommagement pour les deux structures			
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Élément endommagé	Élément 13	Élément 19	Éléments 7 et 18
Pourcentage d'endommagement	15%	30%	20%, 25%

Tableau III-2: les trois scenarios d'endommagements pour les deux structures

Structure SSSS	Mode	Maillage 5 × 5									
		Maillage 15 × 15			Scenario 1			Scenario 2		Scenario 3	
		Article ferreira	Présent travaille	Erreur (%)	Présent travaille	fr [HZ]	Erreur (%)	fr [HZ]	Erreur (%)	fr [HZ]	Erreur (%)
	1	0,9346	0,9345	0,0106	0,9697	0,9622	0,7734	0,9612	0,8766	0,9555	1,4644
	2	2,2545	2,2544	0,0044	2,5724	2,568	0,171	2,5263	1,7921	2,5155	2,2119
	3	2,2545	2,2544	0,0044	2,5724	2,568	0,171	2,5593	0,5093	2,549	0,9097
	4	3,4592	3,4592	0	3,91	3,8982	0,3018	3,8689	1,0512	3,8686	1,0588
	5	4,3031	4,3031	0	5,8782	5,8156	1,065	5,8346	0,7417	5,800	1,3303
	6	4,3031	4,3031	0	5,8782	5,852	0,4457	5,8354	0,7281	5,8044	1,2555

Tableau III-3: les fréquences saines et endommagées pour la structure SSSS avec les trois scenarios d'endommagements

Structure CCCF	Mode	Maillage 15 × 15			Maillage 5 × 5							
		Article ferreira	Présent travail	Erreur (%)	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3			
					Présent travail	fr [HZ]	Erreur (%)	fr [HZ]	Erreur (%)	fr [HZ]	Erreur (%)	
1	1,0923	1,0923	0	1,1984	1,1955	0,2419	1,1934	0,4172	1,1855	1,0764		
2	1,7566	1,7566	0	1,8666	1,8525	0,7553	1,8507	0,8518	1,8502	0,8786		
3	2,7337	2,7337	0	3,514	3,51	0,1138	3,4663	1,3574	3,5002	0,3927		
4	3,2591	3,2591	0	3,8085	3,7975	0,2888	3,7586	1,3102	3,7254	2,1819		
5	3,3541	3,3541	0	3,9642	3,9566	0,1917	3,9476	0,4187	3,9168	1,1957		
6	4,6395	4,6395	0	5,2371	5,2239	0,252	5,1831	1,0311	5,1596	1,4798		

Tableau III-4: les fréquences saines et endommagées pour la structure CCCF avec les trois scenarios d'endommagements

III.4.2 Deuxième partie

Deux structures plaques simulée sont utilisées pour vérifier la méthode d'énergie de déformation. Les propriétés des plaques simulées sont présentées dans le tableau 1. et les scenarios d'endommagements sont indiqué dans le tableau 5.

Les résultats des indicateurs d'endommagements de différents scénarios d'endommagement sont présentés dans les Figures ci-dessous.

1. Structure SSSS

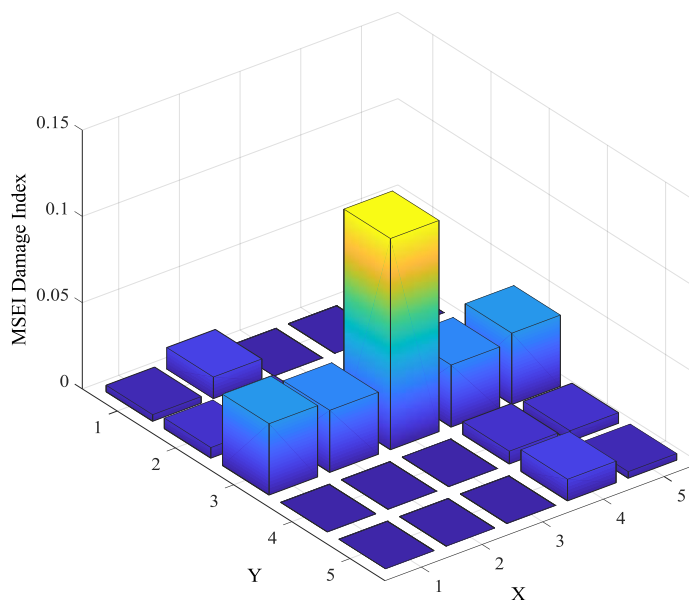


Figure III-4 : premier scenario d'endommagement

Figure III 4, montre notre structure plaque SSSS étudié et mailler 5×5 , ce graphique localise et indique que l'élément 13 est endommager et cela et mentionner par un pic élevé en le comparant aux autres éléments.

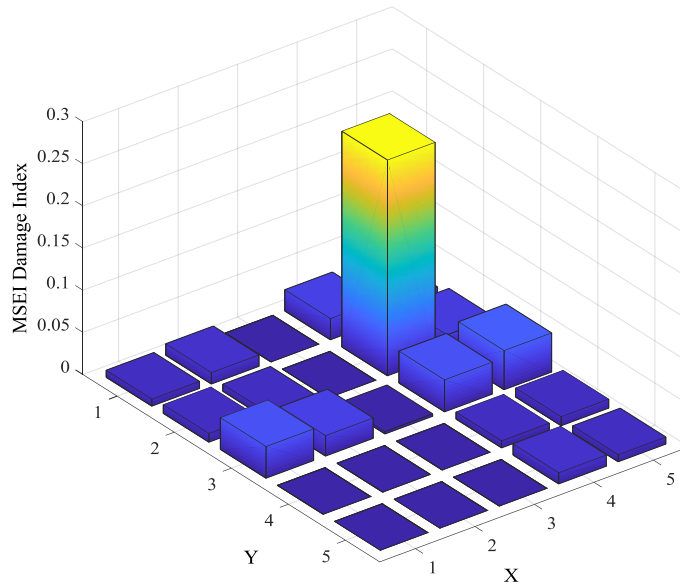


Figure III-5 : deuxième scenario d'endommagement

Figure III 5 , pour la même structure plaque SSSS étudiée et mailler 5×5 , dans graphique on a pu localiser l'endommagement au niveau de l'élément 19 .

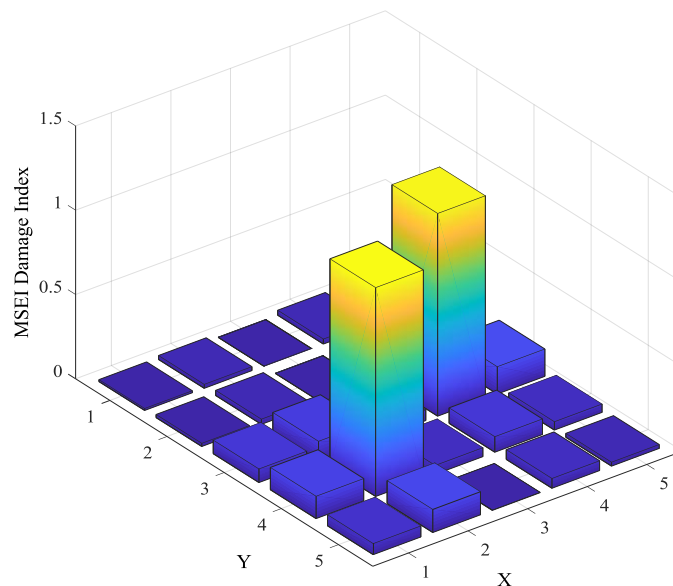


Figure III-6 : troisième scenario d'endommagement.

Dans cette figure III 6 on a appliqué notre méthode de détection pour le troisième scénario d'endommagement et on a pu localiser son emplacement dans les éléments 7 et 18.

2. Structure CCCF

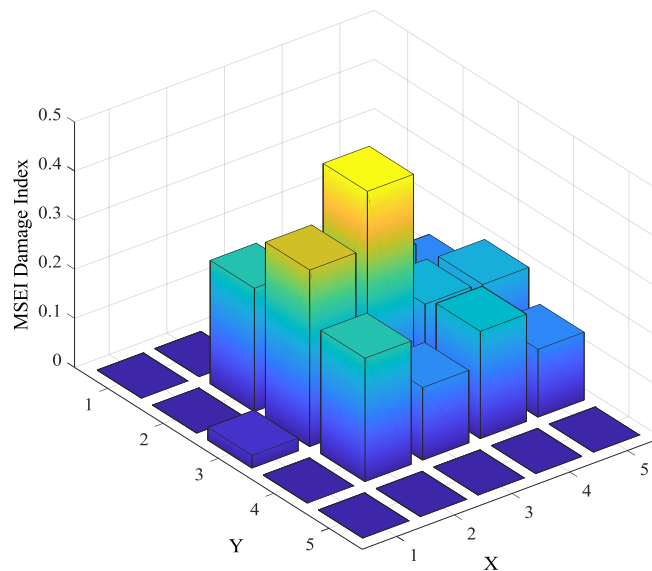


Figure III-7 : premier scenario d'endommagement

La figure III 7, montre notre structure plaque CCCF étudié et maillé 5×5 , ce graphique localise et indique que l'élément 13 est endommagé et cela est mentionner par un pic élevé en le comparant aux autres éléments. Les éléments voisinés sont perturbés ce qui justifie la présence des pics avec une amplitude inférieure à notre élément étudiant.

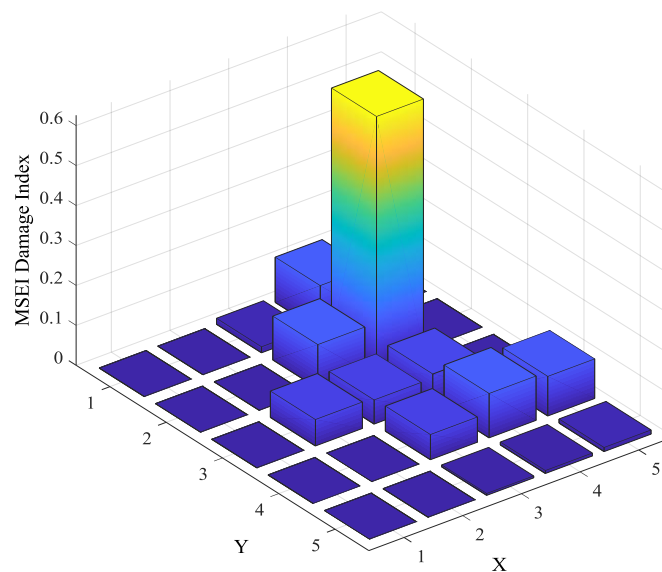


Figure III-8 : deuxième scenario d'endommagement

La figure III 8 , la structure plaque CCCF étudié et mailler 5×5 , dans graphique on a pu localiser l'endommagement qui se trouve dans l'élément 19.

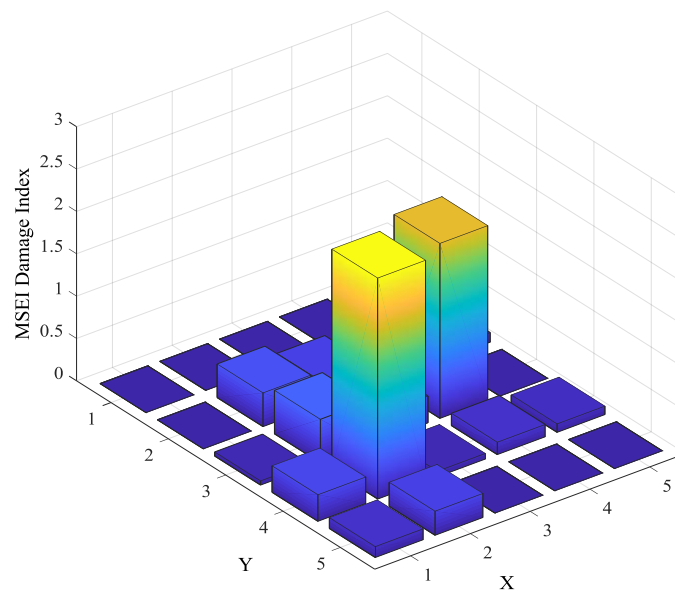


Figure III-9 : troisième scénario d'endommagement

Dans cette Figure III 9, on a appliqué notre méthode de détection pour le troisième scénario d'endommagements et on a pu localiser son emplacement dans les éléments 7 et 18

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé la méthode de l'énergie de déformation modale basée sur les modes propres pour déterminer l'emplacement d'endommagement dans les structures plaques, en utilisant l'indicateur MSEI.

On a pu prouver l'efficacité de cette méthode grâce aux résultats obtenus dans nos représentations graphiques, implémentée et calculé grâce aux MATLAB.

Chapitre IV : Méthodes d'optimisation

IV Chapitre 4 : Méthodes d'optimisations

IV.1 Introduction

Après avoir accompli la détection et la localisation des endommagements dans notre troisième chapitre, l'étape suivante de notre étude consiste à quantifier nos endommagements. Pour y parvenir, nous avons opter pour deux méthodes d'optimisation, celles-ci s'intitulent : CapSA et HBA.

Ce quatrième et dernier chapitre est subdivisé en deux parties ; dans la première, nous avons présenté et décrit nos deux méthodes en prenant soins d'introduire leurs principes de fonctionnement et l'origine de leurs inspirations. Pour la deuxième partie, les résultats donnés par les multiples calculs sont présentés et discuter.

IV.2 Méthodes d'optimisation

IV.2.1 Optimisation de capucin

L'algorithme de recherche capucin (CapSA), résoudre des problèmes d'optimisation contraints et globaux est proposé. Cet algorithme simule le comportement de recherche de nourriture des singes et leurs méthodes efficaces de locomotion, largement connues sous le nom de saut, balancement et escalade. En tant que groupe, les capucins montrent de merveilleux exemples de mobilité et font souvent preuve d'un haut degré de créativité dans la locomotion tout en errant et en recherchant des sources de nourriture. Ils peuvent sauter astucieusement sur les arbres, se balancer sur les branches des arbres et grimper sur les arbres. Dans un troupeau de capucins, ce comportement présente de nombreuses similitudes avec le processus d'optimisation, où la nourriture est représentée par des solutions convoitées dans le problème d'optimisation globale. Les principales contributions de l'algorithme proposé sont les suivantes :

1. Un nouvel algorithme inspiré de la nature qui simule complètement les méthodes des capucins dans la recherche de sources de nourriture est proposé.

2. Les performances du CapSA proposé ont été évaluées sur 23 problèmes de test accessibles au public, où une étude comparative complète a été menée avec d'autres algorithmes existants inspirés de la nature. L'importance des résultats expérimentaux est confirmée par l'analyse statistique des trois tests. Une évaluation plus poussée de CapSA est testée sur quatre problèmes de conception technique, et les résultats obtenus sont comparés avec d'autres algorithmes d'optimisation. L'article est organisé de la manière suivante. Dans la Sect. 2, nous présentons les concepts d'inspiration de l'algorithme proposé. Dans la Sect. 3, nous fournissons les concepts de base derrière l'algorithme proposé. La section 4 décrit le modèle mathématique et la mise en œuvre de l'algorithme proposé. La section 5 présente une analyse de l'algorithme proposé. Les résultats d'optimisation de la méthode proposée et d'autres méthodes d'optimisation sur 23 fonctions de test sont présentés et discutés dans la Sect. 6. Les résultats des tests statistiques sont effectués dans la Sect. 7. Dans la sect. 8, les performances de la méthode proposée sont validées sur différents problèmes d'ingénierie et comparées à d'autres méthodes d'optimisation. Enfin, les commentaires de conclusion sur les principales conclusions de l'algorithme proposé et les voies les plus prometteuses pour les orientations futures sont présentés dans la Sect.

IV.2.1.1 Inspiration

Les singes capucins vivent dans une grande partie du Brésil et d'autres régions d'Amérique centrale et du Sud, jusqu'au nord de l'Argentine. Ils sont originaires des climats tropicaux ainsi que des forêts sèches du Nicaragua au Paraguay. Structure sociale Les singes capucins sont des animaux arboricoles, hautement sociaux, diurnes et territoriaux, où ils passent la plupart de leur temps en groupes composés de mâles et de femelles adultes ainsi que de petits singes. Ils sautent ensemble au sommet de grands arbres tout en cherchant de la nourriture et en s'engageant en famille. Pendant ce temps, ils errent du fond de la forêt à la canopée sur la plage verticale de leurs habitats. L'aire de répartition d'un troupeau de capucins couvre entre 50 et 100 hectares, et les individus parcourent environ 3 km par jour dans l'aire de répartition. En fait, dans la nature, les capucins sont extrêmement énergiques tout au long de la journée et se nourrissent souvent d'une grande variété de types d'aliments [77].

Communication : Les membres capucins partagent leurs observations et intentions au sein des groupes en utilisant des postures, des aboiements, des appels et de nombreuses autres activités physiques. Ils interagissent à l'intérieur et à l'extérieur du groupe en fonction de la disponibilité des sources de nourriture ainsi que des postures d'attaque. Pendant la recherche de nourriture, les membres du groupe interagissent les uns avec les autres et avec le chef sur de longues distances grâce à un appel spécifique qui ressemble au couinement d'un cheval. Chaque individu du groupe des capucins a son personnel distinctif afin que les autres membres du groupe puissent reconnaître l'appelant. Cette communication de grande envergure permet aux capucins de se réunir, de rester à l'écart de toute attaque et de partager des sources de nourriture et des potins.

Intelligence : Les singes capucins sont réputés pour leur haut niveau d'intelligence et de curiosité et sont considérés comme les singes du nouveau monde les plus intelligents [78]. Cela est dû au fait que les capucins ont probablement une grande taille de cerveau par rapport à la taille de leur corps [78], et en général, effectuent des tâches cognitives [78].

Organisation et comportement de recherche de nourriture : Les capucins subsistent généralement en groupes composés de 10 à 35 individus par groupe, où les membres du groupe consacrent la plupart de leur temps à la recherche de nourriture. Les capucins, en groupes, se déplacent ensemble et collectent de la nourriture tout au long de la journée dans une zone centrale du domaine vital. En règle générale, un seul mâle domine un groupe, appelé mâle alpha. Néanmoins, les groupes de capucins à tête blanche sont commandés par une femelle alpha et également un mâle alpha [79]. Une hiérarchie de dominance masculine distingue habituellement un groupe reproducteur de capucins cohabitant. En règle générale, un seul mâle alpha et de nombreuses femelles et mâles sous-alpha vivent ensemble. Chaque groupe couvre une zone relativement vaste dans la forêt, où les membres de chaque groupe recherchent les meilleures zones de la forêt qui contiennent des sources de nourriture. Les capucins trouvent leurs sources de nourriture de manière attrayante : un mâle alpha dirige le groupe et est chargé de localiser les sources de nourriture pour les membres du groupe. Chez certaines espèces de capucins, un seul mâle alpha et une seule femelle alpha conduisent le groupe à trouver des sources de nourriture dans la forêt. Dans les cas où ils ne trouvent pas suffisamment de sources de nourriture pour les capucins du groupe, le groupe est divisé en sous-groupes plus petits qui se nourrissent indépendamment [79].

Des recherches sur les mécanismes d'apprentissage social ont montré que les capucins partagent des propensions similaires à rechercher de la nourriture et ont produit des preuves de traditions chez les populations sauvages, dans lesquelles ils ont développé des conventions

sociales, apparemment pour explorer les liens sociaux [77, 79]. Les faits les plus intéressants sur les capucins sont qu'ils utilisent trois méthodes fantastiques pour naviguer tout en cherchant des sources de nourriture : sauter, se balancer et grimper. Les capucins peuvent sauter jusqu'à trois mètres, et ils pratiquent ce mode de déplacement pour se déplacer d'un arbre à l'autre. Ils peuvent se déplacer (1) d'une branche à une autre sur le même arbre, (2) d'un endroit à un autre au sol ou (3) d'une berge à l'autre rive de la rivière. De plus, les capucins se balancent et grimpent sur les arbres et leurs branches pour rechercher localement des sources de nourriture sur les branches des arbres. Les capucins grimpent généralement aux arbres encore et encore et se balancent sur les branches des arbres, identifiant les branches non visitées avec une probabilité substantielle vers les branches avec les meilleures valeurs, jusqu'à ce qu'elles atteignent les frontières non découvertes des arbres. Le mouvement de saut permet aux capucins de s'étendre à un espace de recherche à l'échelle mondiale, ce qui serait bénéfique pour être utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. Dans ce contexte, les capucins parcourent les arbres et les extrémités des branches des arbres jusqu'à ce qu'ils s'approchent d'une zone particulière de l'arbre où des sources de nourriture (c'est-à-dire des solutions réalisables) peuvent être identifiées. Les capucins ne se bornent pas à chercher les branches d'un seul arbre ; l'espace de recherche peut être plutôt considéré comme une forêt. Chaque fois qu'un capucin alpha localise une source de nourriture (c'est-à-dire la meilleure solution) avec une meilleure valeur objective ; cette solution est stockée comme la meilleure solution. Les suiveurs mettent à jour leurs emplacements en fonction de leurs emplacements actuels et de l'emplacement du leader. Les capucins atteignent la cime des arbres et toutes leurs branches lors de la recherche de nourriture. Chaque fois que des sources de nourriture (c'est-à-dire des solutions globales) sont trouvées, les positions de tous les capucins sont mises à jour et le processus de recherche (en sautant, en se balançant et en grimpant) est réitéré, branche par branche, arbre par arbre et sur les berges, ce qui peut conduire à des sources de nourriture (c'est-à-dire de meilleures solutions). Ce procédé permet l'exploration et l'exploitation de toutes les positions dans la zone de recherche. Il existe trois stratégies suivies par le chef des capucins et les suiveurs pendant la recherche de nourriture :

- Stratégie A : Un mâle alpha (chef mondial) commande le groupe et est responsable de trouver des sources de nourriture, où les membres du groupe suivent le chef pour obtenir de la nourriture.

- Stratégie B : Chez certains types de capucins, les alphas mâles et femelles (leaders mondiaux) commandent le groupe et sont responsables de l'identification de la nourriture, où les membres du groupe suivent les leaders.

- Stratégie C : Les individus recherchent des sources de nourriture de manière indépendante, mais ils suivent les membres du groupe qui trouvent des sources de nourriture. Le comportement de recherche de nourriture des capucins à l'intérieur et à l'extérieur du groupe est présenté dans cinq cas :

1. Dans le premier cas, les leaders au sein du groupe commencent à chercher de la nourriture et évaluent leur position à partir des sources de nourriture.
2. Dans le second cas, en fonction de la position des leaders et de l'identification des sources de nourriture, les membres du groupe mettent à jour leurs positions vis-à-vis des sources de nourriture.
3. Dans le troisième cas, les suiveurs mettent à jour leurs positions au sein du groupe en suivant les leaders.
4. Dans le quatrième cas, les dirigeants mettent à jour leurs meilleures positions pour localiser les sources de nourriture.
5. Dans le cinquième cas, si les positions des leaders et des suiveurs ne sont pas mises à jour pendant plusieurs itérations, les membres du groupe commencent à rechercher des sources de nourriture dans différentes directions. Les cinq cas ci-dessus sont effectués en continu jusqu'à ce que la source de nourriture (c'est-à-dire la solution souhaitée) soit atteinte. Sur la base de la description ci-dessus, nous pouvons garantir que le comportement de recherche de nourriture intelligent des capucins est la principale source de motivation qui a encouragés à développer l'algorithme méta heuristique décrit ci-dessous.

IV.2.1.2 Algorithme de recherche des capucins

L'objectif général de cette recherche est de développer un nouvel algorithme méta-heuristique qui se concentre sur les singes capucins en tant que modèle primate concerté du comportement social des animaux en quête de nourriture. Pour ce faire, nous avons étudié les stratégies comportementales des capucins dans des contextes liés à leurs compétences efficaces pour se déplacer et rechercher des sources de nourriture sur les arbres, le sol et les berges des rivières. Pour développer un tel algorithme, nous avons développé un modèle mathématique composé de stratégies de recherche globales et locales comme décrit ci-dessous.

IV.2.1.2.1 Recherche globale (mouvement de saut)

Les capucins se déplacent généralement sur de grandes distances pour rechercher des sources de nourriture sur les arbres en sautant d'un arbre à l'autre ou peuvent glisser au sol pour chercher de la nourriture sur les rives d'une rivière. Ainsi, le mécanisme de saut est analogue à la recherche globale. Ces stratégies de recherche de nourriture sont illustrées à la figure IV 1. Il est perçu à partir de la figure IV 1 que le mouvement réaliste d'un capucin lors du saut d'un arbre à un autre est similaire au mouvement des projectiles comme illustré dans le chemin courbe du projectile et le mouvement courbe du capucin dans figure IV 2 (a, b) respectivement.

Comme le montre clairement la figure IV 2 b, la distance réelle parcourue par le capucin implémente la distance horizontale, x , entre la branche de l'arbre source et l'arbre cible.



Figure IV-1 : (a) Différentes étapes du mouvement des capucins lors du saut d'un arbre à un autre et (b) différentes étapes du mouvement des capucins lors du saut d'une rivière à une autre

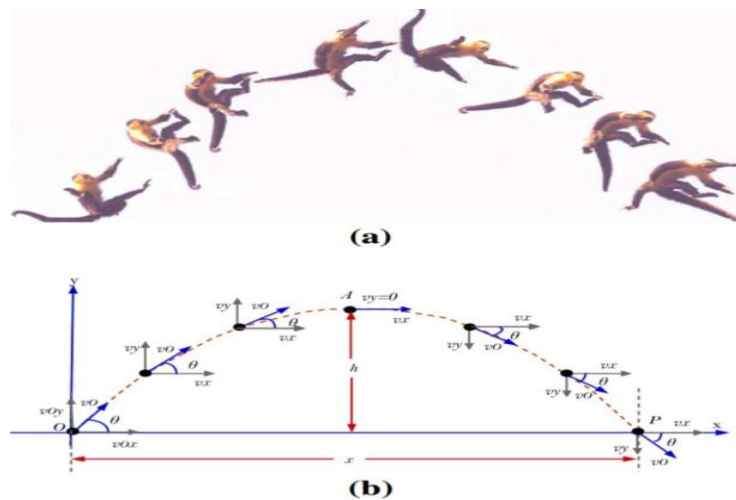


Figure IV-2 : (a) Un modèle réaliste de saut de capucin utilisant un mouvement courbe approximatif et (b) un modèle courbe simulant le mouvement de saut du capucin en (a).

Nous pouvons utiliser la troisième loi du mouvement pour exprimer x comme indiqué ci-dessous :

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (4.1)$$

Où x représente la nouvelle position du capucin, x_0 représente la position initiale, v_0 représente la vitesse initiale, a représente l'accélération et t identifie l'instance temporelle. La vitesse du capucin, v , pendant le mouvement de saut peut être identifiée en utilisant la première loi du mouvement comme indiqué dans l'équation (4.2).

$$v = v_0 + a t \quad (4.2)$$

Les composantes x et y de la vitesse initiale du capucin dans le modèle de mouvement affiché sur la IV 2 b peuvent être définies comme :

$$\begin{aligned} v_{0x} &= v_0 \cos(\theta_0) \\ v_{0y} &= v_0 \sin(\theta_0) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Où v_{0x} et v_{0y} sont les vitesses initiales dans les directions x et y , respectivement, et θ_0 est l'angle mesuré à partir de la direction x positive. La vitesse horizontale, v_x , peut être dérivée des équations (4.2) et (4.3) comme suit :

$$v_x = v_{0x} + a_x t = v_0 \cos(\theta_0) \quad (4.4)$$

Où a_x est l'accélération horizontale qui est fixée à 0. La distance, x , du capucin peut alors être

$$x = x_0 + v_0 \cos(\theta_0) t \quad (4.5)$$

Le déplacement vertical, h , dans la figure 2b, peut alors être dérivé comme :

$$y = y_0 + v_0 \sin(\theta_0) t + \frac{1}{2} a_y t^2 \quad (4.6)$$

où y_0 est la position initiale et a_y est l'accélération verticale du capucin, ce qui représente une accélération descendante due à la gravité qui est égale à g . L'équation (4.6) peut être résolue pour trouver t lorsque la hauteur h est égale à la hauteur de lancement y_0 comme suit :

$$t = 2v_0 \sin(\theta_0) / g \quad (4.7)$$

Remplacer l'équation (4.7) dans l'équation (4.5) et utilisez $\sin(2\theta_0) = 2 \sin(\theta_0) \cos(\theta_0)$ pour obtenir :

$$x = x_0 v_0^2 \sin(2\theta_0) / g \quad (4.8)$$

où x est la nouvelle position du capucin, x_0 est la position initiale v_0 , est la vitesse initiale, θ_0 est l'angle de saut et g est l'accélération gravitationnelle.

IV.2.1.2.2 Recherche locale (Mouvement de balancement)

Mouvement de balancement Les capucins utilisent leur queue, leurs pattes ou leurs mains pour vaciller sur les branches des arbres pendant la recherche de nourriture afin de répondre à leurs besoins alimentaires quotidiens. Cette stratégie de mouvement simule un processus de recherche locale et est illustrée par deux modèles. La figure IV 3 montre que le mouvement réaliste d'un capucin lors du balancement sur les arbres est similaire à celui d'un pendule comme illustré dans le mouvement de balancement du capucin et la trajectoire du mouvement du pendule sur les figure IV 4 a, respectivement.

Dans la figure IV 4(b), la boule bleue simule un capucin de masse, m , se balançant sur une branche d'arbre en utilisant sa queue de longueur L . La boule est déplacée de sa position d'équilibre d'un angle h avec une distance x , le long d'un arc dans lequel le capucin se balance. Il y a deux forces agissant sur le capucin à la position P , qui sont :

- le poids mg qui agit vers le bas verticalement,
- la tension T de la queue qui agit dans le sens de la queue.

Le poids mg peut être décomposé en :

- $mg \cos(h)$ qui identifie le poids le long de la direction de la queue,
- $mg \sin(h)$ qui identifie le poids le long de l'arc dans la direction du mouvement du capucin.



(a)



(b)

Figure IV-3 : (a) Un mouvement de balancement pour un capucin sur une branche d'arbre à l'aide de sa queue et (b) un mouvement de balancement pour un capucin sur une branche d'arbre à l'aide de ses mains

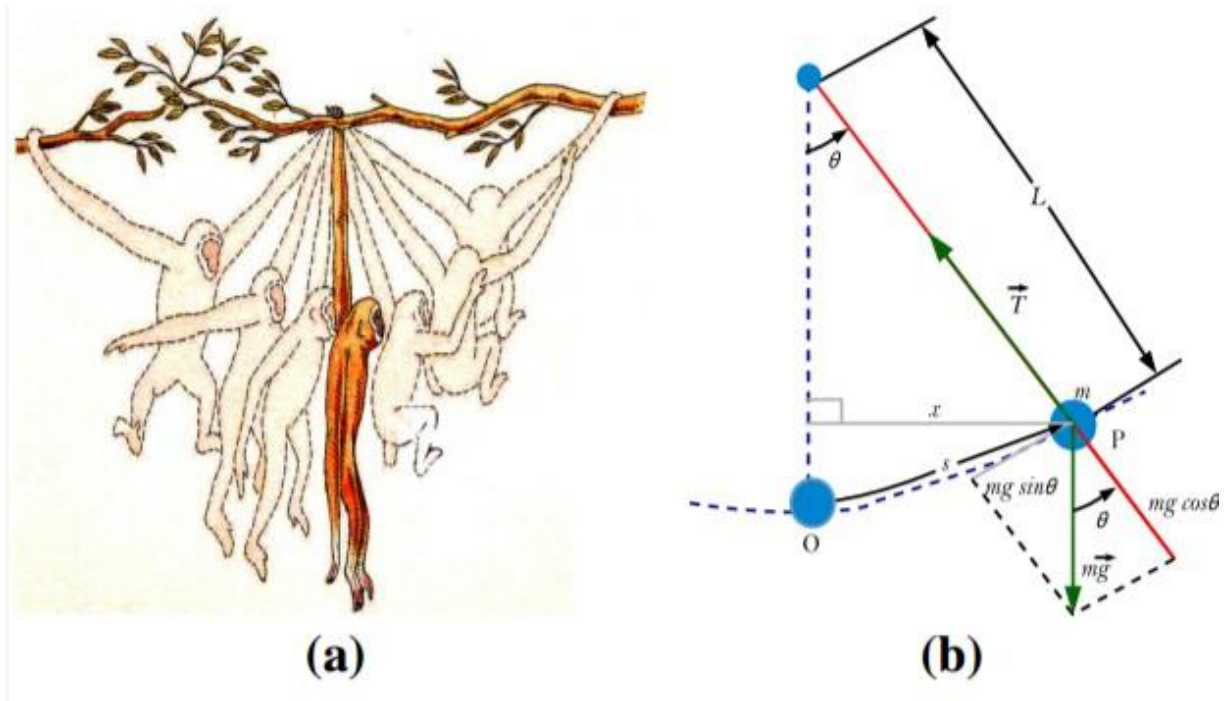


Figure IV-4 : (a) Un modèle conceptuel simulant le mouvement de balancement d'un capucin sur une branche d'arbre à l'aide de ses mains et (b) un modèle de pendule représentant le mouvement d'un objet comme un mouvement de pendule.

Selon les règles de trigonométrie, la position, x , pendant le mouvement de balancement du capucin sur la IV 4(a), peut être définie comme :

$$x = L \sin \theta \tag{4.9}$$

Où θ est l'angle auquel le capucin est déplacé de la position O .

IV.2.1.2.3 Recherche locale (Mouvement d'escalade)

Mouvement d'escalade Les capucins grimpent aux arbres et aux branches d'arbres et leurs conseils pour intensifier la recherche de nourriture dans les zones voisines pour répondre à leurs besoins quotidiens. Cette stratégie représente un mécanisme de recherche local comme en témoignent deux modèles de capucins grimpant et descendant des arbres comme le montre la figure IV 5. Ce mouvement d'escalade pourrait être décrit par un modèle représentatif et un modèle conceptuel comme le montre la figure IV 6(a), (b) respectivement. La position du

capucin lors de l'escalade ou du glissement d'un arbre peut être obtenue en utilisant une collaboration d'Eq. (4.1) et (4.2), et le résultat est montré dans l'Eq. (4.10).

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}(v_f - v_o)t^2 \quad (4.10)$$

Où t représente l'itération en optimisation qui identifie l'écart entre les itérations, qui est toujours égal à 1

IV.2.1.3 Modèle mathématique de CapSA

Dans cette section, nous présentons le modèle mathématique sous-jacent du comportement des singes capucins en locomotion et errance sur les arbres et au sol lors d'une recherche de sources de nourriture.



Figure IV-5 : (a) Un capucin grimpe à un arbre et (b) un capucin descend d'un arbre

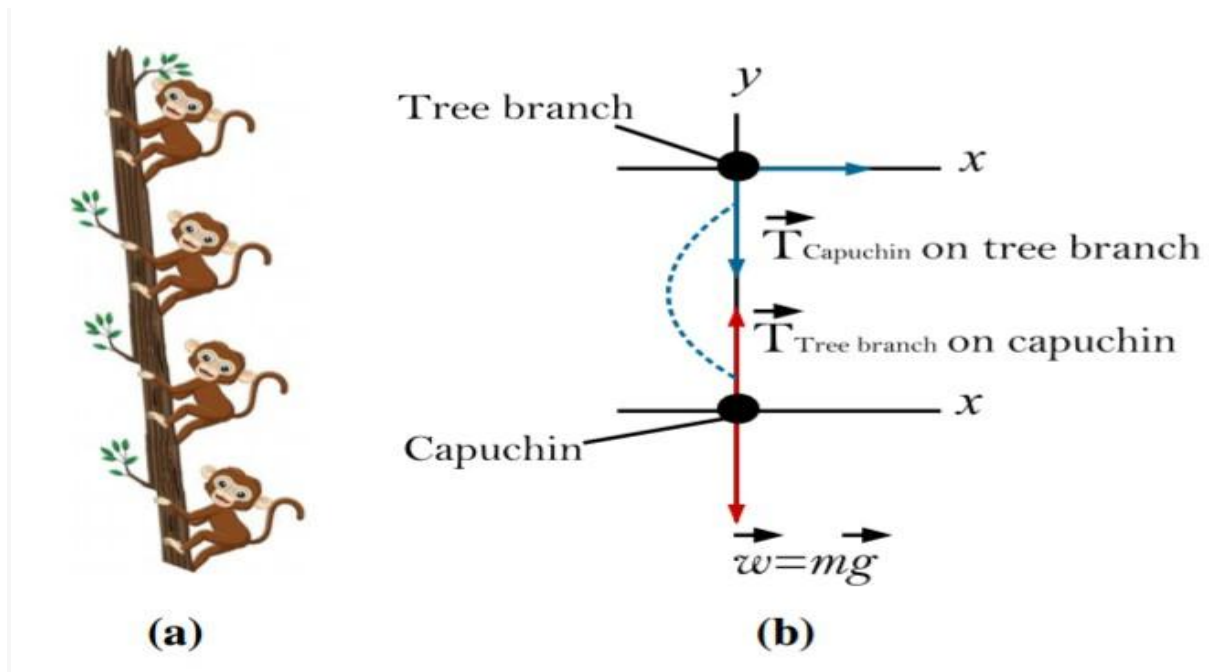


Figure IV-6 : (a) Un modèle conceptuel d'un capuchin grim pant à un arbre et (b) un modèle approximatif du comportement d'escalade d'un capuchin

IV.2.1.3.1 Initialisation de CapSA

Comme d'autres algorithmes basés sur SI, CapSA peut être décrit comme un algorithme basé sur la population qui commence par initialiser un nombre prédéterminé d'individus (c'est-à-dire des particules) au hasard. Chacun de ces individus constitue une solution candidate au problème cible. Il existe deux variétés d'individus dans les essaims de capucins : alpha (c'est-à-dire leader) et suiveurs. Le chef est un mâle ou une femelle alpha ou les deux dans certaines familles de capucins. Le leader guide généralement les suiveurs dans leur locomotion. Les adeptes sont le reste des capucins du groupe.

Un essaim de n capucins dans un domaine de recherche de dimension d peut être représenté par une matrice, x de dimension d (voir l'équation 4.11).

$$x = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & \dots & x_d^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \ddots & \ddots & x_d^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^n & x_2^n & \dots & \dots & x_d^n \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Où x représente les positions des capucins, d est le nombre de variables d'un problème test, n représente le nombre de capucins et x_d^i représente la $d^{\text{ème}}$ dimension de la position du

$i^{\text{ème}}$ capucin. L'équation (4.12) peut être utilisée pour attribuer l'emplacement initial de chaque capucin dans l'essaim.

$$x^i = lu + r \times (ub_j - lb_j) \quad (4.12)$$

Où lb_j et ub_j représentent les limites inférieure et supérieure du $i^{\text{ème}}$ capucin dans la $j^{\text{ème}}$ dimension, respectivement, et r est un nombre aléatoire qui est généré uniformément dans la plage de 0 à 1.

IV.2.1.3.2 Processus évolutif de CapSA

Dans tout algorithme méta-heuristique, il existe une population d'individus qui changent de localisation en fonction de certains paramètres de synthèse, afin qu'ils puissent mieux rechercher dans l'espace toutes les solutions possibles pour localiser les solutions optimales ou sous-optimales. La population de CapSA se compose de deux types ; (1) le leader du groupe, appelé leader alpha, et (2) les suiveurs. D'autres capucins peuvent également accompagner le leader dans son comportement de recherche de nourriture et poursuivre un comportement de locomotion similaire.

Le processus évolutif de CapSA repose sur les positions actuelles et optimales des capucins ainsi que sur la source de nourriture appelée F . La source de nourriture, F , est la cible des capucins dans le domaine de recherche d -dimensionnel qui doit être mis à jour de manière itérative. Le modèle mathématique qui décrit le comportement dynamique de l'alpha et des capucins qui l'accompagnent du leader par rapport à F et leurs nouvelles positions est formulé comme décrit ci-dessous.

Sauter sur les arbres : Les capucins alpha peuvent sauter d'arbre en arbre ou d'une branche d'arbre à une autre branche du même arbre.

Dans ce cas, la position des alphas capucins peut être donnée comme suit :

$$x_j^i = F_j + \frac{p_{bf}}{g} (v_j^i)^2 \sin(2\theta) \quad (1.13)$$

$$i < n / 2 ; 0.1 < \epsilon \leq 0.20$$

Les principaux attributs de l'équation (4.13) sont définis comme suit :

- x_j^i identifie la position des capucins alpha et des autres capucins accompagnateurs dans la $j^{\text{ème}}$ dimension,
- F_j est la position de la nourriture dans la $j^{\text{ème}}$ dimension,
- est un nombre aléatoire généré uniformément dans l'intervalle $[0, 1]$,
- p_{bf} est la probabilité de l'équilibre fourni par la queue des capucins lors du mouvement de saut,
- g est la force gravitationnelle qui est égale à 9,81,
- \emptyset est l'angle de saut des capucins,
- τ est un paramètre de durée de vie qui est systématiquement diminué au cours des itérations,
- y_j^i est la vitesse du $i^{\text{ème}}$ capucin dans la $j^{\text{ème}}$ dimension. L'angle de saut des capucins h peut être donné comme indiqué dans l'équation (4.14).

$$\theta = \frac{3}{2} r \quad (4.14)$$

Où r est un nombre aléatoire généré uniformément dans l'intervalle $[0, 1]$.

Le niveau de performance de tout algorithme méta-heuristique est jugé par sa capacité à trouver un équilibre entre l'exploration et l'exploitation. Au début de la recherche, l'algorithme nécessite d'explorer l'espace de recherche avec un nombre prédéfini de solutions dans la population de capucins. Puis, en cherchant des sources de nourriture, le besoin d'exploration diminue tandis que le besoin d'exploitation augmente.

Durée de vie de CapSA : Dans ce cadre, une fonction exponentielle de durée de vie, τ , a été proposée dans CapSA pour trouver un équilibre entre l'exploration et l'exploitation au cours des processus de recherche globaux et locaux, comme indiqué dans l'équation (4.15).

$$\tau = \beta_0 e^{\beta_1} \left(\frac{k}{K} \right)^{\beta_2} \quad (4.15)$$

Où k et K désignent respectivement les valeurs d'itération actuelle et maximale. Les paramètres β_0, β_1 et β_2 sont choisis arbitrairement comme 2, 21 et 2.

L'algorithme proposé utilise la fonction exponentielle s pour explorer l'espace de recherche avec un nombre raisonnable de solutions, où les individus explorent chaque zone de recherche pour trouver les meilleures solutions. Les valeurs produites par cette fonction ont un impact important sur l'exploration et l'exploitation, car les valeurs propres de cette formule paramétrique renforcent les capacités d'exploration et d'exploitation de l'algorithme proposé. Cet équilibre est conservé en localisant de manière adaptative les paramètres β_0 , β_1 et β_2 au cours des itérations. Les valeurs de ces paramètres ont été obtenues par une analyse et une expérimentation rigoureuses sur un grand nombre de fonctions de référence pour obtenir des performances acceptables et satisfaisantes de l'algorithme proposé. Évidemment, ils déterminent si la position suivante dans la $j^{\text{ème}}$ dimension doit être dans le sens $+\infty$ ou $-\infty$ ainsi que la taille du pas. En termes plus spécifiques, τ aide CapSA à mettre à jour efficacement les positions des capucins pour localiser rapidement la source de nourriture en explorant et en exploitant la zone environnante, et sa valeur a un impact considérable sur la précision de CapSA.

La vitesse du $i^{\text{ème}}$ capucin dans la $j^{\text{ème}}$ dimension peut être calculée comme indiqué ci-dessous.

$$v_j^i = \rho v_j^i + \tau \alpha_1 (x_{best_j}^i - x_j^i) r_1 + \tau \alpha_2 (F_j - x_j^i) r_2 \quad (4.16)$$

Étant donné que :

- $i = 1, 2, \dots, n$, représente l'indice des capucins à partir d'une population de taille n ,
- $j = 1, 2, \dots, n$, représente la dimension du problème,
- v_j^i est la vitesse actuelle du $i^{\text{ème}}$ capucin dans la $j^{\text{ème}}$ dimension,
- x_j^i est la position actuelle du $j^{\text{ème}}$ élément du $i^{\text{ème}}$ capucin,
- $x_{best_j}^i$ désigne la meilleure position du $i^{\text{ème}}$ capucin dans la $j^{\text{ème}}$ dimension,
- F_j est la position de la nourriture dans la $j^{\text{ème}}$ dimension,
- α_1 et α_2 sont deux constantes positives qui contrôlent l'influence de $x_{best_j}^i$ et F_j sur la vitesse du capucin qui a été arbitrairement choisie comme 1,0 dans le courant travail,
- r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires générés uniformément dans l'intervalle $[0, 1]$,

• le coefficient d'inertie ρ contrôle l'influence de la vitesse précédente sur le mouvement qui prend une valeur de 0,7 dans ce travail.

Sauter sur le sol Les capucins alpha peuvent sauter sur le sol d'un endroit à un autre, d'un côté d'une rivière à l'autre ou peuvent utiliser la marche normale pour rechercher des sources de nourriture. Ce comportement est utilisé par les capucins pour parcourir de grandes distances, en particulier à une époque où la nourriture se fait rare sur les arbres. Dans ce cas, la nouvelle position du chef et des capucins qui l'accompagnent peut-être identifiée comme suit :

$$x_j^i = F_j + \frac{P_{ef} P_{bf} (v_j^i)^2 \sin(2\theta)}{g} \quad (4.17)$$

$$i < n/2; 0.2 < \epsilon \leq 0.30$$

Où P_{ef} représente la probabilité d'élasticité du mouvement des capucins au sol et θ est défini dans Éq (4.14). D'un autre côté, la nouvelle position des alphas capucins lorsqu'ils utilisent la marche normale peut être calculée comme suit :

$$x_j^i = x_j^i + v_j^i$$

$$i < n/2; 0.3 < \epsilon \leq 0.50 \quad (4.18)$$

Comme on peut le déduire de l'explication ci-dessus, il y a deux paramètres fondamentaux à impliquer dans les mécanismes de locomotion que les capucins utilisent pour les aider à se déplacer vers des sources de nourriture.

1. Le premier paramètre est le facteur d'équilibre fourni par la queue de capucin. Ce paramètre est précieux pour soutenir le mouvement des capucins lors des recherches globales et locales de sources de nourriture. En outre, il est utilisé pour éviter la stagnation ainsi que pour contrôler et équilibrer le mouvement des capucins.

2. Le deuxième paramètre est le coefficient d'élasticité, qui permet au mâle alpha et à la femelle alpha d'effectuer une recherche globale au sol. Ce paramètre de contrôle aide les meneurs à augmenter la distance de saut au sol et sur les berges. Ce paramètre est analogue au coefficient d'élasticité du ressort de la loi de Hooke.

Le facteur d'équilibre et le coefficient d'élasticité, ou appelés respectivement P_{bf} et P_{ef} , permettent une exploitation et une exploration efficaces, car ces paramètres améliorent

l'efficacité des méthodes de recherche locale et globale. Les valeurs de ces paramètres sont de 0,7 et 9, qui sont obtenues après une analyse intensive.

Se balancer Certains capucins alpha et autres capucins qui les accompagnent peuvent utiliser la recherche locale pour chercher de la nourriture sur les branches des arbres et toutes les pointes des branches des arbres en errant sur de petites distances. Ils utilisent leur queue pour saisir une branche d'arbre et utilisent l'opération de balançoire pour trouver des sources de nourriture de chaque côté de la branche. Dans ce cas, la position des capucins peut être obtenue comme suit :

$$x_j^i = F_j + \tau P b_f \times \sin(2\theta) \quad (4.19)$$

$$i < n/2; 0.5 < \epsilon \leq 0.75$$

Où θ est défini dans l'équation (4.14).

Grimper : Certains capucins alpha et d'autres capucins qui les accompagnent peuvent grimper aux arbres et à leurs branches et descendre les arbres plusieurs fois pendant la recherche de nourriture dans un processus similaire à la recherche locale. Dans ce cas, la position des capucins peut être suivie comme suit :

$$x_j^i = F_j + \tau P b_f \times (v_j^i - v_{j-1}^i) \quad (4.20)$$

$$i < n/2; 0.75 < \epsilon \leq 1.0$$

Où v_j^i est la vitesse actuelle du $i^{\text{ème}}$ capucin dans la $j^{\text{ème}}$ dimension et v_{j-1}^i est la vitesse précédente du $i^{\text{ème}}$ capucin dans la $j^{\text{ème}}$ dimension.

Déplacement aléatoire des capucins : Dans certaines situations, les capucins peuvent chercher au hasard dans plusieurs nouvelles directions afin de trouver une meilleure source de nourriture. Ce comportement est utilisé par les capucins pour leur permettre d'explorer efficacement la forêt pour obtenir de nouvelles zones de sources de nourriture. Cette relocalisation aléatoire des capucins pendant la recherche de nourriture peut être formulée mathématiquement comme suit :

$$x_j^i = \tau [lb_j + \epsilon \times (ub_j - lb_j)] \quad (4.21)$$

$$i < n/2; \epsilon \leq P_r$$

P_r Est une constante positive de 0,1 pour représenter la probabilité de recherche aléatoire des capucins, ub_j et lb_j indiquent les bornes supérieure et inférieure de l'espace de recherche dans la $j^{\text{ème}}$ dimension.

La recherche aléatoire des capucins telle que formulée dans l'Eq (4.21) peut améliorer la capacité de recherche globale de CapSA avec la fonction de randomisation et le comportement d'essaimage des capucins. Cela peut également améliorer la capacité de recherche locale et éviter les solutions optimales locales.

En somme, comme indiqué dans les équations. Du (4.13) au (4.20), les capucins changent de position actuelle en fonction de la disponibilité des sources de nourriture, où la nourriture est la cible de la recherche ou l'objectif que les capucins recherchent dans l'espace de recherche. Ces cas se produisent spécifiquement lorsque $r > 0.1$.

D'autre part, dans l'éq (4.21), les capucins de CapSA changent de manière aléatoire leur position dans l'espace de recherche pendant la recherche de nourriture. Il s'agit d'explorer différentes nouvelles zones afin de trouver des aliments à proximité qui représentent leurs objectifs optimaux. Cela se produit spécifiquement lorsque $r \leq 0.1$. Dans ce cas, le paramètre τ a été suggéré pour renforcer l'équilibre entre l'exploration et l'exploitation de l'espace de recherche.

La position des suiveurs est mise à jour en fonction des positions des alpha capucins grâce à l'utilisation de la troisième loi du mouvement telle que définie dans l'équation (4.22) :

$$x_f = x_i + v_o t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (4.22)$$

Où x_f et x_i sont les déplacements finaux et initiaux, t est l'instance temporelle, v_o désigne la vitesse initiale et a représente l'accélération donnée dans l'équation (4.23).

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_o}{t_1 - t_0} \quad (4.23)$$

Où t_1 et t_0 représentent les instances temporelles finale et initiale et le paramètre v_f représente la vitesse finale, donnée comme présenté ci-dessous :

$$v_f = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{x_f - x_0}{t_1 - t_0} \quad (4.24)$$

Remplacez l'équation (4.24) dans l'éq (4.23) et considérons, $v_0 = 0$ alors a peut-être exprimé comme indiqué ci-dessous :

$$a = \frac{x_f - x_0}{(t_1 - t_0)^2} \quad (4.25)$$

Comme le temps d'optimisation dénote une itération, la différence entre les itérations successives, $t_i - t_{i-1}$, est égale à une valeur de 1. Sur la base des équations (4.22) et (4.25), nous pouvons concevoir une formule qui peut être utilisée pour simuler le comportement des suiveurs lorsqu'ils suivent les leaders comme indiqué dans l'équation (4.26) :

$$x_j^i = \frac{1}{2}(x_j^i + x_j^{i-1}) \quad , \quad \frac{n}{2} \leq i \leq n \quad (4.26)$$

Soit :

- x_j^i est la position actuelle des suiveurs dans la $j^{\text{ème}}$ dimension,
- x_j^{i-1} identifie la position précédente des suiveurs dans la $(j - 1)^{\text{ème}}$ dimensions,
- x_j^i est la position actuelle des leaders dans la $j^{\text{ème}}$ dimension,

IV.2.1.3.3 Évaluation de l'aptitude de la fonction

D'aptitude de chaque capucin est évaluée en définissant les valeurs des variables de décision (c'est-à-dire le vecteur de solution) dans une fonction d'aptitude définie par l'utilisateur. Les valeurs correspondantes sont stockées dans une matrice, f , sous la forme suivante :

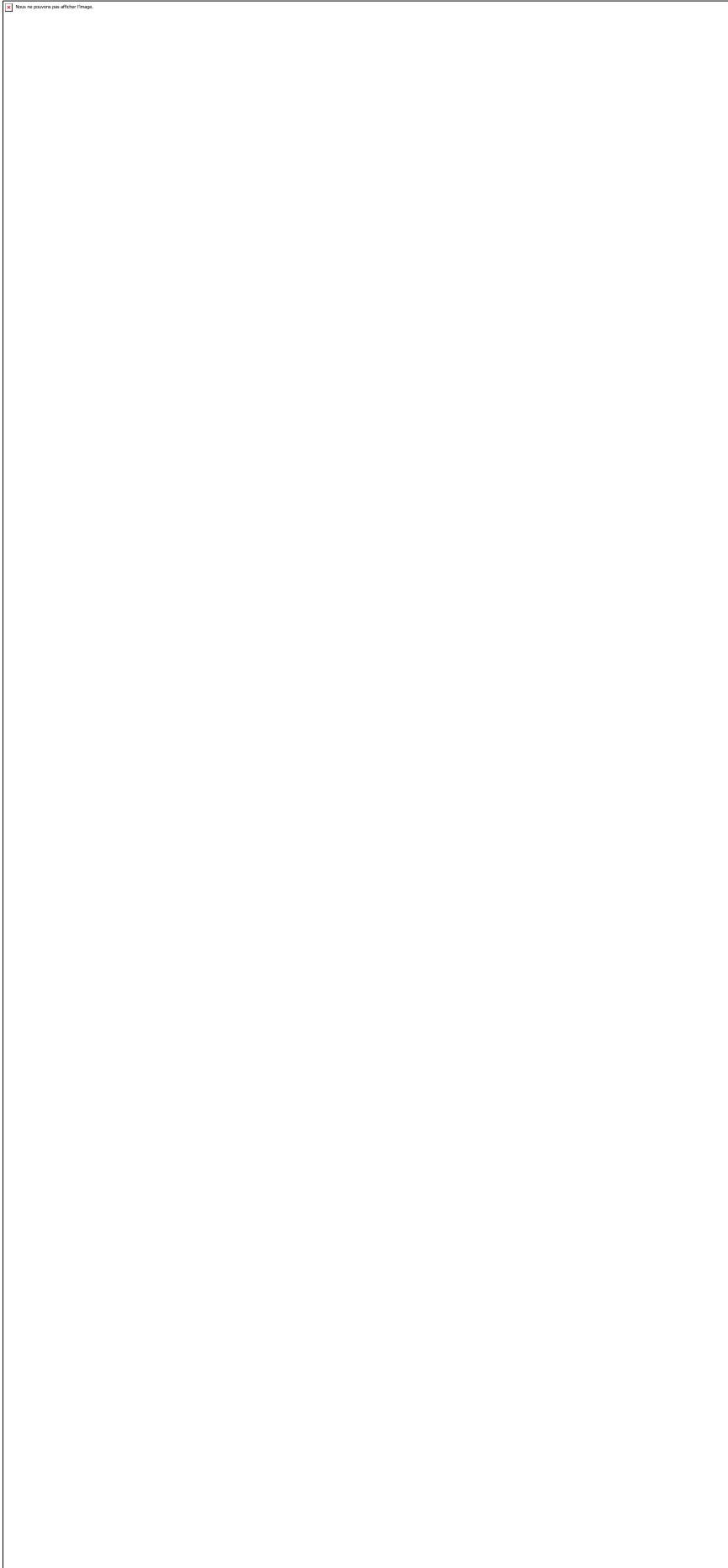
$$f = \begin{bmatrix} f_1([x_1^1, x_2^1 \dots \dots x_d^1]) \\ f_2([x_1^2, x_2^2 \dots \dots x_d^2]) \\ \vdots \\ f_n([x_1^n, x_2^n \dots \dots x_d^n]) \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

IV.2.1.4 Analyse de CapSA Naturellement

L'algorithme proposé s'inspire du comportement naturel et des pratiques des capucins lors de l'activité de recherche de nourriture dans la vie réelle. Les modèles mathématiques présentés pour l'algorithme d'optimisation proposé sont similaires aux activités du capucin lorsqu'il erre sur les arbres, le sol et les berges lors de la recherche de sources de nourriture. Le

modèle mathématique de CapSA qui imite le comportement des capucins dans l'errance et la recherche de nourriture a tiré parti des générateurs de nombres aléatoires pour le rendre applicable pour résoudre des problèmes d'optimisation du monde réel. L'objectif final d'un optimiseur à objectif unique est d'identifier la solution globale optimale, qui est la source de nourriture dans l'algorithme proposé. Ici, dans le modèle d'essaim proposé, le capucin alpha se déplace vers la source de nourriture (c'est-à-dire la solution globale) et les adeptes poursuivent les capucins alpha de manière itérative tout au long de l'attribution des solutions optimales (c'est-à-dire la solution globale). Typiquement, le problème est que l'optimum global des problèmes d'optimisation est inconnu. Dans un tel cas, il est présumé que la meilleure solution obtenue jusqu'à présent est la meilleure solution globale et est censée être la source de nourriture pourchassée par les capucins. De plus, lorsque les suiveurs mettent à jour leurs positions en apprenant du leader et de l'expérience personnelle dans les premier, deuxième, troisième, quatrième et cinquième cas de l'algorithme proposé, les suiveurs fournissent des mécanismes de rétroaction favorables à l'auto-organisation. Le cas de relocalisation aléatoire des capucins est responsable des fluctuations dans la recherche de sources de nourriture où les membres capucins stagnants sont redirigés vers d'autres endroits. Le pseudocode de CapSA peut être résumé par les étapes procédurales itératives, comme décrit dans l'algorithme 1.

L'algorithme 1 montre que CapSA initie le processus d'optimisation en générant aléatoirement une population de solutions (capucins). Après cela, la solution créée est évaluée à l'aide d'une fonction de fitness, où le fitness de chaque capucin est recalculé à l'intérieur de chaque boucle d'itération afin d'identifier le capucin avec la solution optimale. Dans CapSA, la solution la plus adaptée et appelée la source de nourriture, F , qui sera poursuivie par l'alpha et les capucins qui l'accompagnent et poursuivie par d'autres capucins (c'est-à-dire les suiveurs). A chaque boucle d'itération, la fonction exponentielle, s , est mis à jour à l'aide de l'Eq (4.15), et pour chaque dimension, les positions des leaders alpha (meilleurs capucins) sont mises à jour à l'aide des équations. (4.13) à (4.21), tandis que les positions des suiveurs sont mises à jour à l'aide de l'Eq (4.26).



L'algorithme 1 montre que CapSA initie le processus d'optimisation en générant aléatoirement une population de solutions (capucins). Après cela, la solution créée est évaluée à l'aide d'une fonction de fitness, où le fitness de chaque capucin est recalculé à l'intérieur de chaque boucle d'itération afin d'identifier le capucin avec la solution optimale. Dans CapSA, la solution la plus adaptée et appelée la source de nourriture, F , qui sera poursuivie par l'alpha et les capucins qui l'accompagnent et poursuivie par d'autres capucins (c'est-à-dire les suiveurs). A chaque boucle d'itération, la fonction exponentielle, s , est mis à jour à l'aide de l'Eq (4.15), et pour chaque dimension, les positions des leaders alpha (meilleurs capucins) sont mises à jour à l'aide des équations. (4.13) à (4.21), tandis que les positions des suiveurs sont mises à jour à l'aide de l'Eq (4.26).

Les dirigeants sont probablement en mesure d'identifier une meilleure solution en explorant et en exploitant la région environnante. Les leaders ont le potentiel d'aller de l'avant vers l'optimum global (c'est-à-dire la solution globale) au cours des itérations. Cette capacité est mise en œuvre sur la base des positions actuelles et meilleures des capucins en plus de la position de la source de nourriture. Par conséquent, les capucins alpha sont constamment capables d'explorer et d'exploiter l'espace près de la source de nourriture. Si l'un des capucins sort de la zone de recherche, il sera ramené à la limite en fonction des étapes simulées proposées pour CapSA. Toutes les étapes procédurales de CapSA, à l'exception de l'étape d'initialisation, sont répétées à chaque itération jusqu'à ce que la condition de terminaison soit atteinte. Pour découvrir comment le modèle d'essaim de capucins proposé et CapSA peuvent être invoqués pour résoudre les problèmes d'optimisation, quelques commentaires sont introduits comme suit :

- CapSA stocke la meilleure solution.
- CapSA met à jour la position du leader des capucins de la source de nourriture (F) à chaque itération, de sorte que le leader explore et exploite toujours l'espace de recherche environnant lors de la recherche de la solution globalement optimale (c'est-à-dire trouver la source de nourriture).
- CapSA met à jour la position des suiveurs concernant leurs positions actuelles et la position des leaders de manière itérative afin qu'ils se dirigent progressivement vers les leaders qui déterminent la meilleure solution obtenue jusqu'à présent.
- CapSA a un paramètre de contrôle principal, s , pour équilibrer l'exploration et l'exploitation. Ce paramètre est réduit de manière adaptative au cours des itérations, ce qui permet à CapSA

d'explorer la majeure partie de l'espace de recherche au début du processus de recherche, puis d'exploiter les zones prometteuses de l'espace de recherche.

Les remarques théoriques ci-dessus confirment la potentialité de CapSA dans l'exploration et l'exploitation fiable de la zone environnante des sources de nourriture. Ces affirmations rendent CapSA capable de résoudre les problèmes d'optimisation avec des espaces de recherche inconnus. De plus, la stratégie adaptative de CapSA lui permet de contourner les solutions locales et de localiser une estimation précise de la meilleure solution globale obtenue lors de l'optimisation. Par conséquent, cet algorithme proposé peut être appliqué aux fonctions unimodales et multimodales en plus de nombreux problèmes d'optimisation du monde réel. Les caractéristiques susmentionnées de CapSA sont susceptibles de lui permettre de mieux fonctionner que de nombreux algorithmes de pointe tels que ABC [80], CS [5], KH [81], FOA [82], GWO [83]. Cependant, cela ne peut pas être garanti pour tous les problèmes d'optimisation selon la théorie de la NFL.

Comme décrit ci-dessus, l'algorithme proposé résout les problèmes d'optimisation avec des dimensions données en trouvant les solutions globales qui représentent les sources de nourriture en mettant à jour de manière itérative les positions des leaders et des suiveurs jusqu'à ce qu'ils trouvent les sources de nourriture (c'est-à-dire des solutions globales). Par conséquent, l'algorithme proposé a une complexité de calcul définie comme :

$$O(v(K(Pd + Pc))) \quad (4.28)$$

Où :

- v est le nombre d'expériences d'évaluation,
- K est le nombre maximum d'itérations,
- p est le nombre de solutions (ie., nombre d'agents de recherche),
- d est le nombre de variables du problème d'optimisation (ie., dimension du problème)
- c désigne le coût de la fonction objectif du problème d'optimisation

Le nombre d'agents de recherche est généralement plusieurs fois supérieures au coût de la fonction objective, qui dépend généralement de la complexité du problème. Le nombre de variables dans le problème est généralement inférieur au nombre d'agents de recherche, mais le

nombre de variables est approximativement similaire au coût de la fonction objective. Ainsi, le facteur d est d'amplitude similaire à c , et p constitue un facteur significatif de l'évaluation de la complexité. Ainsi, l'ordre du problème de complexité du calcul CapSA peut être réduit à :

$$O(vKpd) \quad (4.29)$$

Les revendications et hypothèses ci-dessus sont étudiées expérimentalement sur les fonctions de référence standard et les problèmes de conception technique, comme indiqué dans les Sectes. 6 et 8, respectivement.

IV.2.2 Méthode de honey badger

L'optimisation fait référence au processus consistant à trouver les meilleures solutions pour un système donné à partir de toutes les valeurs possibles afin de maximiser ou de minimiser la sortie. Au cours des dernières décennies, alors que la complexité des problèmes a augmenté, le besoin de nouvelles techniques d'optimisation est devenu impérieux [84, 85]. Auparavant, les techniques mathématiques conventionnelles qui ont été utilisées pour résoudre les problèmes d'optimisation sont pour la plupart déterministes et souffrent d'un problème majeur : le piégeage des optima locaux. Cela rend ces techniques très inefficaces pour résoudre des problèmes d'optimisation réels, ce qui a conduit à un intérêt croissant pour les techniques d'optimisation stochastique au cours des deux dernières décennies [86, 87]. Souvent, la plupart des problèmes d'optimisation du monde réel, dans le domaine de l'ingénierie [88], des réseaux de capteurs sans fil [89], du traitement d'images [90], de la sélection de fonctionnalités [91, 92], du réglage des paramètres d'apprentissage automatique [93], la bio-informatique [94] etc., sont hautement non linéaires et non convexes en raison de contraintes complexes inhérentes et de nombreuses variables de conception. Par conséquent, la résolution de ces types de problèmes d'optimisation est complexe en raison de nombreux minima locaux inhérents. De plus, il n'y a aucune garantie de trouver une solution globale [95]. Ainsi, les difficultés associées à ces types de problèmes d'optimisation de la vie réelle motivent à développer des techniques alternatives et efficaces pour de meilleures solutions. Afin de trouver une meilleure solution, de nombreux chercheurs ont essayé de proposer de nouveaux algorithmes et/ou d'améliorer les méthodes existantes. La communauté de recherche méta heuristique a mis en place des stratégies de recherche utiles pour obtenir l'optimum global. Parce que, dans les problèmes d'optimisation de la vie réelle, l'espace de recherche croît de façon exponentielle et rend le paysage du problème hautement multimodal, les méthodes d'optimisation conventionnelles produisent souvent des

solutions sous-optimales. Cela a, au cours des dernières décennies, conduit au développement de nombreux nouveaux algorithmes méta heuristiques [96]. Ces méthodes ont montré des performances robustes sur un plus large éventail de problèmes complexes pour obtenir les solutions optimales.

Récemment, diverses stratégies de recherche ont été efficacement incorporées dans des algorithmes méta heuristiques ; principalement inspirés de la nature, simulant des principes de biologie, de physique, d'éthologie ou d'intelligence en essaim [97, 98]. Il est intéressant de noter que certains d'entre eux, tels que l'algorithme génétique [99], l'optimisation des essaims de particules (PSO) [100] et l'algorithme d'optimisation d'Archimède [101], sont assez bien connus non seulement des informaticiens mais aussi des universitaires d'autres domaines. Cela a donné lieu à des travaux théoriques approfondis et à des applications pratiques utilisant des techniques méta heuristiques, principalement pour plusieurs raisons majeures, notamment la flexibilité, le mécanisme sans gradient et l'évitement des optima locaux. Comme ces méthodes sont sans gradient, il n'est pas nécessaire de calculer la dérivée de l'espace de recherche ; réduisant ainsi les coûts de calcul, étant très flexible pour résoudre un large éventail de problèmes. En raison de ces avantages, l'application des méta heuristiques peut être trouvée dans différentes branches de la science et de l'industrie [102, 103].

Les algorithmes méta heuristiques sont classés en deux classes principales : les approches basées sur une solution unique et basées sur la population. La littérature a mis en évidence des algorithmes basés sur la population ayant une meilleure capacité à explorer l'espace de recherche et à exploiter l'optimum global, par rapport aux algorithmes basés sur une solution unique [104]. Les algorithmes basés sur la population, selon les sources d'inspiration, peuvent être divisés en trois catégories principales : (1) Les algorithmes d'intelligence en essaim (SI) incluent des techniques basées sur l'essaim qui imitent le comportement social de groupes d'insectes ou d'animaux. (2) Les algorithmes évolutifs (EA), qui suivent le processus d'évolution naturel trouvé dans la nature. Et, (3) des algorithmes de phénomènes naturels (NP) qui imitent les principes physiques et chimiques ; tandis que certains incluent ceux inspirés par le comportement humain, mais ne sont ni SI ni EA.

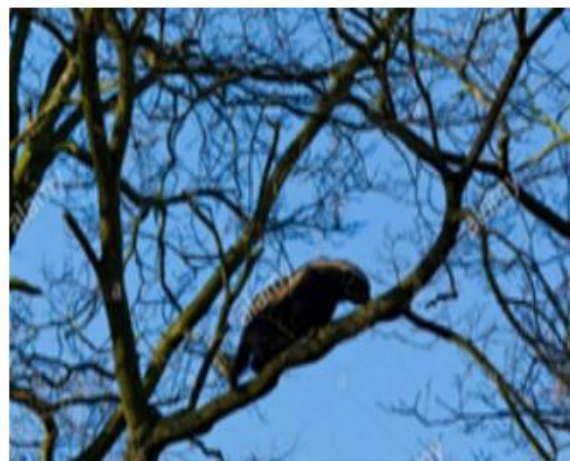
Les algorithmes méta heuristiques du SI imitent les comportements auto-organisés et collectifs dans la nature. Ces algorithmes s'inspirent du comportement social des animaux, des oiseaux, des plantes et des humains. Certains des algorithmes méta heuristiques bien connus sont : Grasshopper Optimization Algorithm (GOA) [105], Whale Optimization Algorithm (WOA) [106], Elephant Herding Optimization (EHO) [107, 108], Harris Hawks optimisation

(HHO) [109] et Moth flame Optimization (MFO) [110]. D'autre part, les EA sont un type de méthodes d'optimisation globale stochastique inspirées de l'évolution naturelle et des mécanismes génétiques [111], telles que Genetic Algorithm (GAs) [112], Evolution Strategy (ES) [113], Covariance Matrix Adaptation Evolution ary Strategy (CMA-ES) [114], et des variantes d'évolution différentielle adaptative basées sur l'histoire avec réduction linéaire de la taille de la population (L-SHADE) [115]. Les algorithmes NP imitent les règles physiques ou chimiques de l'univers. Certains des algorithmes populaires et récents sont le recuit simulé (SA) [116], l'optimisation de l'échange thermique (TEO) [117] et l'optimisation de la solubilité des gaz Henry [118].

Malgré le besoin de plus d'évaluations de fonctions, la littérature montre que les algorithmes basés sur la population sont parfaitement adaptés pour résoudre de vrais problèmes difficiles [119]. Logiquement, le théorème du No-Free-Lunch (NFL) [120] indique qu'il n'y a pas d'algorithme d'optimisation méta heuristique capable de résoudre tous les problèmes d'optimisation ou encore des problèmes non encore résolus. Ces deux raisons sont la motivation massive pour présenter un nouvel algorithme méta heuristique appelé Honey Badger Algorithm (HBA) qui imite le comportement de recherche de nourriture du blaireau à miel. Parce que la capacité à maintenir l'équilibre entre l'exploration et l'exploitation joue un rôle important dans une recherche efficace, HBA encapsule.



(a)



(b)

Figure IV-7 : (a) Le blaireau à miel attaque le lion, et (b) Le blaireau à miel grimpe aux branches supérieures des arbres [46]

Stratégies de recherche dynamique. Cette caractéristique permet à HBA de résoudre des problèmes d'optimisation difficiles avec de nombreuses régions locales, car il maintient une grande diversité de population tout au long du processus de recherche pour étudier une vaste zone du paysage donné. En outre, 24 problèmes d'optimisation mathématique standard, la suite de tests CEC'17 et quatre problèmes d'optimisation de conception technique du monde réel sont résolus. La comparaison avec dix algorithmes méta heuristiques établis, dont SA, PSO, CMA-ES, L-SHADE, MFO, EHO, WOA, GOA, TEO et HHO, valide l'efficacité de l'algorithme HBA proposé.

Finalement, les principales contributions de cette recherche sont les suivantes :

1. Nous proposons un nouvel algorithme d'optimisation basé sur l'essaim, à savoir HBA, qui imite le comportement de Honey Badger.
2. La signification statistique, la vitesse de convergence, le rapport exploitation-exploration et la diversité des HBA sont évalués par rapport aux algorithmes méta heuristiques de pointe.
3. Nous effectuons une série d'expériences pour étudier l'impact des performances de l'algorithme proposé sur les problèmes d'optimisation de référence, la suite de tests CEC'17 et les problèmes de conception technique du monde réel, ce qui est considéré comme une combinaison de tests difficile dans la littérature connexe.
4. HBA surpasse les autres algorithmes concurrents sur les problèmes d'optimisation difficiles.

Le reste de l'article est organisé comme suit : la section 2 fournit l'inspiration et le modèle mathématique de l'algorithme HBA. Les expériences sur les problèmes de référence standard et CEC'17 sont détaillées dans la section 3, où les résultats relatifs sont également rapportés. La section 4 met en évidence la mise en œuvre expérimentale sur des problèmes de conception technique, ainsi que la présentation des résultats associés. La section 5 présente en outre une analyse approfondie des performances de HBA par rapport à plusieurs autres algorithmes méta heuristiques. Enfin, la section 6 conclut l'article et suggère des orientations potentielles pour de futures études.

IV.2.2.1 Algorithme Honey Badger

Cette section traite de l'inspiration et du modèle mathématique de l'algorithme Honey Badger (HBA) qui imite le comportement du blaireau à miel dans la nature.

IV.2.2.1.1 Biologie générale du blaireau à miel

Le blaireau à miel est un mammifère à la fourrure duveteuse noire et blanche que l'on trouve souvent dans les semi-déserts et les forêts tropicales humides d'Afrique, d'Asie du Sud-ouest et du sous-continent indien, connu pour sa nature intrépide. Ce chien de taille (60 à 77 cm de longueur corporelle et 7 à 13 kg de poids corporel) intrépide butineur s'attaque à soixante espèces différentes, dont les dangereux serpents. C'est un animal intelligent capable d'utiliser des outils, et il adore le miel. Il préfère rester solitaire dans des trous auto-creusés et ne rencontre les autres blaireaux que pour s'accoupler. Il existe 12 sous-espèces reconnues de blaireau à miel. Il n'y a pas de saison de reproduction spécifique pour les blaireaux car les oursons naissent tout au long de l'année. En raison de sa nature courageuse, il n'hésite jamais à attaquer des prédateurs encore plus gros lorsqu'il ne peut pas s'échapper (voir figure IV 7, a). Cet animal peut également facilement grimper sur les arbres, comme le montre la figure IV 7, b pour atteindre les nids d'oiseaux et les ruches pour se nourrir [121, 122].

Un blaireau localise sa proie en marchant lentement et en continu à l'aide des compétences de la souris odorante. Il commence à déterminer l'emplacement approximatif de la proie en creusant et finalement en l'attrapant. En une journée, il peut creuser jusqu'à cinquante trous dans un rayon de quarante kilomètres ou plus lors de tentatives de recherche de nourriture. Le blaireau à miel aime le miel, mais il n'est pas bon pour localiser les ruches. D'autre part, le miel-guide (un oiseau) peut localiser les ruches mais ne peut pas obtenir de miel. Ces phénomènes conduisent à une relation entre les deux, où l'oiseau conduit le blaireau vers les ruches et l'aide à ouvrir les ruches à l'aide de ses longues griffes, puis tous deux profitent de la récompense du travail d'équipe[123].

IV.2.2.1.2 Inspiration

Honey Badger Algorithm (HBA) imite le comportement de recherche de nourriture du blaireau à miel. Pour localiser la source de nourriture, le blaireau à miel sent et creuse ou suit l'oiseau guide-miel. Nous appelons le premier cas le mode creusement tandis que le second le mode miel. Dans le mode précédent, il utilise son odorat pour se rapprocher de l'emplacement de ses proies ; en atteignant là, il se déplace autour de la proie pour sélectionner l'endroit approprié pour creuser et attraper la proie. Dans ce dernier mode, le blaireau à miel prend le guide de l'oiseau guide du miel pour localiser directement la ruche.

IV.2.2.1.3 Modèle mathématique

Comme discuté précédemment, HBA est divisé en deux phases qui sont la « phase de creusement » et la « phase de miel », expliquées en détail comme suit :

➤ **Étapes algorithmiques**

Cette section présente la formulation mathématique de l'algorithme HBA proposé. Théoriquement, HBA est équipé à la fois de phases d'exploration et d'exploitation, et peut donc être qualifié d'algorithme d'optimisation globale. Le pseudocode de l'algorithme proposé est présenté dans l'algorithme 1 ; y compris l'initialisation de la population, l'évaluation de la population et la mise à jour des paramètres. Mathématiquement, les étapes du HBA proposé sont détaillées comme suit. Ici, la population de solutions candidates dans HBA est représentée par :

$$\text{Population de solutions candidates} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1D} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2D} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & \dots & x_{nD} \end{bmatrix}$$

i position du blaireau à miel $x_i = [x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D]$

Étape 1 : Phase d'initialisation. Initialiser le nombre de blaireaux à miel (taille de population N) et leurs positions respectives en fonction de l'équation. (4.30) :

$$x_i = lb_i + r_1 \times (ub_i - lb_i), r_1 \text{ est un nombre aléatoire entre 0 et 1} \quad (4.30)$$

Où x_i est la i ème position du blaireau à miel faisant référence à une solution candidate dans une population de N , tandis que lb_i et ub_i sont respectivement les limites inférieure et supérieure du domaine de recherche.

Étape 2 : Définition de l'intensité (I). L'intensité est liée à la force de concentration de la proie et à la distance entre elle et le blaireau à miel. I_i est l'intensité de l'odeur de la proie ; si l'odeur est élevée, le mouvement sera rapide et vice versa, est donné par la loi carrée inverse [124] comme le montre la Figure IV 8 et est défini par l'équation. (4.31).

$$I_i = r_2 \frac{S}{4\pi d_i^2}, r_2 \text{ est un nombre aléatoire entre 0 et 1}$$

$$S = (x_i - x_{i+1})^2 \quad (4.31)$$

$$d_i = x_{prey} - x_i$$

Où S est la force de la source ou la force de la concentration (emplacement de la proie comme indiqué sur la Figure IV 8). Dans l'éq (4.31), d_i dénote la distance entre la proie et le $i^{\text{ème}}$ blaireau.

Étape 3 : Mettre à jour le facteur de densité. Le facteur de densité (α) contrôle la randomisation variable dans le temps pour assurer une transition en douceur de l'exploration à l'exploitation. Mettez à jour le facteur décroissant α qui diminue avec les itérations pour diminuer la randomisation avec le temps, en utilisant l'éq (4.32).

$$\alpha = C \times \exp\left(\frac{-t}{t_{max}}\right), t_{max} = \text{nombre maximum d'itérations} \quad (4.32)$$

Où C est une constante ≥ 1 (par défaut = 2).

Étape 4 : Échapper à l'optimum local. Cette étape et les deux étapes suivantes sont utilisées pour s'échapper des régions d'optimum locales. Dans ce contexte, l'algorithme proposé utilise un indicateur F qui modifie la direction de la recherche pour offrir aux agents de grandes opportunités de parcourir rigoureusement l'espace de recherche

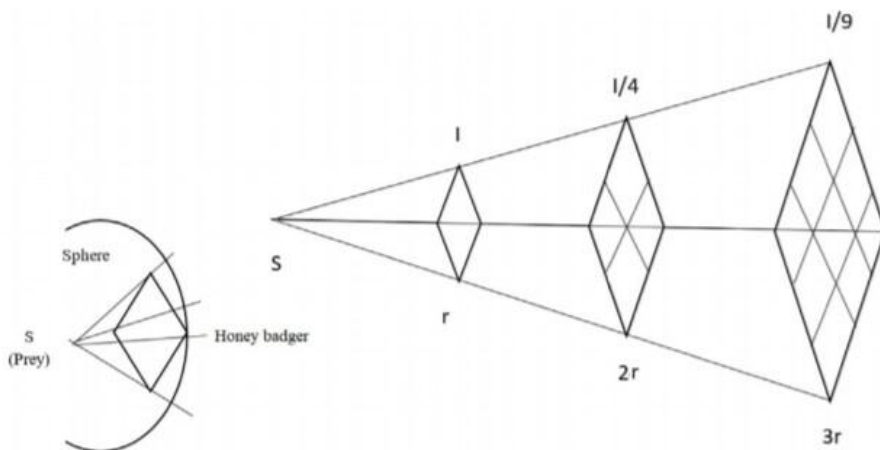


Figure IV-8 : Loi du carré inverse. I est l'intensité de l'odeur, S est l'emplacement de la proie et r est un nombre aléatoire compris entre 0 et 1

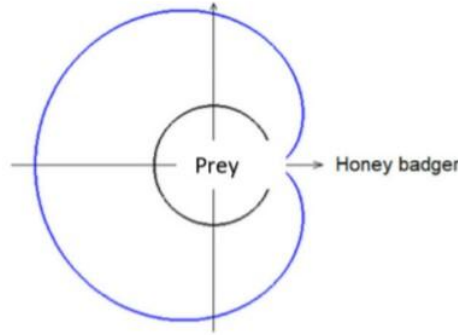


Figure IV-9 : Phase de creusement : le contour bleu représente l'intensité de l'odeur, la ligne circulaire noire indique l'emplacement des proies. (Pour l'interprétation des références à la couleur dans cette légende de la figure

Étape 5 : Mise à jour des positions des agents. Comme indiqué précédemment, le processus de mise à jour de la position HBA (x_{new}) est divisé en deux parties qui sont la « phase de creusement » et la « phase de miel ». Voici une meilleure explication :

Étape 5_1 : Phase de creusement. En phase de creusement, un blaireau à miel effectue une action similaire à la forme cardioïde [125], comme le montre la Figure IV 9. Le mouvement cardioïde peut être simulé par l'équation. (4.33) :

$$x_{new} = x_{prey} + F \times \beta \times I \times x_{new} + F \times r_3 \times \alpha \times d_i |\cos(2\pi r_4) \times [1 - \cos(2\pi r_5)]| \quad (4.33)$$

Où x_{prey} est la position de la proie qui est la meilleure position trouvée jusqu'à présent – la meilleure position globale en d'autres termes. $\beta \geq 1$ (par défaut = 6) est la capacité du blaireau à se nourrir.

d_i est la distance entre la proie et le $i^{ème}$ blaireau, voir Eq. (4.31). r_3 , r_4 et r_5 sont trois nombres aléatoires différents entre 0 et 1. F fonctionne comme l'indicateur qui modifie la direction de la recherche, il est déterminé à l'aide de l'équation. (4.34) :

$$F = \begin{cases} 1 & \text{si } r_6 \leq 0.5 \\ -1 & \text{autre, } r_6 \text{ est un nombre aléatoire entre 0 et 1} \end{cases} \quad (4.34)$$

Dans la phase de creusement, un blaireau à miel dépend fortement de l'intensité de l'odeur I de la proie x_{proie} , de la distance entre le blaireau et la proie d_i , et du facteur d'influence de la recherche variant dans le temps α . De plus, lors de l'activité de creusement, un blaireau peut recevoir toute perturbation F qui lui permet de trouver encore mieux l'emplacement de ses proies (voir Figure IV 9).

Étape 5-2 : Phase de miel. Le cas où un blaireau suit un oiseau guide pour atteindre la ruche peut être simulé par l'éq (4.35).

$$x_{new} = x_{prey} + F \times \beta \times r_7 \times \alpha \times d_i \quad r_7 \text{ est un nombre aléatoire entre 0 et 1} \quad (3.35)$$

où x_{new} fait référence à la nouvelle position du blaireau à miel, alors que x_{prey} est l'emplacement de la proie, F et β sont déterminés à l'aide des équations (4.34) et (4.32), respectivement. De l'éq (4.35), on peut observer qu'un blaireau à miel effectue une recherche à proximité de l'emplacement des proies x_{prey} trouvées jusqu'à présent, sur la base des informations de distance d_i . A ce stade, la recherche est influencée par le comportement de recherche variant dans le temps (α). De plus, un blaireau à miel peut trouver des perturbations F .

Algorithm 1 Pseudo code of HBA.

```

Set parameters  $t_{max}, N, \beta, C$ .
Initialize population with random positions.
Evaluate the fitness of each honey badger position  $x_i$  using objective function and assign to  $f_i, i \in [1, 2, \dots, N]$ .
Save best position  $x_{prey}$  and assign fitness to  $f_{prey}$ .
while  $t \leq t_{max}$  do
  Update the decreasing factor  $\alpha$  using (3).
  for  $i = 1$  to  $N$  do
    Calculate the intensity  $I_i$  using Eq. (2).
    if  $r < 0.5$  then                                      $\triangleright r$  is random number between 0 and 1
      Update the position  $x_{new}$  using Eq. (4).
    else
      Update the position  $x_{new}$  using Eq. (6).
    end if
    Evaluate new position and assign to  $f_{new}$ .
    if  $f_{new} \leq f_i$  then
      Set  $x_i = x_{new}$  and  $f_i = f_{new}$ .
    end if
    if  $f_{new} \leq f_{prey}$  then
      Set  $x_{prey} = x_{new}$  and  $f_{prey} = f_{new}$ .
    end if
  end for
end while Stop criteria satisfied.
Return  $x_{prey}$ 

```

Théoriquement, HBA est considéré comme un algorithme d'optimisation global en raison des phases d'exploration et d'exploitation. Afin de rendre HBA facile à mettre en œuvre et à comprendre, le nombre d'opérateurs à régler est minimisé. Notez que la complexité de calcul de la méthode proposée est de $O(t_{max}ND)$ où t_{max} montre le nombre maximum d'itérations, N est le nombre de solutions ou la taille de la population, et D indique le nombre de variable de décision. Par conséquent, la complexité globale, y compris la fonction objective définie dans les équations. (4.33) et (4.35) est calculé comme $O(t_{max}ND)$.

IV.2.2.1.4 Phases d'exploration et d'exploitation

L'exploration et l'exploitation sont les deux composantes majeures de toute stratégie de recherche [126]. L'exploration est assurée en étendant la recherche à des régions éloignées de l'espace de recherche. D'autre part, par exploitation, les agents de recherche convergent vers une région prometteuse déjà identifiée, en utilisant une stratégie de recherche locale [127]. Le facteur important pour maintenir l'équilibre entre les deux capacités contradictoires est d'assurer une bonne quantité d'aléatoire [128]. A cet égard, l'algorithme HBA a trois paramètres de contrôle principaux.

(1) I : est l'intensité et elle concerne deux parties principales. Le premier est la distance entre le blaireau et sa proie, cette valeur est diminuée ou augmentée avec le temps ce qui résulte de l'ajustement de l'intensité pour permettre aux agents de recherche de passer de l'exploration à l'exploitation et vice versa selon l'état de l'individu donné. La deuxième partie est la distance entre chacun des deux agents de recherche voisins qui porte l'interaction entre les agents de recherche, échappant ainsi à l'optimum local.

(2) α : est un facteur de contrôle de randomisation qui diminue avec le temps pour réduire la diversité de la population au cours des itérations. Cela permet d'obtenir le compromis requis entre l'exploration et l'exploitation.

(3) F : est le drapeau qui change la direction de recherche des agents et fournit une diversité de population pour une exploration rigoureuse de l'espace de recherche donné.

Habituellement, les capacités d'exploration et d'exploitation sont analysées théoriquement dans la recherche méta-heuristique, sans fournir de mesures pratiques substantielles. Dans cet article, l'exploration et l'exploitation sont obtenues en utilisant la mesure de la diversité dimensionnelle présentée par Hussain et al. dans [128]. Selon cette approche, au cours du processus de recherche, l'exploration peut être mesurée par l'augmentation de la valeur moyenne de la distance dans les dimensions de la population ; d'autre part, une valeur moyenne réduite peut être considérée comme une phase d'exploitation où les agents de recherche sont localisés dans une région concentrée. Cela dit, si la valeur moyenne réduite de la diversité dimensionnelle reste constamment inchangée, alors on peut suggérer que l'algorithme a atteint la convergence. Ici, il est important de noter que si la convergence est atteinte tôt dans les itérations sans trouver l'optimum global, alors un algorithme est supposé souffrir d'un problème de convergence prématuré. Cela implique qu'une stratégie de recherche efficace ne permet pas aux agents de recherche de converger sans une

exploration suffisante de l'espace de recherche. Dans le processus de recherche, la diversité dimensionnelle peut être mesurée par l'équation. (4.36).

$$Div_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{mediane}(x^j) - x_i^j \quad (4.36)$$

$$Div^t = \frac{1}{D} \sum_{j=1}^D Div_j, t = 1, \dots, t_{max}$$

où x_i^j est la j ème dimension de la i ème position du blaireau et médiane (x^j) est la valeur médiane de la j ème dimension dans la population de N solutions candidates. Le Div_j est la diversité moyenne pour la dimension j . Cette diversité dimensionnelle est ensuite moyennée en Div^t sur toutes les dimensions D pour l'itération t . Une fois la diversité de la population calculée pour toutes les itérations t_{max} , il est maintenant possible de déterminer le pourcentage d'exploration et d'exploitation en utilisant l'équation. (4.37) :

$$\text{Exploration \%} = \frac{Div^t}{\max(Div)} \times 100$$

$$\text{Exploration \%} = \frac{|Div^t - \max(Div)|}{\max(Div)} \times 100 \quad (4.37)$$

Où $\max(Div)$ est la diversité maximale en t_{max} itérations

IV.3 Application et résultats

Dans cette section, grâce aux résultats obtenus à partir du calcul de la fonction objective Finesse qui indique la vitesse de convergence dans une structure et Best qui indique le taux d'endommagement dans une structure, qui ont été calculés grâce à deux algorithmes d'optimisation (CapSA, Capuchin search algorithm) et (HBA, honey badger algorithm). nous avons établi deux types de graphiques pour représenter les résultats de quantification des endommagements dans deux structures : deux structures plaque (SSSS) et (CCCF) à (25) éléments en 2D pour deux scénarios d'endommagements :

1. Premier scénario : Élément (13) de cette structure est endommagé.
2. Deuxième scénario : les éléments (7) et (18) sont endommagés.

Afin de réaliser une étude comparative, l'étude a été faite à la base d'indicateurs d'endommagement obtenu précédemment, et en faisant varier les populations et les itérations comme suit : PP=500, IT=100 et PP=100, IT=500.

Structure SSSS

1. Premier scenario d'endommagement

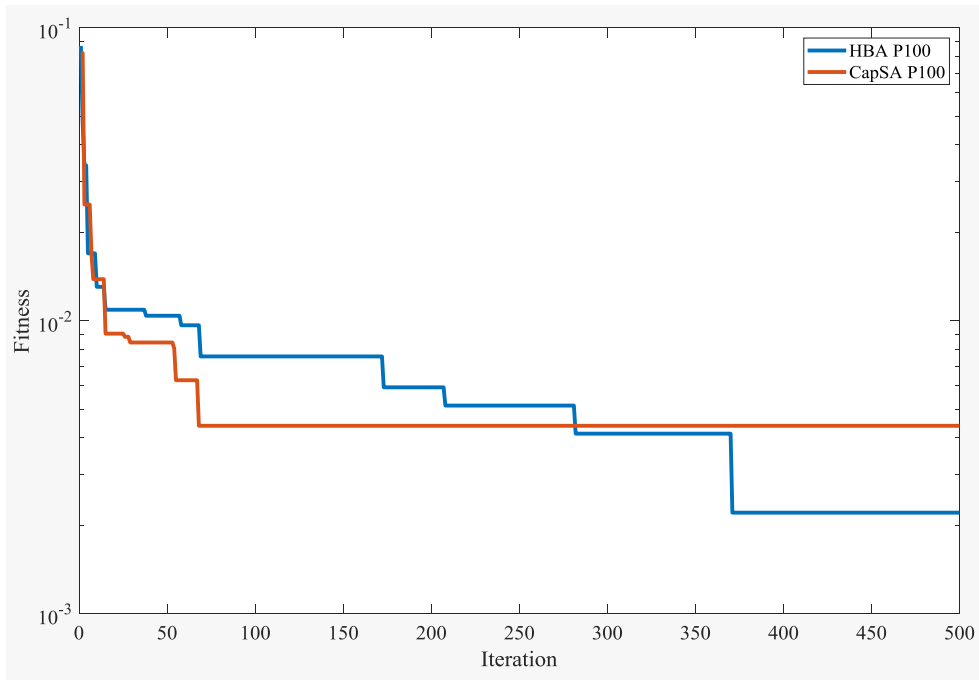


Figure IV-10 : fitness du premier scenario d'endommagement PP=100, IT=500

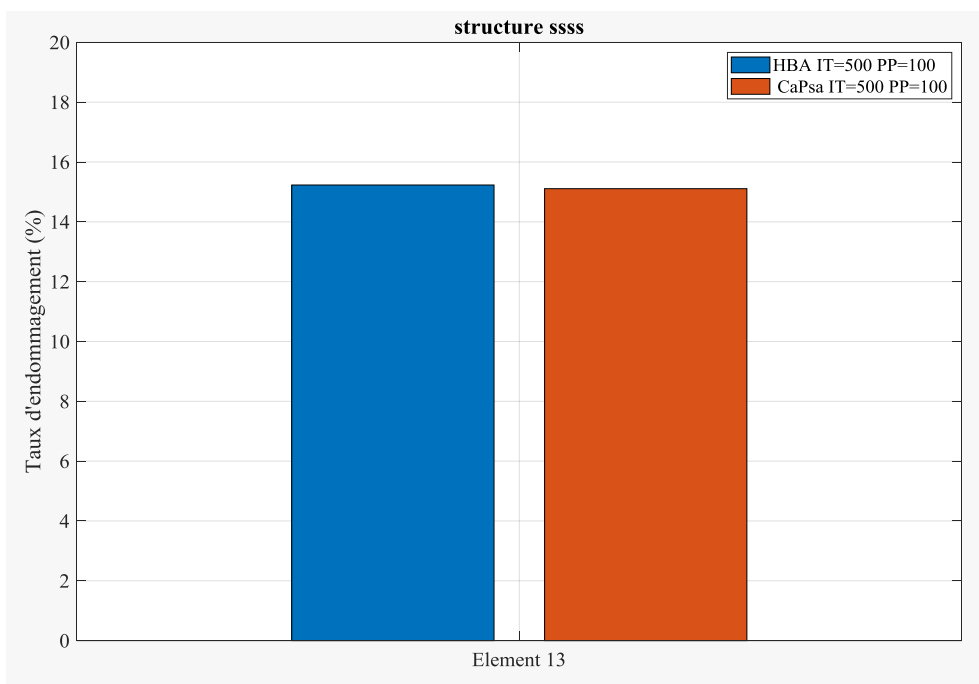


Figure IV-11 : BEST bar du premier scenario PP=100 , IT=500

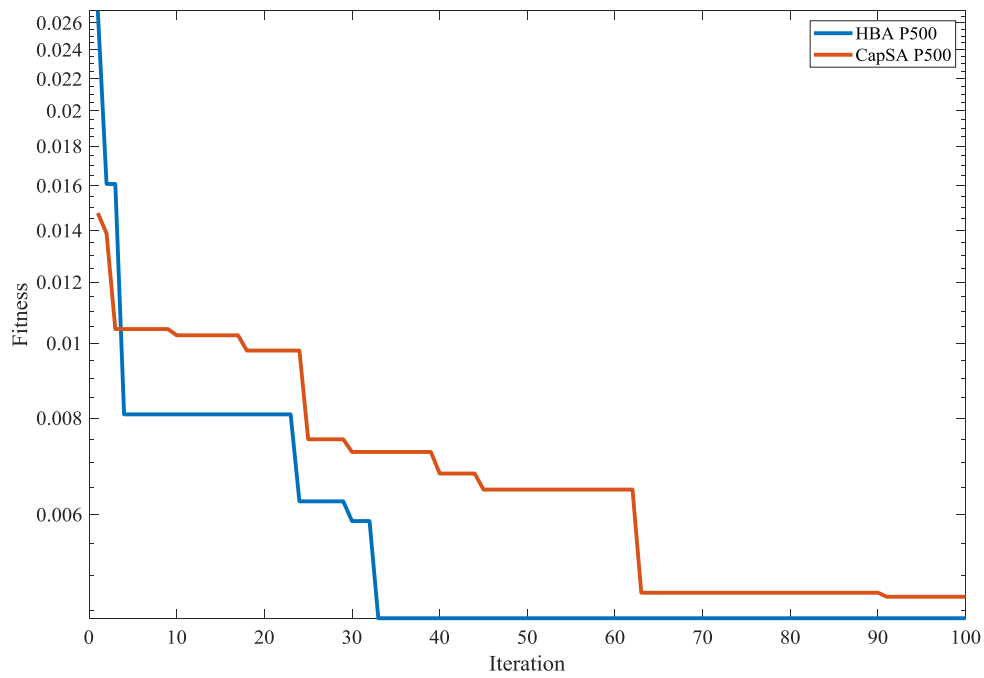


Figure IV-12 : fitness du premier scenario d'endommagement PP=500, IT=100

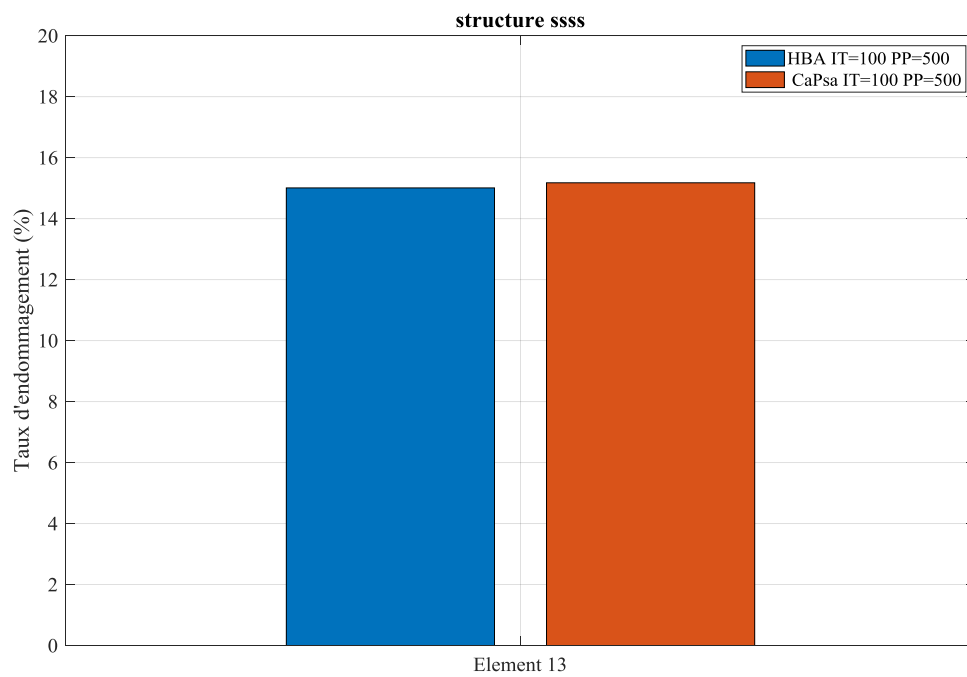


Figure IV-13 : BEST bar du premier scenario PP=500, IT=100

Itérations fixées à 100				Itération fixées à 500	
Itérations	Best CapSA	Best HBA	itération	Best CapSA	Best HBA
1	14,90572%	15,123673%	1	15,2031748033%	18,4427698276%
10	15,28595%	15,221905%	50	15,0291023177%	14,9036173658%
20	100,00000%	15,258987%	100	14,1569048443%	15,1092562987%
30	14,96574%	15,046551%	150	0,0000000163%	15,1092562987%
40	14,96744%	15,094770%	200	0,0000000294%	15,1092562987%
50	15,11522%	15,018201%	250	14,8231275699%	15,1092562987%
60	14,93560%	15,018201%	300	13,8505320771%	15,1092562987%
70	14,09926%	15,011526%	350	17,2271019146%	15,1092562987%
80	14,81318%	15,011526%	400	15,4626044428%	15,1092562987%
90	15,14289%	15,011526%	450	14,7727604924%	15,1092562987%
100	15,17453%	15,006798%	500	15,2313879766%	15,1092562987%

Tableau IV-1 : Valeur best des méthodes CapSA et HBA pour le premier scenario d'endommagement de structure SSSS pour des itérations fixées à 100 est 500.

Pour ce premier scenario d'endommagement les résultats donnés et illustrés dans les figures ci-dessus, montrent d'après les courbes du taux d'endommagement, que les deux méthodes donnent le même taux d'endommagement voulu, en ce qui concerne les courbes des vitesses de convergence (erreur), la méthode HBA montre une meilleure vitesse de convergence.

2. Deuxième scénario d'endommagement

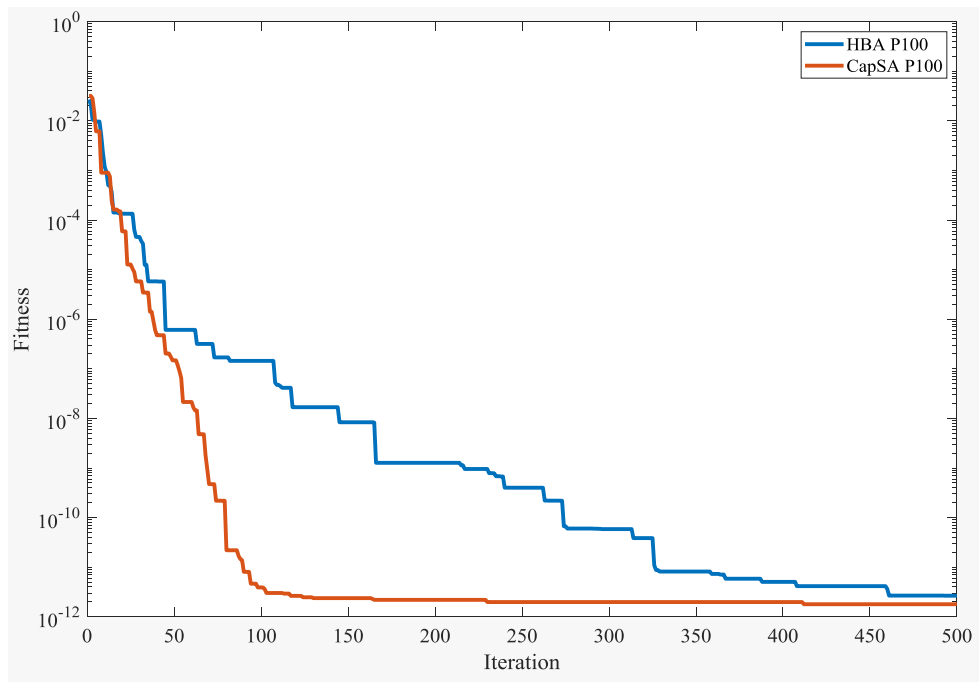


Figure IV-14 : fitness du deuxième scénario d'endommagement $PP=100, IT=500$

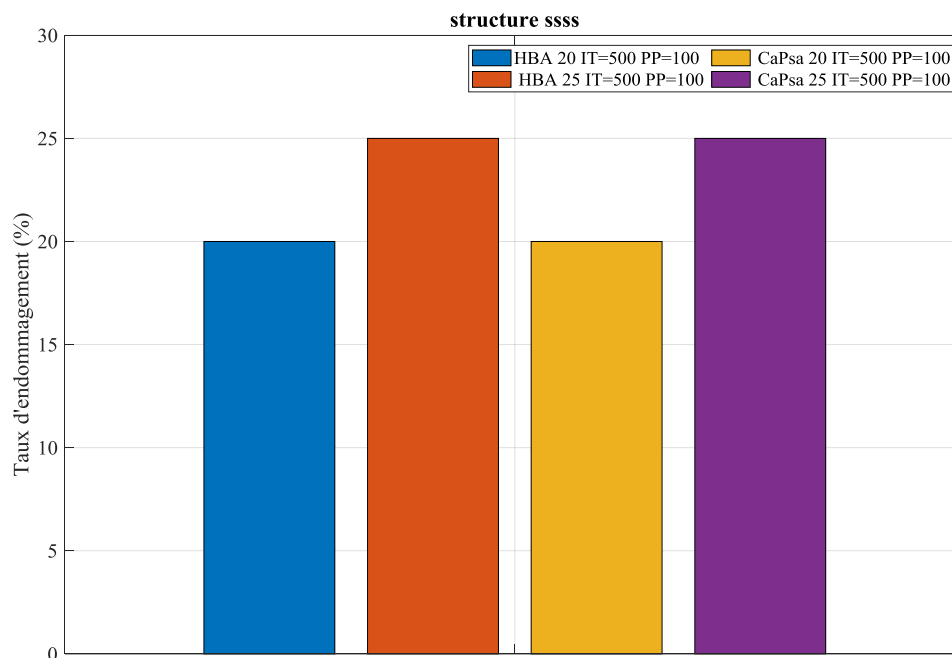


Figure IV-15 : BEST bar du deuxième scénario $PP=100, IT=500$

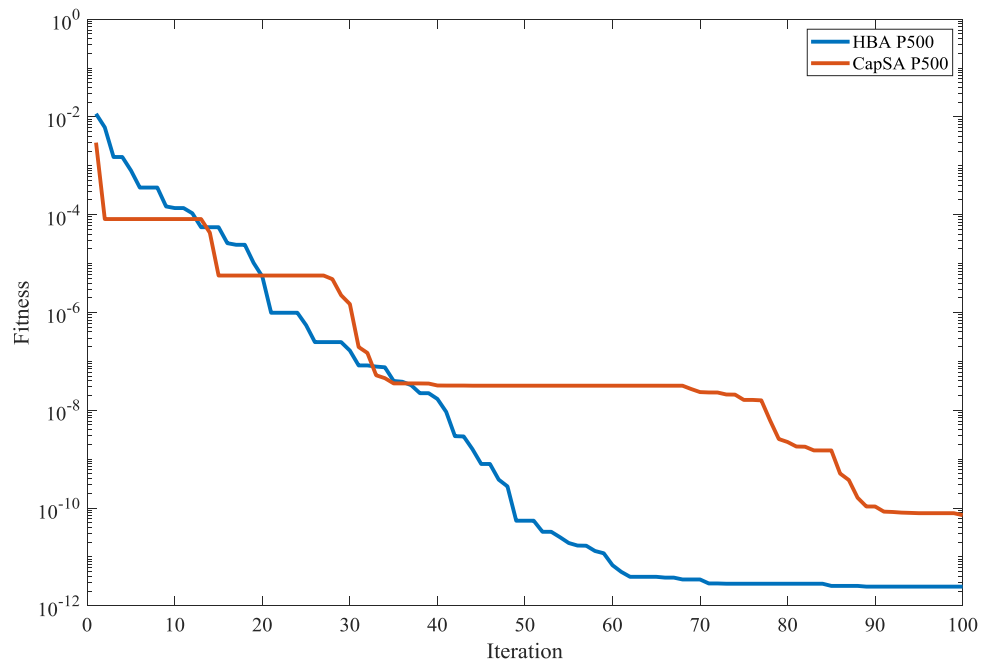


Figure IV-16 : fitness du deuxième scenario d'endommagement PP=500, IT=100

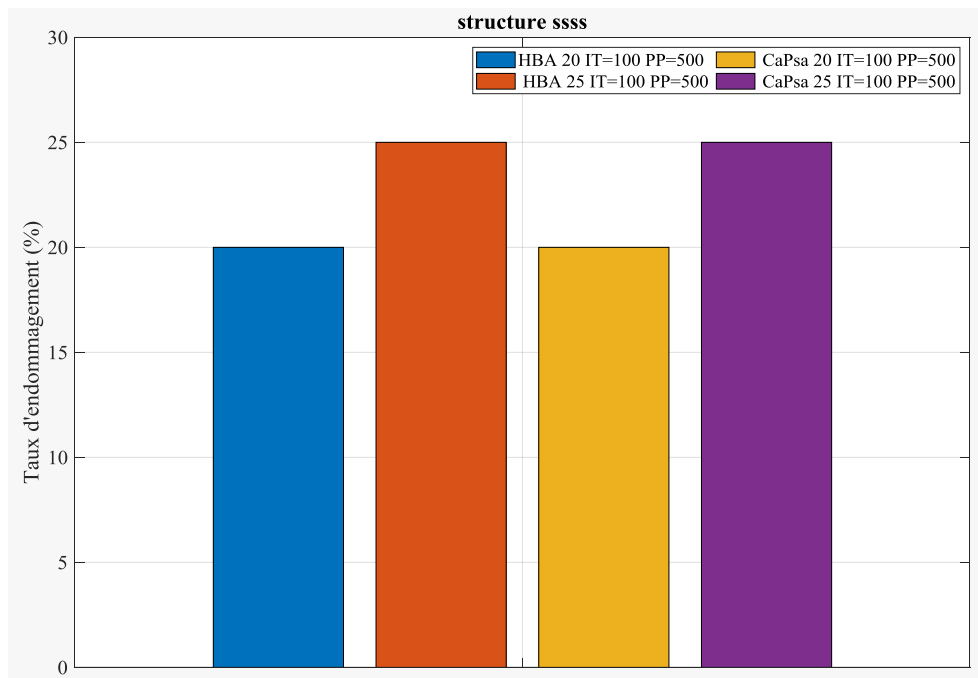


Figure IV-17 : BEST bar du deuxième scenario PP=500, IT=100

Itérations fixées à 100					Itérations fixées à 500				
Itérations	Best CapSA		Best HBA		Itérations	Best CapSA		Best HBA	
	1	83,70333817731%	88,7033381773%	19,59555213643%		25,1207235964%	1	19,975158925%	25,0371176528%
10	20,10730872376%	25,0004235578%	20,00492570349%	24,9994072435%	50	19,976035008%	25,0120586701%	20,000002047040%	25,00000740360%
20	20,02312036763%	26,4608893800%	19,99998448346%	24,9997173399%	100	19,478261488%	24,2830727165%	19,99999999958%	25,00000000004%
30	20,01332085637%	25,0504529553%	19,99999398774%	25,0000003899%	150	20,002061391%	25,0000061566%	19,99999999983%	24,9999999996%
40	26,33437785275%	40,4257923580%	20,00000061200%	25,0000002378%	200	20,000007955%	25,0003263096%	19,9999999998%	24,9999999996%
50	30,17365483411%	27,3008586536%	19,99999999900%	24,999999974%	250	26,437650443%	36,3781609265%	19,9999999996%	24,9999999996%
60	20,00993521055%	25,0022469310%	19,99999999978%	25,0000000001%	300	19,999998729%	25,0000001433%	19,9999999996%	24,9999999996%
70	20,00000970245%	25,0000021940%	19,9999999996%	24,999999999%	350	20,000000843%	25,0000010940%	19,9999999996%	24,9999999996%
80	20,00000000945%	25,0000000021%	20,00000000004%	24,999999999%	400	19,999506986%	24,9998601469%	19,9999999996%	24,9999999996%
90	20,00000000032%	25,0000000006%	20,00000000002%	24,999999999%	450	20,000000070%	25,0000091161%	19,9999999996%	24,9999999996%
100	20,00000000001%	25,0000000002%	20,00000000002%	24,999999999%	500	20,000005836%	25,0000037942%	19,9999999996%	24,9999999996%

Tableau IV-2 : Valeur best des méthodes CapSA et HBA pour le deuxième scenario d'endommagement de structure SSSS pour des itérations fixées à 100 est 500.

Pour ce deuxième scenario d'endommagement, une similitude existe par rapport au premier cas, car les taux d'endommagements initiaux sont donnés par les deux méthodes, sauf que pour les vitesses de convergences, la méthode HBA affiche une nette supériorité.

Structure CCCF

3. Premier scenario d'endommagement

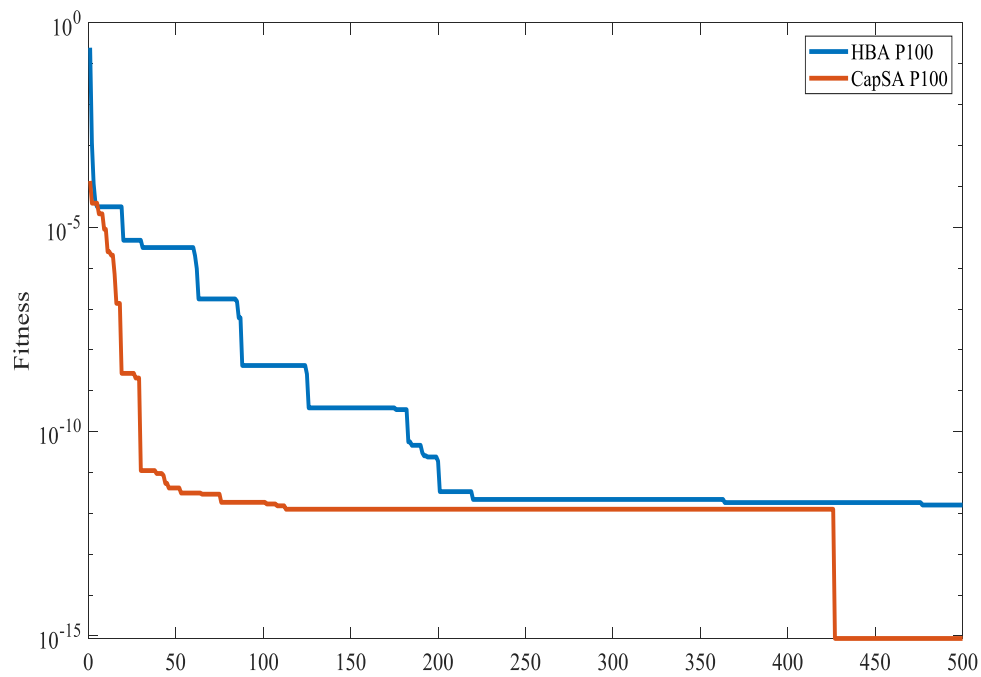


Figure IV-18: fitness du premier scenario d'endommagement $PP=100$, $IT=500$

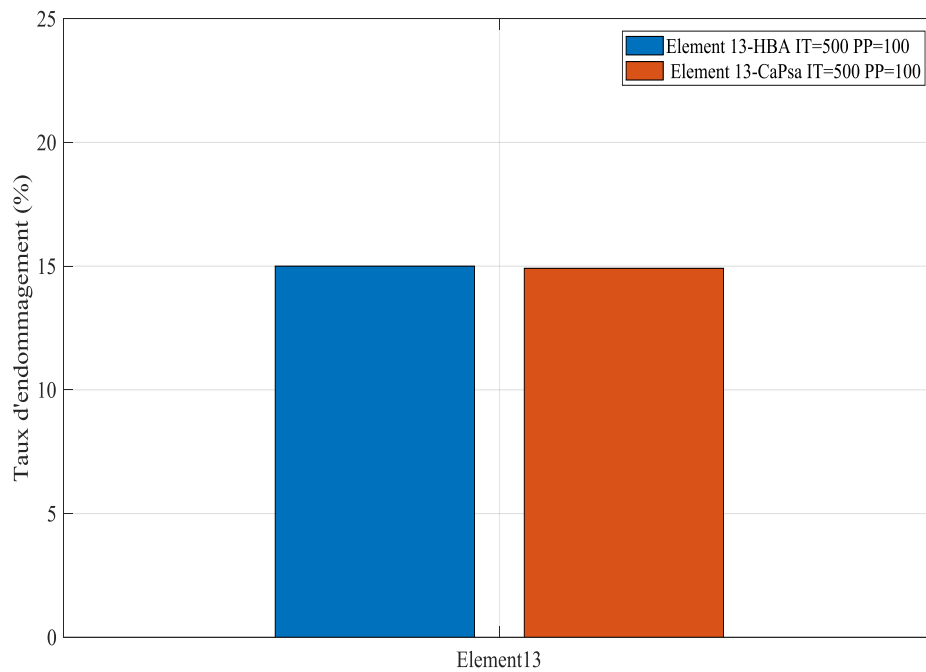


Figure IV-19 : BEST bar du premier scenario $PP=100$, $IT=500$

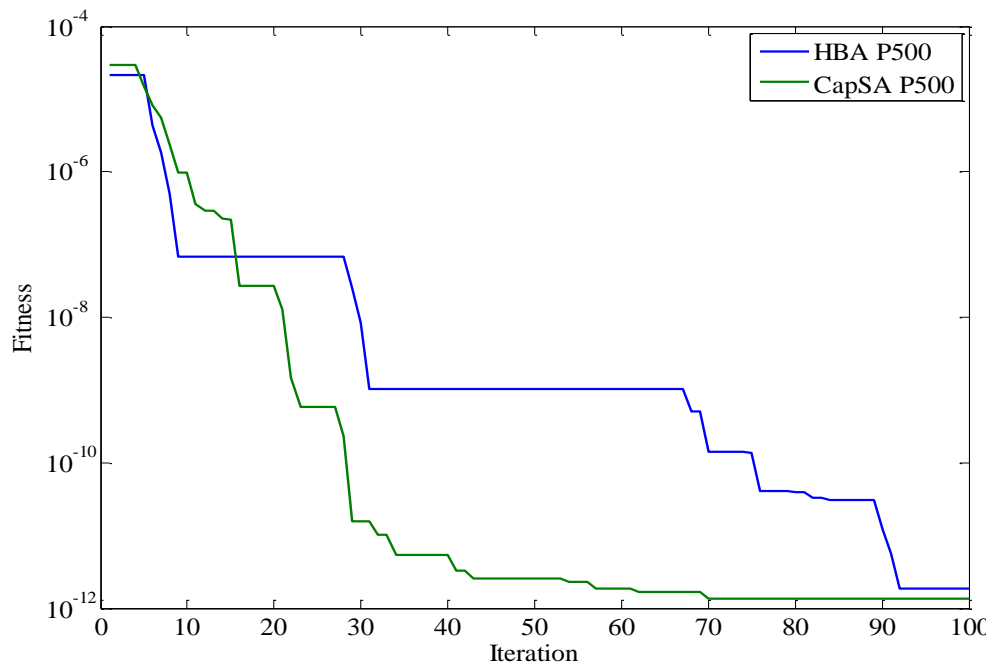


Figure IV-20: fitness du premier scenario d'endommagement PP=500, IT=100

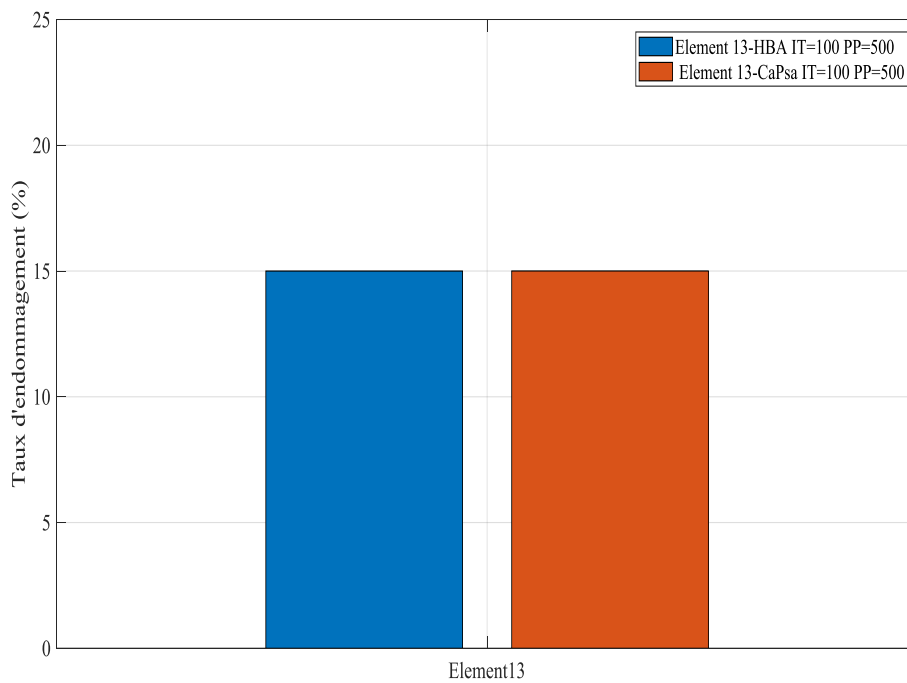


Figure IV-21 : BEST bar du premier scenario PP=500, IT=100

Itération fixées à 100			Itération fixées à 500		
Itération	Best HBA	Best CapSA	Itération	Best HBA	Best CapSA
1	15,014094%	35,10215103%	1	15,012776501%	35,102151025%
10	15,000100%	95,48022076%	50	15,000000000%	14,758174250%
20	15,000000%	14,79754854%	100	15,000000000%	15,003204961%
30	15,000000%	15,12703801%	150	15,000000000%	4,611551489%
40	15,000000%	15,66683334%	200	15,000000000%	14,789017617%
50	15,000000%	14,75817425%	250	15,000000000%	5,119733955%
60	15,000000%	15,55598348%	300	15,000000000%	15,021644062%
70	15,000000%	77,16670451%	350	15,000000000%	14,899753660%
80	15,000000%	15,00000039%	400	15,000000000%	27,389097535%
90	15,000000%	15,00000100%	450	15,000000000%	15,015058968%
100	15,000000%	15,00320496%	500	15,000000000%	14,912626936%

Tableau IV-3 : Valeur best des méthodes CapSA et HBA pour le premier scénario d'endommagement de structure CCCF pour des itérations fixées à 100 est 500.

On constate pour ce scénario que les vitesses de convergences sont plus élevées en utilisant l'algorithme CapSA, mais pour les taux d'endommagement (Best) la méthode HBA donne des résultats plus fiables.

4. Deuxième scénario d'endommagement

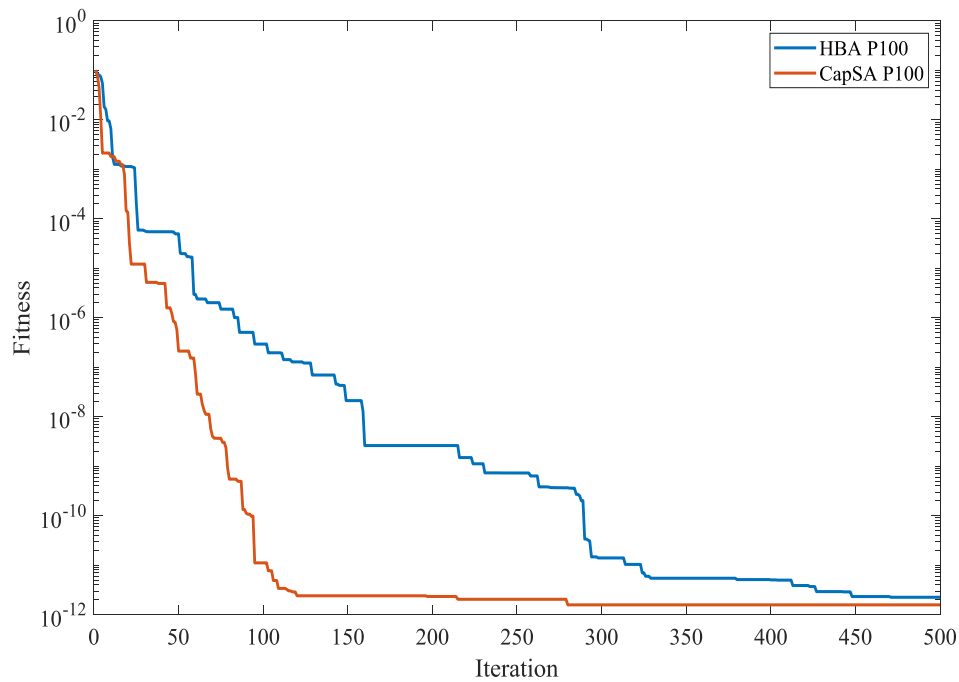


Figure IV-22 : fitness du deuxième scénario d'endommagement $PP=100$, $IT=500$

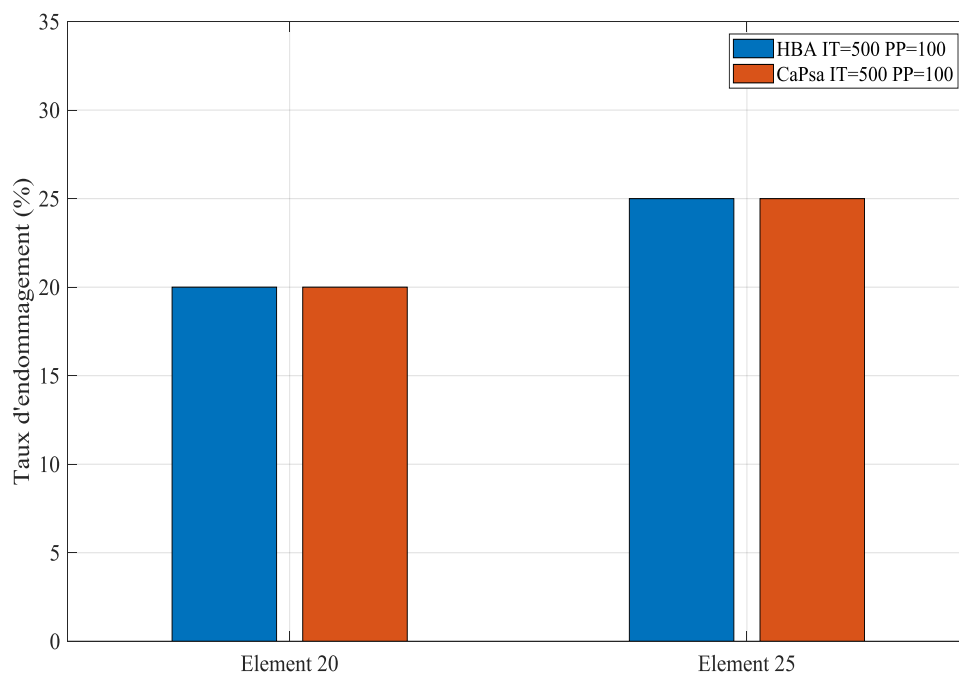


Figure IV-23 : BEST bar du deuxième scénario $PP=100$, $IT=500$:

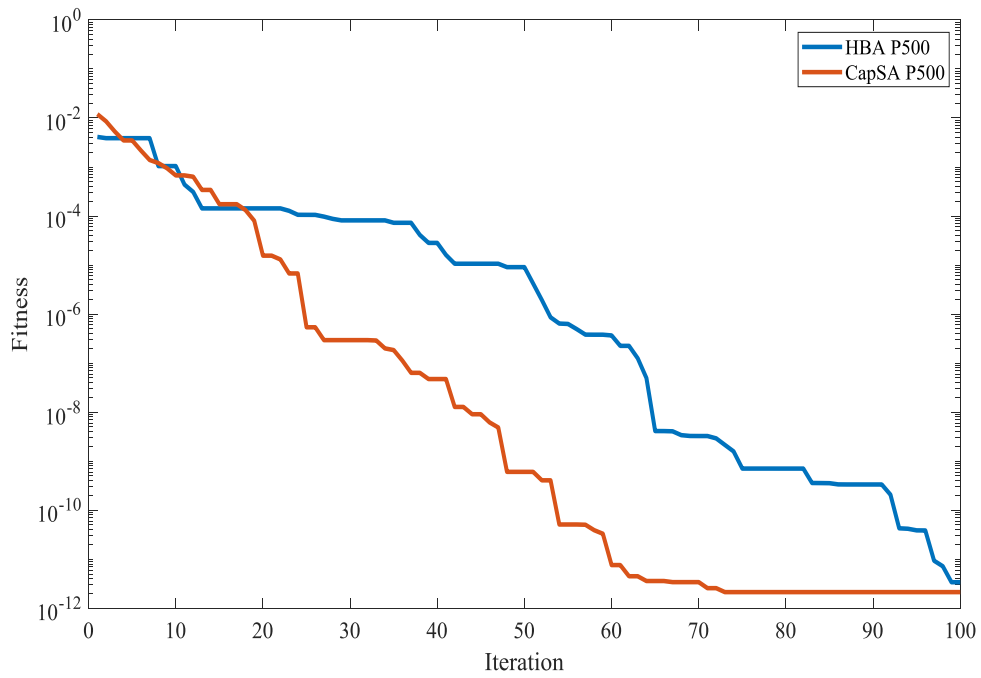


Figure IV-24 : fitness du deuxième scenario d'endommagement PP=500, IT=100

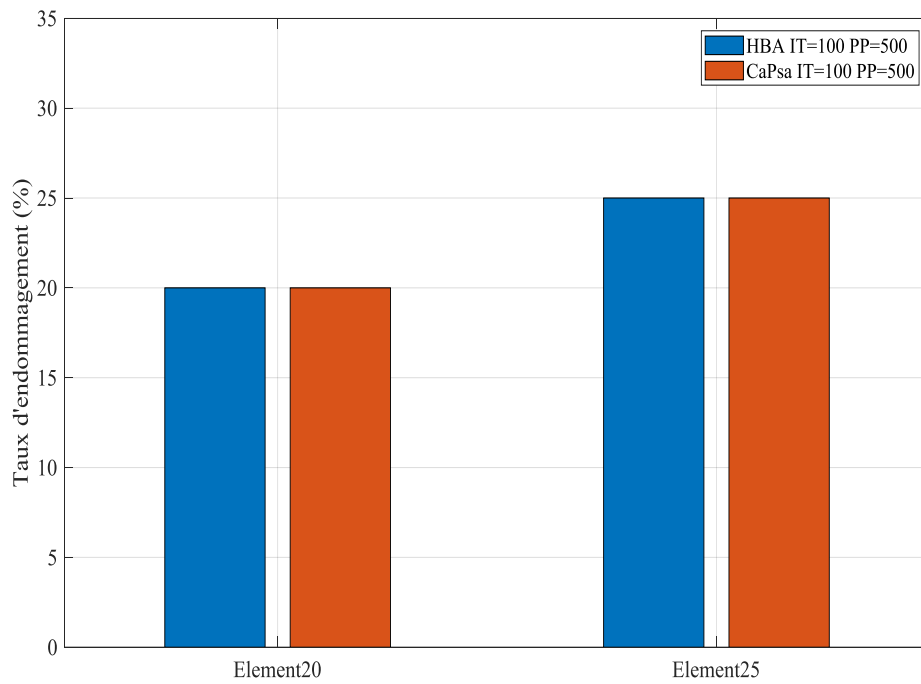


Figure IV-25 : BEST bar du deuxième scenario PP=500, IT=100

Itération fixées à 100					Itération fixées à 500				
Itération	Best HBA		Best CapSA		Itération	Best HBA		Best CapSA	
1	20,5575941%	24,570365%	19,99926786%	25,005980612%	1	21,713073429%	18,299407561%	20,01698390%	25,00224328%
10	19,9719522%	24,972264%	19,99863575%	25,176995055%	50	20,000011779%	25,000001755%	15,44754800%	39,21787850%
20	20,0005930%	25,000702%	17,99113292%	24,026681827%	100	20,000000000%	25,000000000%	20,00068987%	25,00009699%
30	20,0000154%	24,999992%	18,67466130%	24,741221378%	150	20,000000000%	25,000000000%	20,08007152%	24,98816557%
40	20,0000002%	25,000003%	44,06896942%	13,419339290%	200	20,000000000%	25,000000000%	20,00048548%	25,00157383%
50	20,0000000%	25,000000%	20,07758851%	25,000038046%	250	20,000000000%	25,000000000%	26,05014996%	26,20066199%
60	20,0000000%	25,000000%	20,00007577%	25,000000037%	300	20,000000000%	25,000000000%	20,00014211%	25,00020249%
70	20,0000000%	25,000000%	20,00000007%	25,000000000%	350	20,000000000%	25,000000000%	19,99998998%	24,99993824%
80	20,0000000%	25,000000%	20,00000000%	25,000000000%	400	20,000000000%	25,000000000%	20,00000039%	25,00000087%
90	20,0000000%	25,000000%	20,00000000%	25,000000000%	450	20,000000000%	25,000000000%	20,00000637%	25,00000298%
100	20,0000000%	25,000000%	20,00000000%	25,000000000%	500	20,000000000%	25,000000000%	19,99999726%	25,00000646%

Tableau IV-4 : Valeur best pour les méthodes CapSA et HBA pour le deuxième scenario d'endommagement de la structure CCCF , pour des itérations fixées à 100 et 500.

On remarque pour ce deuxième scenario que les vitesses de convergences sont plus élevées en utilisant l'algorithme CapSA, mais pour les taux d'endommagement (Best) la méthode HBA donne des résultats plus précis.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons utilisé deux algorithmes d'optimisation pour quantifier la sévérité des endommagements d'une structure plaques utilisant les algorithmes CapSA et HBA et aussi nous avons effectué une étude comparative entre les deux méthodes et cela grâce aux simulations qui nous ont permis d'évaluer les valeurs de la fonction Best qui représente le taux d'endommagement et Fitness, la vitesse de convergence.

L'interprétation de ces résultats nous a conduit à conclure que l'algorithme HBA est plus fiable et précise que l'algorithme CapSA pour le cas de la première structure (SSSS), pour la deuxième structure (CCCF) la méthode HBA est plus précise et donne des résultats « Best » taux d'endommagement plus fiable, mais pour les valeurs fitness l'algorithme CapSA est meilleur et atteint des vitesses de convergence plus élevées et des valeurs plus basse, D'après les représentations graphique on voit que les vitesses de convergence sont plus rapides, quand les valeurs des itérations sont plus élevées. La validation de notre approche s'est adossée sur l'analyse numérique de structures plaques par la méthode MEF et implémentée dans MATLAB, afin de mettre en exergue sa précision et son efficacité pour la détermination des emplacements des endommagements.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire de fin d'études a pour objectif la détection, la localisation et la quantification des endommagements. Afin de pouvoir mener à bien cette étude vibratoire, nous avons tout d'abord dans le premier chapitre fait des rappels sur la méthode des éléments finis et la dynamique des structures ; On a pu comprendre clairement le principe de discrétisation en éléments finis, et ainsi en ressortir les matrices de raideur essentielles au bon déroulement de notre travail. Par ailleurs, la partie concernant la dynamique des structures, nous avons pu assimiler le principe de l'état vibratoire des structures plaques et donc d'en déduire les matrices de masses et de rigidité

Afin de pouvoir mettre un choix sur la méthode de détection d'endommagements qui est utilisée dans notre travail, nous avons fait une recherche bibliographique sur les méthodes fréquentielles de détection d'endommagements, tout en citant les multiples travaux de la littérature accomplis sur celles-ci, cela étant le principal contenu de notre deuxième chapitre.

Pour pouvoir détecter nos endommagements, on a fait comme choix de méthode, celle basée sur l'énergie de déformation modale, qui est associée aux performances du logiciel MATLAB, nous a permis à chaque fois une détection d'endommagements validée. Pour l'étape de localisation, l'indicateur d'endommagement MSEI a été utilisé, il s'avère d'après les résultats reçus, qu'il est efficace et approprié pour notre étude vibratoire sur les plaques, car il a permis une nette localisation des endommagements. Ceci est le travail accompli dans notre troisième chapitre.

Pour finaliser notre travail, nous avons quantifier nos endommagements en utilisant deux méthodes intitulées ; CapSA et HBA. Ces deux algorithmes d'optimisation ont été affectés au calcul de quantification d'endommagement d'une structure plaque. Après la réception des multiples résultats, à savoir ; best, qui est le taux d'endommagement, et fitness ou erreur qui est la vitesse de convergence, nous pouvons dire que la méthode HBA a donné des résultats satisfaisants, ce qui n'est pas le cas de CapSA, qui non seulement affiche des résultats incohérents dans certaines conditions, mais s'avère pratique dans des conditions adaptées comme constaté dans nos résultats pour la quantification des endommagements dans notre présent travail.

Pour conclure, nous pouvons affirmer que notre travail de programmation, pour la détection et la localisation des endommagements est validé, mais pour la quantification, nous pouvons dire que la méthode HBA reste fiable et appropriée, contrairement à CapSA qui rencontre des difficultés dans notre travail.

Références bibliographiques

Références

1. BRUNET, M., *INTRODUCTION A LA METHODE DES ELEMENTS FINIS EN MECANIQUE DES SOLIDES*. INSA de Lyon, 1981.
2. Batoz J.L, D.G., *Modélisation des structures par éléments finis* Hermès, Paris, 1990. 2.
3. Cazenave, M., *Approche pratique en mécanique des structures* Dunod, Paris,, 2010 , 2013. 2.
4. Khennane, A., *Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB*. 2013.
5. Reddy, J.N., *Mechanics of laminated composite plates*. CRC Press, New York, 1997.
6. Boudierba, B., *Etude de la flexion des plaques épaisses FGM en utilisant une nouvelle théorie à ordre élevé*. 2014. 2.
7. W.-S, H., *Analyse linéaire et non-linéaire de plaques et coques par éléments finis en statique et dynamique sur micro-ordinateur* Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1989.
8. J.F, I., *Analyse des structures par éléments finis* Toulouse, 1991. 3.
9. Reddy, J.N., *An introduction to the finite element method*. McGraw-Hill, New York, 1993.
10. Bathe, K.J., *Finite element procedures in engineering analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1982.
11. Petyt, M., *Introduction to Finite Element Vibration Analysis* University of Southampton, 2010. 2.
12. A.K. Pandey, M.B., *Damage detection in structures using changes in flexibility*. , J. Sound and Vibration 169, 1994: p. 3–17.
13. PETIT, T.T.H.L., *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*. Université de PARIS-EST, 2014: p. 14-20.
14. Rytter, A., *Vibration based inspection of civil engineering structures*. PhD thesis, University of Aalborg, Denmark, 1993.
15. Vandiver, J.K., *Detection of structural failure on fixed platforms by measurement of dynamic response*. Journal of Petroleum Technology, pp, 1977: p. 305–310.
16. Wahab, M.M.A., *Effect of modal curvatures on damage detection using model updating*. Mechanical Systems and Signal Processing, , 2001. 15: p. 439–445.
17. Cawley, P.a.A., R. D, *The location of defects in structures from measurements of natural frequencies*. Journal of Strain Analysis, 1979. 14(2), : p. 49-57.
18. Kessler, S., *Piezoelectric-based in-situ damage detection of composite materials for structural health monitoring systems*. PhD thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, USA. 2002.
19. Nicholson, D.W.a.A., K. A., , *Modal moment index for damage detection in beam structures*. ActaMechanica, , 2000. 144(3-4), : p. 155-167.

Références bibliographiques

20. Humar, J.-B., A.- Xu, H, *Performance of vibration-based techniques for the identification of structural damage. Structural Health Monitoring.* 2006. 5(3): p. 215–241.
21. S.C. Mohan, D.K.M., D. Maity,, "*Structural assessment using FRF employing particle swarm optimisation.* 2014.
22. S.Chakraverty, R.J., V.K. Agrawal, *Effect of non-homogeneity on natural frequencies of vibration of elliptical plates.* Meccanica 42 2007: p. 585–599.
23. F.F.M. Leandro , F.F.M.L., K.J. Joào, *Damage detection under ambient vibration by harmony search algorithm.* Expert Syst.Appl.39, 2012: p. 9704–9714.
24. Pandey, A., Biswas, M., Samman, M *Damage detection from changes in curvature mode shapes.* J. SoundVib.145, 1991: p. 321–332
25. Wu, D., Law, S, *Damage localization in plate structures from uniform load surface curvature.* J. Sound Vib. 276, 2004: p. 227–244
26. Lee, E.-T., Eun, H.-C, *Damage detection of damaged beam by constrained displacement curvature.* J. Mech. Sci. Tech. 22, 2008: p. 1111–1120
27. Whalen, T.M., *The behavior of higher order mode shape derivatives in damaged, beam-like structures.* J. Sound Vib. 309, 2008: p. 426–464
28. Nicknam, A., Hosseini, M, *Structural damage localization and evaluation based on modal data via a new evolutionary algorithm.* Arch. Appl. Mech. 82, 2012: p. 191–203
29. Bai, Y., He, S., Nie, W., Gao, J., Song, X, *Plane grid structure damage location identification by model curvature.* Proc. Eng. 31, 2012: p. 534–540
30. Katunin, A., *Stone impact damage identification in composite plates using modal data and quincunx wavelet analysis.* Arch. Civ. Mech. 15, 2015: p. 251–261
31. Abdel Wahab, M.A., De Roeck, G, *Damage detection in bridges using modal curvatures application to a real damage scenario.* J. Sound Vib. 226, 1999: p. 217–235
32. Yazdanpanah, O., Seyedpoor, S.M., Bengar, H.A, .: *A new damage detection indicator for beams based on mode shape data.*Struct. Eng. Mech. 53, 2015: p. 725–744
33. R.J. Allemang, D.L.B., *Correlation coefficient for modal vector analysis.* Proceedings of 1st International Modal Analysis Conference,, 1983: p. 692–695.
34. Lieven, N., Ewins, D, *Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (COMAC).* Proceedings of the Sixth International Modal Analysis Conference, 1988. 1: p. 690–695
35. Abdel Wahab, M.A., De Roeck, G.:. *Damage detection in bridges using modal curvatures. application to a real damage scenario.* J. Sound Vib. 226,, 1999: p. 217–235.
36. B.H. Kim, N.S., T. Park, *Nondestructive Damage Evaluation of Plates.* Proceedings of the 7th International Conference on Computational Structures Technology”, Lisbon, Portugal, 2004.
37. B.H. Kim, N.S., T. Park, *Flexural Damage Index Equations of a Plate.* Journal of Sound and Vibration, 283, 2005: p. 341–368.

Références bibliographiques

38. C.W, L.J.W.B.Z.Q.C.a.L., *A generalized flexibility matrix approach for structural damage detection.* , Journal of Sound and Vibration, 329 2010: p. 4583-4587.
39. D.R, E.R.a.G., *A local flexibility, method for vibration – based damage localization and quantification.* Journal of sound and vibration, 329 2010: p. 2367-2383.
40. Kazemi S., F.A.a.R.A.R., *“Implementation of the modal flexibility variation to fault identification in thin plates.* ActaAstronautica, 66 2010: p. 414-426.
41. J.M. Ricles, a.J.B.K., *Damage detection in elastic Structures using vibratory residual forces and weighted sensitivity.* , AIAA Journal, 1992. 30: p. 2310-2316.
42. J.C.Chen, J.A.G., *On-orbit damage assessment for large space structures.* AIAA J, 1988. 26: p. 1119–1126.
43. D.C.Zimmerman, *Structural damage detection using aminimum rank update theory.* J.Vib.Acoust 116, 1994: p. 222–231.
44. Doebling, S.W., *rank optimal update of elemen tal stiffnes parameters for structural damage identification.* AIAAJ.34, 1996: p. 2615–2621.
45. F.F.M. Leandro, H.L.R., F.F.M. Leticia, , *Ahybrid approach for damage detection of structure sunder operational conditions.* J.SoundVib.332, 2013: p. 4241–4260.
46. S.Damir, L.Z., V.Damir *Animplementation of structural change detection procedure based on experimental and numerical model correlation.* J.SoundVib.331, 2013: p. 4241–4260.
47. D.Y.Chiang, W.Y.L., *Structural damage detection using the simulated evolution method.* AIAAJ.37, 1999: p. 1331–1333
48. Yang, J.K.L.a.Q.W., *A new structural damage identification method.* J. Sound Vib. 297: p. 694-703.
49. C.Mares, C.S., *Anapplicationofgeneticalgorithmstoidentifydamageinelasticstructures.* J.SoundVib.195, 1996: p. 195–215.
50. Park, G.S., H.; Farrar, C.R, Inman, D.J *Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward.* Shock Vib. Dig, 2003. 35: p. 451–463.
51. Sun, F.P.C., Z.; Liang, C.; Rogers, C.A, *Truss structure integrity identification using PZT. sensor-actuator.* J. Intell. Mater. Syst. Struct. 6: p. 134–139.
52. Raju, V., *Impedance-Based Health Monitoring Technique of Composite Reinforced Structure.* In Proceedings of the 9th International Conference on Adaptive Structures and Technologies, Cambridge, MA, USA, 1998: p. 448–457.
53. Tseng, K.K.H.N., A.S. K *Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material.* Smart Mater. Struct, 2002. 11.
54. Xu, J., *Parameter Identification and Damage Detection Using Evolution ary Programming.* Doctora In Dissertation, Nanyang Technological University, Singapore, 2005.
55. Wang, X.T., J, *Damage identification using piezoelectric impedance approach and spectral element method.* J. Intell. Mater. Syst. Struct, 2009. 20: p. 907–921.
56. Sepehry, N.B.-N., F.; Shamshirsaz, M, *Discrete singular convolution and spectral finite element method for predicting electromechanical impedance applied on rectangular plates.* J. Intell. Mater. Syst. Struct, 2017. 28: p. 2473–2488.

Références bibliographiques

57. Cao, P.Q., S.; Tang, J, *Structural damage identification using piezoelectric impedance measurement with sparse inverse analysis*. Smart Mater. Struct, 2018. 27.
58. Fan, X.L., J.; Hao, H, *Impedance resonant frequency sensitivity based structural damage identification with sparse regularization: Experimental studies*. Smart Mater. Struct. , 2018. 28.
59. W. Fan and P. Qiao, *Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study*. Structural Health Monitoring, 2011. vol. 10, no. 1,: p. 83–111.
60. Kim, N.S.a.J.T., *Field verification of a nondestructive damage localization and sensitivity estimator algorithm*. Nashville, TN, USA, 1995: p. 210–218,.
61. N. Stubbs and J. T. Kim, *Damage localization in structures without baseline modal parameters*. AIAA Journal, 1996. vol. 34, no. 8,: p. 1649–1654.
62. P. Cornwell, S.W.D., and C. R. Farrar,, *Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures,*. Journal of Sound and Vibration,, 1999. vol. 224, no. 2: p. 359–374.
63. J.-T. Kim, Y.-S.R., H.-M. Cho, and N. Stubbs,, *Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method*. Engineering Structures,, 2003. vol. 25, no. 1,: p. 57–67,.
64. J.-T. Kim, J.-H.P., D.-S. Hong, and W.-S. Park,, *Hybrid health monitoring of prestressed concrete girder bridges by sequential vibration-impedance approaches*. Engineering Structures, 2010. vol. 32, no. 1,: p. 115–128,.
65. H.-W. Hu and C.-B. Wu, “*Nondestructive damage detection of two dimensional plate structures using modal strain energy method*. Journal of Mechanics, 2008. vol. 24, no. 4,: p. 319–332.
66. A. Dixit and S. Hanagud, *Single beam analysis of damaged beams verified using a strain energy based damage measure*. International Journal of Solids and Structures, 2011. vol. 48, no. 3-4: p. 592–602.
67. S. M. Seyedpoor, *A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization*. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2012. vol. 47, no. 1,: p. 1–8.
68. Buyukozturk, Y.-J.C.a.O., “*Structural damage detection using modal strain energy and hybrid multiobjective optimization*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,, 2015. vol. 30, no. 5,: p. 347–358.
69. D. T. Vo, H.V.H., T. H. Dang, and T. T. Nguyen,, *A two-step approach for damage detection in laminated composite structures using modal strain energy method and an improved differential evolution algorithm*. Composite Structures, 2016. vol. 147,: p. 347–358.
70. Zolghadr, A.K.a.A., *Cyclical parthenogenesis algorithm for guided modal strain energy based structural damage detection*. Applied Soft Computing,, 2017. 57: p. 250–264.
71. C. D. Dinh, D.T.V., H. V. Ho, and T. T. Nguyen,, “*Damage assessment in plate-like structures using a two-stage method based on modal strain energy change and Jaya*

Références bibliographiques

- algorithm*. Inverse Problems in Science and Engineering, 2018. vol. 27, no. 2,: p. 166–189.
72. K. Samir, A.W.M., D. Boutchicha, and K. Tawfiq, “*Structural health monitoring using modal strain energy damage indicator coupled with teaching-learning-based optimization algorithm and isogeometric analysis*. Journal of Sound and Vibration, 2019. 448: p. 230–246,.
73. S. Wang, Y.J., M. Xu, Y. Li, and Z. Li, *Structural damage identification using an iterative two-stage method combining a modal energy based index with the BAS algorithm*. Steel and Composite Structures, 2020. vol. 36, no. 1,: p. 1–45.
74. Kourehli, S.S., *Damage identification of structures using second order approximation of Neumann series expansion*. Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, 2020. vol. 27, no. 2,: p. 81–91.
75. P. Ghannadi, S.S.K., M. Noori, and W. A. Altabey,, *Efficiency of grey wolf optimization algorithm for damage detection of skeletal structures via expanded mode shapes*. Advances in Structural Engineering, 2020. vol. 23, no. 13,: p. 2850–2865.
76. Ferreira, A.J.M., *MATLAB Codes for Finite Element Analysis* Universidade do Porto Portugal, 2009. 157.
77. Chen MK, L.V., Santos LR, *How basic are behavioral biases? Evidence from capuchin monkey trading behavior*. J Polit Econ, 2006. 114: p. 517–537.
78. Alfaro JW, S.J., Rylands AB, *How different are robust and gracile capuchin monkeys? An argument for the use of sapajus and cebus*. Am J Primatol, 2012. 74: p. 273–286.
79. Ottoni EB, I.P., *Capuchin monkey tool use: overview and implications*. Evolut Anthropol Issues News Rev Issues News Rev, 2008. 17: p. 171–178.
80. Karaboga D, B.B., *A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm*. J Global Optim, 2007. 39: p. 459–471.
81. Gandomi AH, A.A., *Krill herd: a new bio-inspired optimization algorithm*. Commun Nonlinear Sci Numer Simul, 2012. 17: p. 4831–4845.
82. W-T, P., *A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example*. Knowl Based Syst, 2012. 26: p. 69–74.
83. Saremi S, M.S., Mirjalili SM, *Evolutionary population dynamics and grey wolf optimizer*. Neural Comput Appl, 2015. 26: p. 1257–1263.
84. E.H. Houssein, B.E.-d.H., H. Rezk, A.M. Nassef, *An enhanced archimedes optimization algorithm based on local escaping operator and orthogonal learning for PEM fuel cell parameter identification*. Eng. Appl. Artif. Intell, 2021. 103.
85. E.H. Houssein, M.A.M., A. Fathy, H. Rezk,, *modified marine predator algorithm based on opposition based learning for tracking the global MPP of shaded PV system*. Expert Syst. Appl., 2021. 183.
86. C. James, *Introduction to Stochastics Search and Optimization*, John Wiley and Sons,. Hoboken, NJ,, 2003.
87. J.A. Parejo, A.R.-C., S. Lozano, P. Fernandez, *Metaheuristic optimization frameworks: a survey and benchmarking*. Soft Comput, 2012. 16: p. 527–561.

Références bibliographiques

88. M.H. Hassan, E.H.H., M.A. Mahdy, S. Kamel,, *An improved manta ray foraging optimizer for cost-effective emission dispatch problems*. Eng. Appl. Artif. Intell, 2021. 100.
89. M.M. Ahmed, E.H.H., A.E. Hassanien, A. Taha, E. Hassanien,, *Maximizing lifetime of large-scale wireless sensor networks using multi-objective whale optimization algorithm*. Telecommun. Syst, 2019. 72: p. 243–259.
90. E.H. Houssein, B.E.-d.H., D. Oliva, A.A. Elngar, H. Shaban,, *A novel black widow optimization algorithm for multilevel thresholding image segmentation*. Expert Syst. Appl., 2021. 167.
91. K. Hussain, N.N., W. Zhu, E.H. Houssein,, *An efficient hybrid sine-cosine harris hawks optimization for low and high-dimensional feature selection*. Expert Syst. Appl., 2021. 176.
92. N. Neggaz, E.H.H., K. Hussain,, *An efficient henry gas solubility optimization for feature selection*. Expert Syst. Appl., 2020. 152.
93. A.E. Hassanien, M.K., E.H. Houssein, H. AlQaheri,, *Intelligent human emotion recognition based on elephant herding optimization tuned support vector regression*. Biomed. Signal Process. Control, 2018. 45: p. 182–191.
94. F.A. Hashim, E.H.H., K. Hussain, M.S. Mabrouk, W. Al-Atabany,, *A modified henry gas solubility optimization for solving motif discovery problem*. Neural Comput. Appl, 2019. 32: p. 10759–10771.
95. M. Kazemzadeh-Parsi, *A modified firefly algorithm for engineering design optimization problems*. Iran. J. Sci. Technol. Trans. Mech. Eng. Appl. Artif. Intell, 2014. 38 (M2): p. 403.
96. M. Yazdani, F.J., *Lion optimization algorithm (LOA): a nature-inspired metaheuristic algorithm*. J. Comput. Des. Eng, 2016. 3: p. 24–36.
97. E.H. Houssein, M.R.S., F.A. Hashim, H. Shaban, M. Hassaballah, *Lévy Flight distribution: A new metaheuristic algorithm for solving engineering optimization problems*. Eng. Appl. Artif. Intell, 2020. 94.
98. A. Kaveh, A.D., *A novel meta-heuristic optimization algorithm: thermal exchange optimization*. Adv. Eng. Softw, 2017. 110: p. 69–84.
99. E. Bonabeau, D.d.R.D.F.M., M. Dorigo, G. Théraulaz, G. Theraulaz, et al., *Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, 1999. 1.
100. E. Russell, J.K., *A new optimizer using particle swarm theory, in: Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*. IEEE, 1995: p. 39–43.
101. F.A. Hashim, K.H., E.H. Houssein, M.S. Mabrouk, W. Al-Atabany,, *Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm for solving optimization problems*. Appl. Intell, 2020. 51: p. 1531–1551.
102. K. Hussain, M.N.M.S., S. Cheng, Y. Shi,, *Metaheuristic research: a comprehensive survey*. Artif. Intell. Rev, 2018. 52: p. 2191–2233.
103. H.M. Kanoosh, E.H.H., M.M. Selim,, *Salp swarm algorithm for node localization in wireless sensor networks*. J. Comput. Netw. Commun., 2019.
104. I. BoussaïD, J.L., P. Siarry,, *A survey on optimization metaheuristics*. Inform. Sci., 2013. 237: p. 82–117.

Références bibliographiques

105. S. Saremi, S.M., A. Lewis,, *Grasshopper optimisation algorithm: theory and application.*, Adv. Eng. Softw., 2017. 105: p. 30–47.
106. S. Mirjalili, A.L., *The whale optimization algorithm.* Adv. Eng. Softw., 2016. 95: p. 51–67.
107. E.H. Houssein, M.A.M., M.J. Blondin, D. Shebl, W.M. Mohamed, *Hybrid slime mould algorithm with adaptive guided differential evolution algorithm for combinatorial and global optimization problems.*, Expert Syst. Appl., 2021. 174.
108. G.-G. Wang, S.D., X.-Z. Gao, L.D.S. Coelho,, *A new metaheuristic optimisation algorithm motivated by elephant herding behaviour.* Int. J. Bio-Inspired Comput., 2016. 8: p. 394–409.
109. A. Heidari, M.S., F. Hossam, A. Ibrahim, M. Majdi, C. Huiling,, *Harris hawks optimization: Algorithm and applications.* Future Gener. Comput. Syst., 2019. 97: p. 849–872.
110. S. Mirjalili, *Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm.*, Knowl.-Based Syst., 2015. 89: p. 228–249.
111. J.S. Gong Dunwei, X.J., *Evolutionary algorithms with preference polyhedron for interval multi-objective optimization problems.* Inform. Sci., 2013. 233: p. 141–161.
112. J.H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence.* MIT Press, Cambridge, Mass, USA, 1975.
113. Rechenberg, I., *Evolutions strategien.* Springer Berlin Heidelberg, 1978: p. 83–114.
114. N. Hansen, A.O., *Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies.* Evol. Comput., 2001. 9: p. 159–195.
115. R. Tanabe, A.S.F., R. Tanabe, A.S. Fukunaga, *Improving the search performance of SHADE using linear population size reduction.* IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 2014: p. 1658–1665.
116. S. Kirkpatrick, C.D.G., M.P. Vecchi,, *Optimization by simulated annealing.* Science, 1983. 220: p. 671–680.
117. A. Kaveh, A.D., *A novel meta-heuristic optimization algorithm: thermal exchange optimization.*, Adv. Eng. Softw, 2017. 110: p. 69–84.
118. F.A. Hashim, E.H.H., M.S. Mabrouk, W. Al-Atabany, S. Mirjalili,, *Henry gas solubility optimization: A novel physics-based algorithm.* Future Gener. Comput. Syst., 2019. 101: p. 646–667.
119. F. Hashim, M.S.M., W. Al-Atabany,, *Gwomf: Grey wolf optimization for motif finding, in: 2017 13th International Computer Engineering Conference (ICENCO).* IEEE, 2017: p. 141–146.
120. D.H. Wolpert, W.G.M., *No free lunch theorems for optimization.* IEEE Trans. Evol. Comput, 1997. 1: p. 67–82.
121. C. Begg, K.B., J. Du Toit, M. Mills,, *Scent-marking behaviour of the honey badger, mellivora capensis (mustelidae).* in the southern kalahari, Anim. Behav., 2003. 66: p. 917–929.
122. C. Begg, K.B., J. Du Toit, M. Mills,, *Life-history variables of an atypical mustelid, the honey badger mellivora capensis.* J. Zool, 2005. 265: p. 17–22.
123. Keith, C.B., *The Honey Badger.*, 0000.

Références bibliographiques

124. D. Kapner, T.C., E. Adelberger, J. Gundlach, B.R. Heckel, C. Hoyle, H. Swanson,, *Tests of the gravitational inverse-square law below the dark-energy length scale.* Phys. Rev. Lett., 2007. 98.
125. A.V. Akopyan, *Geometry of the cardioid.* Amer. Math. Monthly, 2015. 122: p. 144–150.
126. M. Črepinšek, S.-H.L., M. Mernik,, *Exploration and exploitation in evolutionary algorithms: A survey,* ACM Comput. Surv, 2013. 45: p. 1–33.
127. S. Cheng, Y.S., Q. Qin, Q. Zhang, R. Bai,, *Population diversity maintenance in brain storm optimization algorithm.* J. Artif. Intell. Soft Comput. Res., 2014. 4: p. 83–97.
128. K. Hussain, M.N.M.S., S. Cheng, Y. Shi,, *On the exploration and exploitation in popular swarm-based metaheuristic algorithms.* Neural Comput. Appl., 2018. 31: p. 7665–7683.