

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

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER en Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique



Thème :

**Contribution à la détection, à la localisation et à la quantifications
d'endommagements des structures treillis 2D et 3D par les méthodes
d'analyse dynamique et les algorithmes d'optimisations.**

Proposé et encadré par :

M.TIACHACHT SAMIR

Réalisé par :

AKRED Ali

BOUAZIZ Amazigh

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

*Mes remerciements s'adressent tout d'abord à notre encadreur de thèse, **Mr TIACHACHT SAMIR**, Tout au long de ce travail, il a su m'apporter un soutien constant, une disponibilité, une écoute, une confiance et des conseils précieux et avisés à la hauteur de ses compétences et de ses réelles qualités humaines. Sans lui, ce travail n'aurait probablement pas vu le jour. Son regard opérationnel critique a guidé ce travail jusqu'au bout. Je l'en remercie tout particulièrement.*

Nos plus vifs remerciements vont aussi à tous les membres de jury pour avoir accepté d'honorer par leur jugement notre travail.

Nous remercions sincère pour l'ensemble des Enseignants qui ont contribué à notre formation, et nous remercions ainsi, l'ensemble d'étudiants du département de Génie Mécanique de l'U.M.M.T.O, pour leurs soutiens .

Dédicace

Au meilleur des pères

A ma très chère mère

Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté

A qui je dois tout

A mes frères et sœurs

A qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite

A mes Amis et proches

A tous ceux qui me sont chers

Table des matières

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE :	1
I RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES	3
I.1 INTRODUCTION	3
I.2 GENERALITES SUR L'ETUDE DES STRUCTURES EN MECANIQUE.	3
I.2.1 L'endommagement des structures	4
I.2.2 La détection des endommagements	4
I.2.3 Méthodes et modalités de détection des endommagements	5
I.3 METHODE DE DETECTION DES ENDOMMAGEMENTS BASEES SUR LES DEPLACEMENTS :	6
I.3.1 Méthode basée sur les déplacements statiques[18] :	9
I.4 METHODES BASEES SUR LES FREQUENCES :	10
I.4.1 La fréquence :	10
I.4.2 Relation entre la fréquences et l'incrémentation de l'énergie :	11
I.4.3 Variations des fréquences propre Δf	11
I.4.4 Méthode basée sur le temps des fréquences	13
II METHODES DES ELEMENTS FINIS ET LA DYNAMIQUE DES STRUCTURES :	15
II.1 METHODES DES ELEMENTS FINIS :	15
II.1.1 Introduction	15
II.1.2 Généralité sur les méthodes des éléments finis	15
II.1.3 Démarches de la méthode des éléments finis	16
II.1.3.1 Discrétisation géométrique	16
II.1.3.2 Approximation nodale	17
II.1.4 Relation entre déformation et déplacement :	18
II.1.5 Relation entre contraintes et déformations	19
II.1.6 L'énergie de déformation :	19
II.1.7 Les matrices de rigidité élémentaire	19
1. Matrice de rigidité pour une barre 1D	19
2. Matrice de rigidité pour une barre a 2D	21
3. Matrice de rigidité pour une barre a 3D	22
4. Matrice de rigidité pour une poutre 2D	24
5. Matrice de rigidité pour un portique 3D	26
- Déplacements axiaux :	27
- Déplacements de torsion	27
- Déplacement de flexion sur le plan xy :	28
- Déplacement de flexion sur le plan xz :	28
- Assemblage pour l'obtention de la matrice de raideur globale :	28
II.2 DYNAMIQUE DES STRUCTURES :	29
II.2.1 Introduction :	29
II.2.2 Définition :	29
II.2.3 Rappel sur la dynamique des structure	30
II.2.3.2 Système a un degré de liberté :	30
II.2.3.3 Mise en équation du système :	30
II.2.3.4 Principe fondamental de la dynamique :	30
II.2.3.5 Méthode énergétique :	31
II.2.3.6 Etude des systèmes à un degré de liberté :	32
1. Système libre non amorti (conservatif) :	33
2. Système libre amorti :	33
(a) Cas sous-amorti (sous-critique) :	33
(b) Cas sur-amorti (sur-critique) :	33

Table des matières

(c) Cas critique	34
3. Système forcé amorti :	34
II.2.3.7 Etude des systèmes a plusieurs degrés de liberté.....	36
1. Analyse de vibrations libres :	36
2. Réponse transitoire du système libre non amorti :	36
3. Réponse forcée d'un système libre non amorti dans le cas d'une excitation harmonique :	37
II.2.3.8 Matrices de masse, raideur et amortissement	38
1. Matrice masse dans le système de coordonnées global :	38
2. Matrice de raideur et d'amortissement :	39
3. Matrice de masse pour une barre 1D.....	40
4. Matrice de masse pour une barre a 2D.....	40
5. Matrice de masse pour une barre a 3D.....	41
6. Matrice de masse pour une poutre 2D.....	41
7. Matrice de masse pour un portique 3D :	42
II.3 CONCLUSION :	43
III METHODE ROBUSTE SUR L'INDEX DE FLEXIBILITE POUR L'IDENTIFICATION ET LA QUANTIFICATION DES ENDOMMAGEMENTS.....	44
III.1 INTRODUCTION :	44
III.2 INDICATEUR DES ENDOMMAGEMENTS AMELIORE :	44
III.3 LA QUANTIFICATION DE L'ENDOMMAGEMENT :	46
III.4 APPLICATION :	47
III.4.1 Structure 2D avec 31 éléments :	47
III.4.1.1 La localisation des endommagements par la méthode de l'index de flexibilité :	49
(a) Premier scénario :	49
(b) Deuxième scénario :	50
(c) Troisième scénario :	51
III.4.2 Structure 3D avec 28 éléments :	52
III.4.2.2 La localisation des endommagements par la méthode de l'index de flexibilité :	54
(a) Premier scénario :	54
(b) Deuxième scénario :	55
(c) Troisième scénario :	56
III.5 CONCLUSION :	57
IV METHODES D'OPTIMISATIONS	58
VI.1 INTRODUCTION	58
VI.2 L'ALGORITHME DE RECHERCHE DE REPTILES (THE REPTILE SEARCH ALGORITHM RSA)....	58
VI.2.1 Phase d'initialisation :	59
VI.2.2 Phase d'encerclement (exploration) :	59
VI.2.3 Phase de chasse (exploitation) :	61
VI.2.4 Pseudocode de l'algorithme de recherche de reptiles (RSA) :	62
VI.2.5 Complexité temporelle du RSA :	63
VI.3 OPTIMISATION DES ESSAIMS DE THONS (TUNA SWARM OPTIMIZATION TSO)	64
VI.3.1 Inspiration du Tuan Swarm Optimization (TSO):	64
VI.3.2 Modèle mathématique recherche en spirale :	65
VI.3.3 Recherche de nourriture parabolique[72] :	66
VI.3.4 Les problèmes d'ingénierie avec TSO :	68
VI.4 CONCLUSION :	69
V RESULTATS ET DISCUSSION :	70
V.1 STRUCTURE 31 ELEMENTS 2D	71
V.1.1 Premier scénario :	71
V.1.2 Deuxième scénario d'endommagement	81

Table des matières

V.1.3	Troisième scénario	89
V.2	STRUCTURE 28 ELEMENTS 3D	98
V.2.1	Premier scénario	98
V.2.2	Deuxième scénario	106
VI.3	TEMPS DE CALCULE POUR LES METHODES D'OPTIMISATIONS :	114
VI.3.1	Temps de calcule itérations fixées populations variées pour structure 31 éléments 2D :	114
VI.3.2	Temps de calcule populations fixées et itérations variées pour la structure 31 éléments 2D....	115
VI.3.3	Temps de calcule itérations fixées populations variées pour structure 28 éléments 3D	116
VI.3.4	Temps de calcule itérations fixées populations variées pour structure 28 éléments 3D	116
VI.4	CONCLUSION :	117
CONCLUSION GENERALE :		118
REFERENCES :		119
VI ANNEXES.....		123
RESUME.....		159
ABSTRACT		159

Liste des figures :

<u>Chapitre 1 :</u>	<u>Recherche bibliographiques</u>
FIGURE I-1:LA DEMARCHE DE LA DETECTION DES ENDOMMAGEMENTS[5].....	5
<u>Chapitre 2 :</u>	<u>Méthodes des éléments finis et dynamiques des structures</u>
FIGURE II-1:DISCRETISATION GEOMETRIQUE.	16
FIGURE II-2:ELEMENT DE REFERENCE BARRE A DEUX DDL.....	17
FIGURE II-3: FONCTIONS DE FORME A UNE DIMENSION	18
FIGURE II-4:: APPROXIMATION NODALE D'UNE BARRE DE DEUX DDL.	20
FIGURE II-5:ELEMENT DE REFERENCE BARRE 2D DANS LE SYSTEME DES COORDONNEES GLOBALES.	21
FIGURE II-6:ELEMENT DE REFERENCE BARRE 2D DANS LE SYSTEME DES COORDONNEES GLOBALES.	22
FIGURE II-7:DEFORMATION D'UN ELEMENT POUTRE SUR LE PLAN XY	24
FIGURE II-8::ELEMENT DE REFERENCE POUTRE DANS LE PLAN (XY) ET GLOBAL (XY).	25
FIGURE II-9:DEPLACEMENTS AXIAUX.....	27
FIGURE II-10:DEPLACEMENTS DE TORSION.	27
FIGURE II-11:REPOSE TYPIQUE D'UN SYSTEME A UN DEGRE DE LIBERTE LIBRE AMORTI A): SYSTEME SOUS AMORTI ; B) : SYSTEME SUR-AMORTI ; C) : SYSTEME CRITIQUE.	34
FIGURE II-12:SYSTEME OSCILLATEUR ELEMENTAIRE DISSIPATIF : MASSE - AMORTISSEUR – RESSORT.....	35
FIGURE II-13:ELEMENT POUTRE BIDIMENSIONNELLE.	42
<u>Chapitre 3 :</u>	<u>Méthode robuste sur l'index de flexibilité</u>
FIGURE III-1: STRUCTURE TREILLIS 2D A (31) ELEMENTS.....	47
FIGURE III-2:PREMIER SCENARIO D'ENDOMMAGEMENT POUR LA STRUCTURE 31 ELEMENTS 2D.....	49
FIGURE III-3: IDENTIFICATION D'ENDOMMAGEMENTS DU TREILLIS 2D A 31 ELEMENTS(PREMIER SCENARIO D'ENDOMMAGEMENT).....	49
FIGURE III-4: DEUXIEME SCENARIO D'ENDOMMAGEMENT POUR LA STRUCTURE 31 ELEMENTS 2D	50
FIGURE III-5: IDENTIFICATION D'ENDOMMAGEMENTS DU TREILLIS 2D A 31 ELEMENTS(DEUXIEME SCENARIO D'ENDOMMAGEMENT).....	50
FIGURE III-6: TROISIEME SCENARIO D'ENDOMMAGEMENT POUR LA STRUCTURE 31 ELEMENTS 2D. ...	51
FIGURE III-7:: IDENTIFICATION D'ENDOMMAGEMENTS DU TREILLIS 2D A 31 ELEMENTS(TROISIEME SCENARIO D'ENDOMMAGEMENT).....	51
FIGURE III-8: STRUCTURE TREILLIS 3D A (28) ELEMENTS[52].....	52
FIGURE III-9:PREMIER SCENARIO D'ENDOMMAGEMENT POUR LA STRUCTURE 28 ELEMENTS 3D.....	54
FIGURE III-10:IDENTIFICATION D'ENDOMMAGEMENTS DU TREILLIS 3D A 28 ELEMENTS(PREMIER SCENARIO D'ENDOMMAGEMENT).....	54
FIGURE III-11:DEUXIEME SCENARIO D'ENDOMMAGEMENT POUR LA STRUCTURE 28 ELEMENTS 3D. .	55
FIGURE III-12 : IDENTIFICATION D'ENDOMMAGEMENTS DU TREILLIS 3D A 28 ELEMENTS(DEUXIEME SCENARIO D'ENDOMMAGEMENT).....	55
FIGURE III-13:TROISIEME SCENARIO D'ENDOMMAGEMENT POUR LA STRUCTURE 28 ELEMENTS 3D. .	56
FIGURE III-14:IDENTIFICATION D'ENDOMMAGEMENTS DU TREILLIS 3D A 28 ELEMENTS(TROISIEME SCENARIO D'ENDOMMAGEMENT).....	56
<u>Chapitre 4 :</u>	<u>Méthodes d'optimisations</u>
FIGURE IV-1: L'ATTAQUE DE LA PROIE $t > T4$	60
FIGURE IV-2: ENCELER LA PROIE, QUAND $t \leq T4$	60
FIGURE IV-3:PSEUDOCODE DU REPTILE SEARCH ALGORITHM (RSA)[65].....	63
FIGURE IV-4:LE PSEUDOCODE OF TSO[72].	67
FIGURE IV-5: ORGANIGRAMME DE LA METHODE TSO[72].	68

Chapitre 5 :

Résultats et discussion

FIGURE V-1:STRUCTURE 2D 31 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 500 ITERATIONS.	71
FIGURE V-2:STRUCTURE 2D 31 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 1000 ITERATIONS.	71
FIGURE V-3:STRUCTURE 2D 31 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 2000 ITERATIONS.	72
FIGURE V-4: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 200 POPULATIONS ET 800 ITERATIONS.....	72
FIGURE V-5: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 200 POPULATIONS ET 800 ITERATIONS.....	73
FIGURE V-6: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 200 POPULATIONS ET 1600 ITERATIONS.....	73
FIGURE V-7: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 400 POPULATIONS ET 400 ITERATIONS.....	74
FIGURE V-8: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 400 POPULATIONS ET 800 ITERATIONS.....	74
FIGURE V-9: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 400 POPULATIONS ET 1600 ITERATIONS.....	75
FIGURE V-10: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 900 POPULATIONS ET 400 ITERATIONS.....	75
FIGURE V-11: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 900 POPULATIONS ET 800 ITERATIONS.....	76
FIGURE V-12: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 900 POPULATIONS ET 1600 ITERATIONS.....	76
FIGURE V-13: TAUX D'ENDOMMAGEMENT DE L'ELEMENT 16 POUR LES ITERATION FIXEES 500.....	77
FIGURE V-14: TAUX D'ENDOMMAGEMENT DE L'ELEMENT 16 POUR LES ITERATION FIXEES 1000.....	77
FIGURE V-15: TAUX D'ENDOMMAGEMENT DE L'ELEMENT 16 POUR LES ITERATION FIXEES A 2000 ...	78
FIGURE V-16: TAUX D'ENDOMMAGEMENT DE L'ELEMENT 16 POUR LES POPULATION FIXEES A 200....	78
FIGURE V-17: TAUX D'ENDOMMAGEMENT DE L'ELEMENT 16 POUR LES POPULATION FIXEES A 400....	79
FIGURE V-18: TAUX D'ENDOMMAGEMENT DE L'ELEMENT 16 POUR LES POPULATION FIXEES A 900....	79
FIGURE V-19: TAUX D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DES ITERATIONS POUR DES POPULATION DE 100 500 ET 1000 POUR L'ELEMENT 16.	80
FIGURE V-20: TAUX D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DES ITERATIONS POUR L'ELEMENT 16.....	80
FIGURE V-21: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 500 ITERATIONS.	81
FIGURE V-22: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 1000 ITERATIONS.	82
FIGURE V-23: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 2000 ITERATIONS.	82
FIGURE V-24: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 200 POPULATIONS ET 400 ITERATIONS.....	83
FIGURE V-25: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 200 POPULATIONS ET 800 ITERATIONS.....	83
FIGURE V-26: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 200 POPULATIONS ET 1600 ITERATIONS.....	84
FIGURE V-27: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 400 POPULATIONS ET 400 ITERATIONS.....	84
FIGURE V-28: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 400 POPULATIONS ET 800 ITERATIONS.....	85

Liste des Figures

FIGURE V-29: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 400 POPULATIONS ET 1600 ITERATIONS.....	85
FIGURE V-30: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 900 POPULATIONS ET 400 ITERATIONS.....	86
FIGURE V-31: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 900 POPULATIONS ET 800 ITERATIONS.....	86
FIGURE V-32: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 900 POPULATIONS ET 1600 ITERATIONS.....	87
FIGURE V-33: : TAUX D'ENDOMMAGEMENT POUR LES L'ELEMENTS 10 ET 22 POUR LES POPULATION FIXEES A 500	87
FIGURE V-34: TAUX D'ENDOMMAGEMENT POUR LES ELEMENTS 10 ET 22 POUR LES POPULATIONS FIXEES A 1000	87
FIGURE V-35: TAUX D'ENDOMMAGEMENT POUR LES ELEMENTS 10 ET 22 POUR LES POPULATION FIXEES A 2000.	88
FIGURE V-36: TAUX D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DES ITERATIONS FIXEES A 500 ET POPULATION VARIEES DE 100 A 1000 POUR LES ELEMENTS 10 ET 22.	88
FIGURE V-37: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT TROISIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 500 ITERATIONS	89
FIGURE V-38: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT TROISIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 1000 ITERATIONS	90
FIGURE V-39: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT TROISIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 2000 ITERATIONS	90
FIGURE V-40: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 200 POPULATIONS ET 400 ITERATIONS.....	91
FIGURE V-41: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 200 POPULATIONS ET 800 ITERATIONS.....	91
FIGURE V-42: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 200 POPULATIONS ET 1600 ITERATIONS.....	92
FIGURE V-43: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 400 POPULATIONS ET 400 ITERATIONS.....	92
FIGURE V-44: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 400 POPULATIONS ET 800 ITERATIONS.....	93
FIGURE V-45: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 400 POPULATIONS ET 1600 ITERATIONS.....	93
FIGURE V-46: STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 900 POPULATIONS ET 400 ITERATIONS.....	94
FIGURE V-47: : STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 900 POPULATIONS ET 800 ITERATIONS.....	94
FIGURE V-48:STRUCTURE 2D 31 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 900 POPULATIONS ET 1600 ITERATIONS.....	95
FIGURE V-49: TAUX D'ENDOMMAGEMENT POUR LES ELEMENTS 15 , 20 ET 25 POUR LES POPULATION FIXEES A 200 ET ITERATIONS VARIEES.....	95
FIGURE V-50:TAUX D'ENDOMMAGEMENT POUR LES ELEMENTS 15 , 20 ET 25 POUR LES POPULATION FIXEES A 400 ITERATIONS VARIEES.....	95
FIGURE V-51: TAUX D'ENDOMMAGEMENT POUR LES ELEMENTS 15 , 20 ET 25 POUR LES POPULATION FIXEES A 900 ITERATIONS VARIEES.....	96
FIGURE V-52: TAUX D'ENDOMMAGEMENT POUR LES ELEMENTS 15, 20 ET 25 POUR DES POPULATION VARIEES ITERATIONS FIXEES.....	96
FIGURE V-53: STRUCTURE 3D 28 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 500 ITERATIONS.	98

Liste des Figures

FIGURE V-54: STRUCTURE 3D 28 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 1500 ITERATIONS.	98
FIGURE V-55: STRUCTURE 3D 28 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DES POPULATIONS FIXEES A 200 ET ITERATIONS A 400 .	99
FIGURE V-56: STRUCTURE 3D 28 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DES POPULATIONS FIXEES A 200 ET ITERATIONS A 1600.	99
FIGURE V-57: STRUCTURE 3D 28 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DES POPULATIONS FIXEES A 900 ET ITERATIONS A 400 .	100
FIGURE V-58: STRUCTURE 3D 28 ELEMENT PREMIERS SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DES POPULATIONS FIXEES A 900 ET ITERATIONS A 1600 .	100
FIGURE V-59: TAUX D'ENDOMMAGEMENT DE L'ELEMENT 13 POUR LES ITERATION FIXEES 500.....	101
FIGURE V-60: TAUX D'ENDOMMAGEMENT DE L'ELEMENT 13 POUR LES ITERATION FIXEES 1500.....	101
FIGURE V-61: TAUX D'ENDOMMAGEMENT DE L'ELEMENT 13 POUR DES POPULATIONS FIXEES 200...	102
FIGURE V-62: TAUX D'ENDOMMAGEMENT DE L'ELEMENT 13 POUR DES POPULATIONS FIXEES 900...	102
FIGURE V-63: TAUX D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DES ITERATIONS FIXEES A 500 ET POPULATION VARIEES DE 100 A 1000 POUR L'ELEMENTS 13.	103
FIGURE V-64: TAUX D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DES ITERATIONS FIXEES A 1500 ET POPULATION VARIEES DE 100 A 1000 POUR L'ELEMENTS 13.	103
FIGURE V-65: TAUX D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DES POPULATIONS FIXEES A 200 ET 400 ITERATIONS POUR L'ELEMENTS 13.....	104
FIGURE V-66: TAUX D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DES POPULATIONS FIXEES A 200 ET 1600 ITERATIONS POUR L'ELEMENTS 13.....	104
FIGURE V-67: TAUX D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DES POPULATIONS FIXEES A 900 ET 400 ITERATIONS POUR L'ELEMENTS 13.....	105
FIGURE V-68: TAUX D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DES POPULATIONS FIXEES A 900 ET 1600 ITERATIONS POUR L'ELEMENTS 13.....	105
FIGURE V-69: STRUCTURE 3D 28 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 500 ITERATIONS.	106
FIGURE V-70: STRUCTURE 3D 28 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DE 1500 ITERATIONS.	107
FIGURE V-71: STRUCTURE 3D 28 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DES POPULATIONS FIXEES A 200 ET ITERATIONS A 400.	107
FIGURE V-72: : STRUCTURE 3D 28 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DES POPULATIONS FIXEES A 200 ET ITERATIONS A 1600.	108
FIGURE V-73: STRUCTURE 3D 28 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DES POPULATIONS FIXEES A 900 ET ITERATIONS A 400.	108
FIGURE V-74: STRUCTURE 3D 28 ELEMENT DEUXIEME SCENARIO CONVERGENCE FITNESS POUR LES METHODES RSA ET TSO EN FONCTION DES POPULATIONS FIXEES A 900 ET ITERATIONS A 1600.	109
FIGURE V-75: TAUX D'ENDOMMAGEMENT DES ELEMENT 18 ET 25 POUR LES ITERATION FIXEES 500.	109
FIGURE V-76: TAUX D'ENDOMMAGEMENT DES ELEMENT 18 ET 25 POUR LES ITERATION FIXEES 1500.	110
FIGURE V-77: TAUX D'ENDOMMAGEMENT DES ELEMENT 18 ET 25 POUR LES POPULATION FIXEES A 200.	110
FIGURE V-78: TAUX D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DES ITERATIONS FIXEES A 500 ET POPULATION VARIEES DE 100 A 1000 POUR LES ELEMENTS 18 ET 25.	111

Liste des Figures

FIGURE V-79: TAUX D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DES ITERATIONS FIXEES A 1500 ET POPULATION VARIEES DE 100 A 1000 POUR LES ELEMENTS 18 ET 25.	111
FIGURE V-80: TAUX D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DES POPULATION FIXEES A DE 200 POUR LES ELEMENTS 18 ET 25.....	112
FIGURE V-81: TAUX D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DES POPULATION FIXEES A DE 900 POUR LES ELEMENTS 18 ET 25.....	112
FIGURE V-82: TAUX D'ENDOMMAGEMENT EN FONCTION DES POPULATION FIXEES A DE 900 ET 1600 ITERATIONS POUR LES ELEMENTS 18 ET 25.....	113

Liste des Tableaux

Listes des Tableaux :

TABLEAU III-1: PROPRIETES MECANQUES ET GEOMETRIQUES DE LA STRUCTURE TREILLIS 2D A (31) ELEMENTS[8].....	47
TABLEAU III-2: SCENARIOS D'ENDOMMAGEMENTS DE LA STRUCTURE TREILLIS 2D A (31) ELEMENTS.	48
TABLEAU III-3: FREQUENCES NATURELLES SAINES ET ENDOMMAGEES DE LA STRUCTURE (31) ELEMENTS 2D.	48
TABLEAU III-4: PROPRIETES MECANIQUE ET GEOMETRIQUE DE LA STRUCTURE A 28 ELEMENTS 3D[52].	52
TABLEAU III-5: SYSTEMES DE COORDONNEES PAR RAPPORT AUX AXES X, Y ET Z.	53
TABLEAU III-6: SCENARIOS D'ENDOMMAGEMENTS DE LA STRUCTURE TREILLIS 3D A (28) ELEMENTS.	53
TABLEAU III-7: FREQUENCES NATURELLES SAINES ET ENDOMMAGEES DE LA STRUCTURE (25) ELEMENTS 3D.	53
TABLEAU V-1: TEMPS DE CALCULE POUR LE PREMIER SCENARIO D'ENDOMMAGEMENT.	81
TABLEAU V-2: TEMPS DE CALCULE POUR LE DEUXIEME SCENARIO DE LA STRUCTURE 31 ELEMENTS 2D.	88
TABLEAU V-3: TEMPS DE CALCULE POUR LE TROISIEME SCENARIO D'ENDOMMAGEMENT DE LA STRUCTURE 31 ELEMENTS 2D.....	97
TABLEAU V-4: TEMPS DE CALCULE POUR LE PREMIER SCENARIO DE LA STRUCTURE 3D 28 ELEMENTS.	105
TABLEAU V-5: TEMPS DE CALCULE POUR LE DEUXIEME SCENARIO DE LA STRUCTURE 3D 28 ELEMENTS	113
TABLEAU V-6: COMBINAISON TEMPS DE CALCULE DES OPTIMISATIONS RSA ET TSO POUR TOUS LES SCENARIO POUR LA STRUCTURE 31 ELEMENTS 2D CAS DES ITERATIONS FIXEES 500, 100 ET 2000.	114
TABLEAU V-7: COMBINAISON TEMPS DE CALCULE DES OPTIMISATIONS RSA ET TSO POUR TOUS LES SCENARIO POUR LA STRUCTURE 31 ELEMENTS 2D CAS DES POPULATIONS FIXEES 200, 400 ET 900.	115
TABLEAU V-8: COMBINAISON TEMPS DE CALCULE DES OPTIMISATIONS RSA ET TSO POUR TOUS LES SCENARIO POUR LA STRUCTURE 28 ELEMENTS 3D CAS DES ITERATIONS FIXEES 500 ET 1500... 116	
TABLEAU V-9: COMBINAISON TEMPS DE CALCULE DES OPTIMISATIONS RSA ET TSO POUR TOUS LES SCENARIO POUR LA STRUCTURE 28 ELEMENTS 3D CAS DES POPULATIONS FIXEES 200 ET 900.. 116	
TABLEAU VI-1: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS PREMIER SCENARIO ITERATION FIXE A 500 ET POPULATION VARIEE.	123

Liste des Tableaux

TABLEAU VI-2: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS PREMIER SCENARIO	
ITERATION FIXE A 1000 ET POPULATION VARIEE.....	123
TABLEAU VI-3: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS PREMIER SCENARIO	
ITERATION FIXE A 2000 ET POPULATION VARIEE.....	124
TABLEAU VI-4: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS PREMIER SCENARIO	
POPULATION FIXE A 200 ET ITERATION VARIEE.....	124
TABLEAU VI-5: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS PREMIER SCENARIO	
POPULATION FIXE A 400 ET ITERATION VARIEE.....	125
TABLEAU VI-6: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS PREMIER SCENARIO	
POPULATION FIXE A 900 ET ITERATION VARIEE.....	125
TABLEAU VI-7: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS DEUXIEME SCENARIO	
ITERATION FIXE A 500 ET POPULATION VARIEE.....	126
TABLEAU VI-8: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS DEUXIEME SCENARIO	
ITERATION FIXE A 1000 ET POPULATION VARIEE.....	127
TABLEAU VI-9: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS DEUXIEME SCENARIO	
ITERATION FIXE A 2000 ET POPULATION VARIEE.....	128
TABLEAU VI-10: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS DEUXIEME SCENARIO	
POPULATION FIXE A 200 ET ITERATION VARIEE.....	129
TABLEAU VI-11: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS DEUXIEME SCENARIO	
POPULATION FIXE A 400 ET ITERATION VARIEE.....	130
TABLEAU VI-12: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS DEUXIEME SCENARIO	
POPULATION FIXE A 900 ET ITERATION VARIEE.....	131
TABLEAU VI-13: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS TROISIEME SCENARIO	
ITERATION FIXE A 500 ET POPULATION VARIEE.....	132
TABLEAU VI-14: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS TROISIEME SCENARIO	
ITERATION FIXE A 1000 ET POPULATION VARIEE.....	133
TABLEAU VI-15: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS TROISIEME SCENARIO	
POPULATIONS FIXE A 200 ET ITERATION VARIEE.....	135
TABLEAU VI-16: VALEURS DE BEST POUR LA STRUCTURE 2D 31 ELEMENTS TROISIEME SCENARIO	
POPULATIONS FIXE A 900 ET ITERATION VARIEE.....	136
TABLEAU VI-17: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS PREMIER SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT ITERATION FIXEES A 500 ET POPULATION VARIEES.....	137
TABLEAU VI-18: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS PREMIER SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT ITERATION FIXEES A 1000 ET POPULATION VARIEES .	138
TABLEAU VI-19: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS PREMIER SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT ITERATION FIXEES A 2000 ET POPULATION VARIEES.....	139

Liste des Tableaux

TABLEAU VI-20: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS PREMIER SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT POPULATION FIXEES A 200 ET ITERATIONS VARIEES.	140
TABLEAU VI-21: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS PREMIER SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT POPULATION FIXEES A 400 ET ITERATIONS VARIEES	141
TABLEAU VI-22: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS PREMIER SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT POPULATION FIXEES A 900 ET ITERATIONS VARIEES	142
TABLEAU VI-23: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS DEUXIEME SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT ITERATION FIXEES A 500 ET POPULATIONS VARIEES	143
TABLEAU VI-24: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS DEUXIEME SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT ITERATION FIXEES A 1000 ET POPULATIONS VARIEES.	144
TABLEAU VI-25: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS DEUXIEME SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT ITERATION FIXEES A 2000 ET POPULATIONS VARIEES.	145
TABLEAU VI-26: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS DEUXIEME SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT POPULATIONS FIXEES A 200 ET ITERATIONS VARIEES.	146
TABLEAU VI-27: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS DEUXIEME SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT POPULATIONS FIXEES A 400 ET ITERATIONS VARIEES.	147
TABLEAU VI-28: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS DEUXIEME SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT POPULATIONS FIXEES A 900 ET ITERATIONS VARIEES	148
TABLEAU VI-29: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS DEUXIEME SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT ITERATION FIXEES A 500 ET POPULATIONS VARIEES	149
TABLEAU VI-30: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS DEUXIEME SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT ITERATION FIXEES A 1000 ET POPULATIONS VARIEES	149
TABLEAU VI-31: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS DEUXIEME SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT ITERATION FIXEES A 2000 ET POPULATIONS VARIEES	150
TABLEAU VI-32: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS DEUXIEME SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT POPULATIONS FIXEES A 200 ITERATION VARIEES	150
TABLEAU VI-33: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 2D 31ELEMENS DEUXIEME SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT POPULATIONS FIXEES A 900 ITERATION VARIEES	151
TABLEAU VI-34: VALEURS DE BEST DE LA STRUCTURE 3D 28 ELEMENTS PREMIER SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT ITERATIONS FIXEES A 500 POPULATIONS VARIEES	152
TABLEAU VI-35: VALEURS DE BEST DE LA STRUCTURE 3D 28 ELEMENTS PREMIER SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT ITERATIONS FIXEES A 500 POPULATIONS VARIEES	152
TABLEAU VI-36: VALEURS DE BEST DE LA STRUCTURE 3D 28 ELEMENTS PREMIER SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT POPULATIONS FIXEES A 200 ITERATIONS VARIEES.	153
TABLEAU VI-37: VALEURS DE BEST DE LA STRUCTURE 3D 28 ELEMENTS PREMIER SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT POPULATIONS FIXEES A 900 ITERATIONS VARIEES.	153

Liste des Tableaux

TABLEAU VI-38: VALEURS DE BEST DE LA STRUCTURE 3D 28 ELEMENTS DEUXIEME SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT ITERATIONS FIXEES A 500 POPULATIONS VARIEES .	154
TABLEAU VI-39: VALEURS DE BEST DE LA STRUCTURE 3D 28 ELEMENTS DEUXIEME SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT ITERATIONS FIXEES A 1500 POPULATIONS VARIEES .	154
TABLEAU VI-40: VALEURS DE BEST DE LA STRUCTURE 3D 28 ELEMENTS DEUXIEME SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT POPULATIONS FIXEES A 200 ET ITERATIONS VARIEES.	155
TABLEAU VI-41: VALEURS DE BEST DE LA STRUCTURE 3D 28 ELEMENTS DEUXIEME SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT POPULATIONS FIXEES A 200 ET ITERATIONS VARIEES.	156
TABLEAU VI-42: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 3D 28 ELEMENTS PREMIER SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT ITERATIONS FIXEES A 500 ET POPULATION VARIEES.	157
TABLEAU VI-43: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 3D 28 ELEMENTS PREMIER SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT ITERATIONS FIXEES A 1500 ET POPULATION VARIEES.	157
TABLEAU VI-44: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 3D 28 ELEMENTS PREMIER SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT POPULATIONS FIXEES A 200 ET ITERATIONS VARIEES.	158
TABLEAU VI-45: VALEURS DE FITNESS DE LA STRUCTURE 3D 28 ELEMENTS PREMIER SCENARIO	
D'ENDOMMAGEMENT POPULATIONS FIXEES A 900 ET ITERATIONS VARIEES.	158

Liste des abréviations

SHM: (*Structural Health Monitoring*).

CDF : Curvature Damage Factor.

ESP : Elemental stiffness parameter

HHT : Transformée de Hilbert-Huang (HHT)

(LoFCR) : le taux de changement de flexibilité locale.

Edof : La matrice de topologie.

DI_{LoFCR} : L'indicateur d'endommagement.

RSA : algorithme de recherche de reptiles (The Reptile Search Algorithm).

TSO : Optimisation des essaims de thons (Tuna Swarm Optimization).

PSO : L'optimisation des essaims de particules.

ACO : l'optimisation des colonies de fourmis.

NP : le nombre de populations de thon.

UB : la borne inférieure du problème donné.

LB : la borne supérieure du problème donné.

Listes des symboles :

$[K]$: matrice maîtresse de rigidité

$[M]$: matrice maîtresse de masse

K : la raideur du ressort.

m : la masse

λ : valeurs propres

X : vecteurs propres

$M(x)$: moment de flexion

E : le module de Young

I : le moment d'inertie de la section

EI : taux de réduction de la rigidité

A : surface de la section

Φ_A : le mode de référence modifié par endommagement ou réparation

Φ_B : le mode propre modifié par endommagement ou réparation

Φ : la matrice des déformées propres, Φ_i étant le $i^{\text{ème}}$ mode de vibration.

Ω : la matrice diagonale des rigidités modales

ω_i : la $i^{\text{ème}}$ pulsation propre.

F : la matrice de flexibilité avant endommagement.

F^* : la matrice de flexibilité après endommagement.

Δ : le changement de courbure absolu

n : le nombre de degré de liberté

N : Représente le nombre de modes à considérer.

K_i : la $i^{\text{ème}}$ matrice de rigidité élémentaire

Δa : la variation du vecteur α_i .

Monoculture

$\Delta\lambda$: Changement du vecteur de valeurs propres calculé par les fréquences naturelles.

S^{FREQ} : désigne la matrice de sensibilité à la fréquence naturelle

Φ_i : désigne la forme modale.

Δu : la variation du vecteur de déplacement

S^{DISP} : la matrice de sensibilité au déplacement statique

f : la fréquence (Hz).

K : La rigidité.

M : La masse.

w_n : La fréquence propre de la structure non fissurée dans le nième mode.

w_n^* : La fréquence propre de la structure fissurée dans le nième mode.

U_n : l'énergie de déformation de la structure non endommagée dans le nième mode.

U_n^* : l'énergie de déformation de la structure endommagée dans le nième mode.

ΔU_n : la différence entre les énergies de déformation de la structure non endommagée

DI : la courbure normalisée à l'emplacement de l'endommagement

(f_i^u) : là i eme fréquence propres à l'état initiale

(f_i^d) : là i eme fréquence propre à l'état final.

T : la période en secondes

D^e : sous domaine.

ε : les déformations de l'élément

U^e : déplacements nodaux

$\{\sigma\}$: la contrainte

$u(M)$: Représente la valeur de la fonction approchée en tout point M de l'élément.

N : La matrice ligne des fonctions d'interpolation de l'élément.

u_n : Variables nodales relatives aux nœuds d'interpolation de l'élément

Monoculture

D : est une matrice carrée symétrique dont les termes dépendent des caractéristiques mécaniques des matériaux

ν : le coefficient de poisson

u_i et u_j : déplacements respectives de U

v_i et v_j : déplacements respectives de V

$[T]$: matrice de passage

l_{ij} : cosinus directeur entre la ligne ij et la direction globale X.

m_{ij} : cosinus directeur entre la ligne ij et la direction globale Y.

(X_j, X_i) : les coordonnées globales des nœuds i.

(Y_j, Y_i) : les coordonnées globales des nœuds j

l : la longueur de l'élément ij .

α : l'angle entre l'axe local x et globale X

$[K_{Fa}^e]$: la matrice de rigidité résultante de la force axiale.

r : L 'espacement de la fibre par rapport à l'axe cancroïde de l'élément.

$[G]$: le module de cisaillement du matériau

J : le moment d'inertie polaire de la section droite.

I_{xx} : le moment d'inertie de la section droite de l'élément par rapport à l'axe x

I_{yy} : le moment d'inertie de la section droite de l'élément par rapport à l'axe y

I_{zz} : le moment d'inertie de la section droite de l'élément par rapport à l'axe z.

l_0 : la longueur initiale du ressort G_0 .

l : la longueur à l'équilibre statique.

(R_0) : repère galiléen

(S) : solide

τ_{ext} : le torseur des actions extérieures

D_s^a : le torseur des actions dynamiques

Monoculture

$\dot{u}_0$: La vitesse initiale à $t = 0$

ω_p : La pulsation propre du système

f : La fréquence propre

${}^x_0w_{int}$: le travail effectué, entre les instants correspondants à $x_0 = 0$

${}^x_0w_{ext}$: le travail effectué, entre les instants correspondants à $x(t)$

A, B et C : sont des constantes à déterminer par le biais des conditions initiales de position et de vitesse.

λ : le coefficient d'amortissement.

X : déphasage de la réponse par rapport à l'excitation.

x : le déplacement

$\{x\}$: vecteurs déplacements

F : la force

$\{F\}$: vecteur forces

$\{a\}$ et $\{b\}$: sont obtenus à partir des conditions initiales sur les déplacements et les vitesses.

$\{x\}_0$ et $\{\dot{x}\}_0$: les conditions initiales de déplacement et de vitesse respectivement.

F_u : matrice de flexibilité pour les cas intacts.

F_d : matrice de flexibilité pour les cas endommagés.

(LoFCR) : le taux de changement de flexibilité locale.

$\overline{\gamma_j}$: la valeur absolue maximale des éléments dans la colonne correspondante de $LoFCR_{ij}$.

$\overline{\gamma^{bc}_j}$: un vecteur nul en fonction du nombre de degrés de liberté contraints.

$\overline{b\gamma_j} = \overline{\gamma_j}$: le vecteur calculé au niveau des supports.

$Edof$: La matrice de topologie.

el_nu : le nombre d'élément.

$\vartheta = dof$: les degrés de libertés.

N : le nombre d'éléments.

Monoculture

DI_{LoFCR} : L'indicateur d'endommagement.

OF : La fonction fitness est définie comme la différence entre $(DI_{LoFCR})_j^{Measured}$ et $(DI_{LoFCR})_j^{Calculated}$.

$rand$: la valeur aléatoire.

$Best_j(t)$: la j^{emme} position dans la meilleure solution obtenue.

$P_{(i,j)}$: le pourcentage de différence entre la j^{emme} position de la meilleure solution obtenue.

t : le numéro de l'itération en cours.

T : le nombre maximum d'itérations.

$n_{(i,j)}$: l'opérateur de chasse pour la j^{emme} position dans la i^{emme} solution.

β : contrôle la précision d'exploration pour la phase d'encerclement au cours des itérations.

$R(i,j)$: une valeur utilisée pour réduire la zone de recherche.

r_1 : un nombre aléatoire entre $[1 \ N]$ et $x_{(r_1,j)}$ désigne une position aléatoire de la i^{emme} solution.

N : le nombre de solutions candidates.

$ES(t)$: un rapport de probabilité prend des valeurs décroissantes aléatoirement entre 2 et -2 tout au long du nombre d'itérations.

r_2 : une valeur aléatoire compris entre $[1 \ N]$.

r_3 : une valeur aléatoire compris entre $[-1 \ 1]$.

D : le nombre de solutions utilisées.

X_i^{int} : c'est i^{emme} individu initial.

Introduction générale :

Le développement technologique est un facteur propulseur, il a permis à l'humanité de franchir un grand pas dans ce qui est l'amélioration du mode de vie. C'est un atout primordial qui à permet d'amplifier l'évolutions de plusieurs domaines dont celui de la construction.

L'être humain à beaucoup investi en édifiant des constructions plus sûres et en développant des moyens de contrôle de plus en plus performants, cela en vus d'assurer une sécurité pour l'utilisateur et une rentabilité et une réputation aux constructeur, de nombreuse recherche ont été porté sur les moyens de surveillance et l'étude des défaillances structurelles afin de parvenir à toute anomalie.

Ces moyens et méthodes de surveillance n'ont pas cesser d'accroître en augmentant leur précision, en variant le mode d'utilisation, en réduisant temps d'emplois, et en minimisons leur cout de réalisation.

Au cours des dernières années, les avancées technologiques dans le domaine de la conception et dans les disciplines connexes ont favorisé des études très poussée avec des simulations et des optimisations sur les structures, permettant de localiser les zones fragiles, de prédire le comportement de ces structures et mécanismes en leurs affilient des excitations et des défaillances.

Un endommagement va perturber et déstabiliser tous les paramètres initiaux et les propriétés mécaniques telles que les modes propres les fréquences naturelles, ces paramètres modaux sont le reflet d'un état de santé d'une structure, on se basent sur ces réponses et ces paramètres plusieurs méthodes et techniques de détection d'endommagements ont été établie.

Parmi ces méthodes de localisations on retrouve la méthode de l'index de flexibilité pour l'identification des endommagements dans les structures en utilisant des modèles d'élément finis, et la quantification de ses endommagements en utilisant des algorithmes d'optimisation.

La combinaison de la méthode des éléments finies, la dynamique des structure et méthode d'indentification de plus l'optimisation d'écoule vers le dimensionnement final de toute conceptions.

Nous avons élaboré un plan de travail qui est présenter comme suite :

Chapitre 1 : Dans ce chapitre nous avons fait une recherche bibliographique sur les méthodes de détection des endommagements récentes et plus précisément sur celles basée sur le concept vibratoire et notamment sur les repenses fréquentielle et les méthodes drivées.

Chapitre 2 : On a pris l'initiative de diviser ce chapitre en deux grandes partie , la premier propose un éclaircissement sur la théorie des éléments finis en fessant point sur ça chronologie afin d'établir une étude, suite à quoi on a fait référence sur le paramètre de rigidité de plusieurs

Introduction Générale

systèmes, la deuxième partie est baser sur la dynamique des structure et l'étude vibratoire qui est fortement utiliser pour extraire les modes propres et les fréquences naturelles afin d'être utilisé comme des données de base dans des algorithmes pour la détection des endommagements.

Chapitre 3 : Dans cette partie le travail est aménagé en deux axes, le premier est une étude sur la méthode de détection et localisation des endommagements qui est basé sur l'index de flexibilité.

Dans la deuxième partie on étudier deux structures de dimension différentes 2D et 3D, où on a pu extraire les fréquences naturelles de plusieurs modes en conditions saine et endommagées, suivie d'une exécution de cette méthode afin de localiser nos endommagements, avec des courbes indicatrices pour chaque élément en varient nos scénarios.

Chapitre 4 : Une présentation de deux algorithmes d'optimisation intitulé « RSA » et « TSO » qui sont inspirés des comportements de chasses respectivement des reptiles et thons en expliquant le fonctionnement avec des pseudocodes de ces programmes.

Chapitre 5 : le contenu proposé s'est porté sur l'optimisation de nos deux structures en utilisant nos deux algorithmes « RSA » et « TSO » dans le but de quantifier la sévérité des endommagements, et afin d'évaluer différents paramètres à savoir : le temps de calcul, « Best » taux d'endommagements et « fitness » ce qui signifie l'erreur.

Recherche bibliographique

I Recherches bibliographiques

I.1 Introduction

SHM (*Structural Health Monitoring*) peut être défini comme des méthodes automatisées pour déterminer les changements défavorables dans l'intégrité des systèmes mécaniques[1], L'objectif du SHM est de fournir une évaluation automatisée et en temps réel de la capacité d'une structure à remplir sa fonction[2].

Dans la phase de la conception des divers mécanismes et structures mécanique, la surveillance de l'intégrité structurale représente une partie importante et intéressante, cette étape est appelée (*Structural Health Monitoring*), la *SHM* consiste à surveiller en temps réel ou à intervalles réguliers l'état de santé d'une structure en détectant des endommagements dans des éléments constituant une structure.

Afin d'assurer une autonomie de ces structures, la détection des endommagements permet de prédire le comportement dynamique de la structure sous l'action d'une excitation quelconque, d'optimiser les performances de la structure et définir les limites d'utilisation.

Dans ce travail de recherche nous allons introduire sur la détection des endommagements en parlant sur les divers méthodes et modalités en se basent sur la méthode vibratoire.

I.2 Généralités sur l'étude des structures en mécanique.

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

- Elles engendrent la ruine de la structure ou la défaillance de ses constituants par rupture (fatigue par endommagement ou dépassement de contraintes élastiques).
- Elles sont souvent source des défauts de fabrication lors de l'usinage des pièces mécaniques.

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

- La structure elle-même.
- L'environnement vibratoire (les forces extérieures).
- La réponse de la structure due aux forces extérieures.

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

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

I.2.1 L'endommagement des structures

L'endommagement résulte de mouvements et les frottements microscopiques qui détruisent peu à peu les liaisons entre les atomes, ce qui engendre une dégradation et un changement brutal dans les propriétés mécaniques des matériaux, ce changement menace les performances de ces mécanismes.

L'endommagement est causé aussi par des contraintes et des excitations, Une structure soumise à des chargements dynamiques peut subir, selon la nature des sollicitations, de grandes variations dans son comportement allant de la phase de déformation élastique, la phase plastique jusqu'à la rupture en cas d'endommagement. La présence de ce dernier entraîne des dégradations des propriétés mécaniques des matériaux.

I.2.2 La détection des endommagements

Pour les techniques de détections d'endommagement par méthode vibratoire, la base réside dans l'idée que les paramètres modaux (fréquences, coefficient d'amortissement, déformés propres), mesurés sous fonction des propriétés mécanique de la structure (rigidité, masse, amortissement).

Ces modifications pouvant intervenir sur les propriétés physiques ou mécaniques doivent être détectables à travers des changements ces paramètres.

Récemment, l'identification d'endommagements structuels à base de vibrations a gagné beaucoup d'intérêt pour la recherche d'ingénierie. La théorie de base d'identification d'endommagements structuels à base des essais vibratoires est les changements des propriétés structurales telles que la rigidité et la Masse. La présence des endommagements influence la réaction de vibration aussi bien que les propriétés dynamiques de la structure donnée.

La phase la plus importante est considérer comme primordiale dans l'identification d'endommagements des structures à base des essais vibratoires, c'est d'extraire des informations des paramètres basés sur des mesures de réponse structurelle. L'information globale d'une structure fournit l'exactitude et les données critiques pour déterminer le statut de la structure, qui réfléchit sur les propriétés dynamiques à savoir la fréquence naturelle. L'analyse modèle expérimentale a été employée couramment dans la communauté de la recherche d'ingénierie pour extraire des paramètres de modèle structural tels que des fréquences naturelles[4].

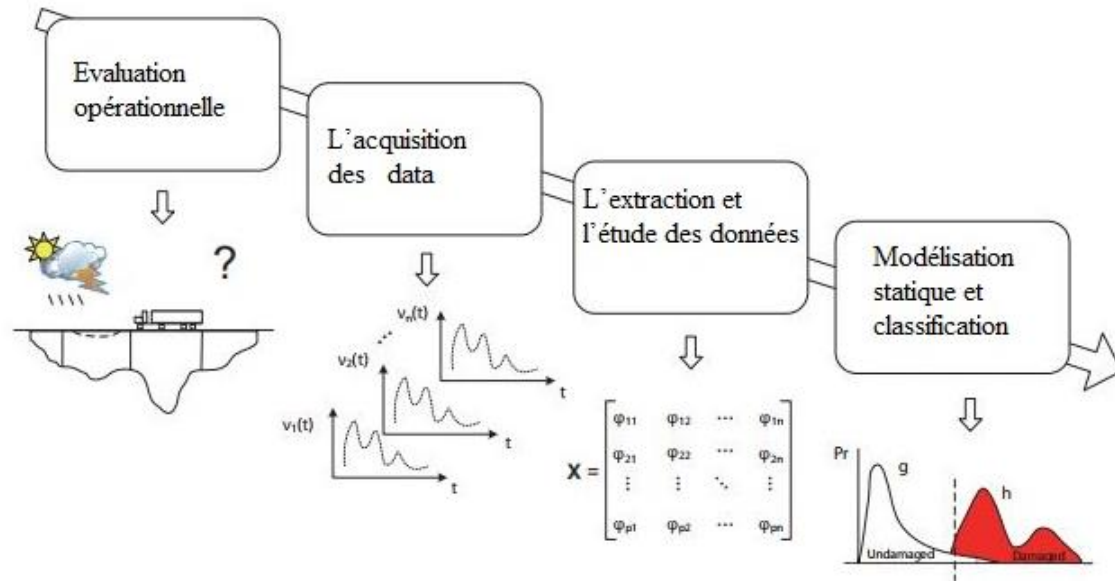


Figure I-1: La démarche de la détection des endommagements[5].

I.2.3 Méthodes et modalités de détection des endommagements

La prédiction du comportement dynamique et l'identification d'endommagement de la structure est un sujet de grande importance pour la communauté scientifique ces dernières années.

La définition pour un système de classification pour des méthodes d'identification d'endommagements comme suit :

Rytter [5], proposa quatre niveaux d'évaluation d'endommagement :

- Détermination de l'existence d'endommagement dans la structure.
- Localisation d'endommagement.
- Quantification de sévérité de l'endommagement.
- Prédiction de la durée de vie résidentielle.

D'après Saadat et All [6], ils ont mis en place un classement pour deux types de méthodes de détection d'endommagement en fonction de leur aptitude et niveau de détection : méthodes globales et méthodes locales.

Les méthodes globales indiquent simplement la présence de l'endommagement alors que les méthodes locales vont jusqu'à sa localisation.

Les méthodes globales tentent d'évaluer la condition de toute la structure contrairement aux méthodes locales qui mettent au point des instruments non destructifs pour tous les éléments constitutifs de la structure.

Les méthodes globales peuvent être utilisées de manière continue ou bien intermittente pour la surveillance de la santé des structures en amont alors que les méthodes locales sont utilisées en aval pour détecter, localiser et caractériser l'endommagement plus exactement.

Lee et All [7], résument les différents types méthodes de détection d'endommagement en les catégories suivantes:

- méthodes utilisant la variation des paramètres modaux : changement en fréquences naturelles et déformée des modes propres.
- Méthodes des matrices basées sur la matrice de raideur ou la variation de flexibilité.
- Méthodes basées sur le changement de la fonction de la réponse fréquentielle(FRF).

La détection d'endommagement par essais vibratoires se base sur les propriétés de vibration peuvent être classées en : fréquences de résonance, fonctions de réponse en fréquentielle, formes modales (MAC et COMAC), courbures de forme de mode, énergie de déformation modale, flexibilité dynamique, amortissement, antirésonance, vecteurs Ritz, modèles de la famille ARMA, analyse des variables canoniques (CVA), caractéristiques non linéaires, analyse temps-fréquence, décomposition en mode empirique, transformation de Hilbert, analyse en composantes principales ou décomposition en valeurs singulières, mise à jour du modèle fini, propagation des ondes, fonctions d'autocorrélation et autres méthodologies de caractéristiques.

I.3 Méthode de détection des endommagements basées sur les déplacements :

La conception de structures complexes pour satisfaire les restrictions de réponse dynamique est entravée par la difficulté inhérente et le coût de calcul de l'analyse dynamique. Ces limitations limitent peu le nombre de conceptions d'essai pouvant être analysées. De plus, à partir de la seule analyse, il n'est généralement pas clair comment une conception doit être modifiée pour améliorer ou maintenir ses propriétés dynamiques. Ces deux problèmes sont accentués lorsque le processus de conception structurelle impliqué est une procédure de conception optimale automatisée. Dans ces méthodes de conception informatique (par exemple, la méthode des directions réalisables), il existe une exigence fondamentale d'informations concernant les changements dans les quantités de réponse dynamique aux changements dans les variables de conception ainsi qu'un besoin de ré analysé rapide des conceptions d'essai modifiées. Une partie importante de l'analyse dynamique implique la solution propre du problème[8] :

$$[K]X = \lambda[M]X \quad (1.1)$$

Où les grandeurs scalaires λ (valeurs propres) et les vecteurs correspondants non triviaux, X (vecteurs propres) doivent être déterminés.

Dans l'application structurelle courante, les matrices $[K]$ et $[M]$ sont respectivement les matrices maîtresses de rigidité et de masse de la structure ; leur ordre n correspond au nombre de degrés de liberté élastiques du système. Ce sont des matrices symétriques, dont les composants dépendent des paramètres de conception[8].

Les fréquences propres et les coefficients d'amortissement constituent des indicateurs primaires de modification structurale. Cependant, leur faible sensibilité aux endommagements les rend peu à même d'être utilisés en pratique, sauf pour des niveaux d'endommagement élevés. Ces indicateurs sont de plus de niveau 1 selon la classification de Rytter, et donc ne permettent pas de localisation. Une alternative classique consiste à recourir aux modes propres identifiés,

offrant par là même la possibilité de disposer de méthodes de niveau 2 (détection et localisation de modification structurale)[9].

L'une des approches les plus intuitives consiste à utiliser les coefficients MAC et COMAC pour identifier des modifications structurales. Les modes sont comparés deux à deux, Φ_A et Φ_B représentant respectivement le mode de référence et le mode propre modifié (par endommagement ou réparation).

Une autre façon d'utiliser les déformées propres pour obtenir des informations sur la source des changements vibratoires est d'étudier leurs dérivées. Il y a en effet une relation directe entre la courbure des déformées propres et les déformations de flexion. L'existence d'un endommagement dans une structure diminue la rigidité EI de la partie fissurée. Considérons une section de la poutre d'abscisse x soumise au moment de flexion $M(x)$. La courbure, $v''(x)$, en ce point, s'écrit :

$$v'' = M(x)/EI \quad (1.2)$$

Où E est le module d'élasticité et I le moment d'inertie de la section. La diminution de EI mène à l'augmentation de la courbure v'' dans la section. Comme les changements de courbure sont locaux et qu'ils dépendent du taux de réduction de la rigidité EI , le changement de courbure peut être utilisé pour la détection et la localisation des endommagements. La différence absolue de la courbure de déformées propres de référence et testée dans la région de modification doit être maximale.

Plus la réduction de la rigidité en flexion est grande (correspondant ainsi à un endommagement), plus le changement de courbure sera grand. Dans le cas où plusieurs modes propres sont utilisés, les valeurs absolues du changement de courbure liée à chaque mode peuvent être additionnées pour fournir un paramètre unique.

Le changement absolu de la courbure des modes propres peut être un bon indicateur d'endommagement pour un modèle aux éléments finis. En utilisant un schéma aux différences centrées, les valeurs de la courbure en des points distants de la résolution spatiale h peuvent être calculées à partir des déformées propres :

$$\Phi''(x) = \frac{\Phi(x+h) - 2\Phi(x) + \Phi(x-h)}{h^2} \quad (1.3)$$

Il convient cependant d'être prudent sur la détermination des courbures. Le calcul de la courbure obtenu par des déformées propres peut aboutir à des erreurs inacceptables. Sazonov et Klinkhachorn[9] ont eu l'idée de conserver cette approche numérique mais se sont focalisés sur les effets de la discrétisation spatiale ($n = 1/h$).

Une autre classe des méthodes de détection de modification structurale pour estimer les changements du comportement de la structure utilise la matrice de flexibilité. La méthode de flexibilité n'exige pas un modèle analytique de la structure et seules quelques fréquences propres et modes propres (situation de référence et situation testée) sont nécessaires. L'expression de la matrice de rigidité et de flexibilité s'écrit :

$$K = M \Phi \Omega \Phi^t M = M \left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \Phi_i \Phi_i^t \right) M \quad (1.4)$$

$$F = \Phi \Omega^{-1} \Phi^t = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_i^2} \Phi_i \Phi_i^t \quad (1.5)$$

- $\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n]$ est la matrice des déformées propres, Φ_i étant le $i^{\text{ème}}$ mode de vibration.
- $\Omega = [\omega_i^2]$ est la matrice diagonale des rigidités modales, ω_i étant la $i^{\text{ème}}$ pulsation propre. F est la matrice de flexibilité.

La formulation de la matrice de flexibilité par cette méthode est approximative, car seulement un petit nombre de modes (typiquement les modes de basses fréquences) est mesuré. Les pulsations et les déformées propres peuvent s'obtenir par calcul ou par mesure.

La présence d'endommagements diminue la rigidité de la structure. Comme la flexibilité est l'inverse de la rigidité, la réduction de rigidité doit augmenter la flexibilité de la structure. Le changement de flexibilité peut donc être utilisé pour détecter et localiser un endommagement.

Ainsi, si on enregistre des paramètres modaux à partir de deux séries de mesure, l'une pour la structure non endommagée et l'autre pour la structure endommagée, en utilisant l'expression (1.7), la matrice de flexibilité F peut être calculée dans les deux cas. Chaque colonne de la matrice de flexibilité représente l'ensemble des déplacements nodaux d'une force unitaire appliquée à chaque degré de liberté. À partir de ces matrices, on obtient la matrice de changement de flexibilité :

$$\Delta = F^* - F \quad (1.6)$$

Dans laquelle F et F* sont respectivement des matrices de flexibilité avant et après endommagement. Pour chaque degré de liberté j (ou nombre de modes), en choisissant la valeur maximale de chaque colonne de Δ , on obtient :

Une autre façon d'utiliser les déformées propres pour obtenir des informations sur la source des changements vibratoires est d'étudier leurs dérivées. Il y a en effet une relation directe entre la courbure des déformées propres et les déformations de flexion.

En combinant certains aspects des méthodes de courbure des déformées propres et de flexibilité, l'idée peut être émise que la perte de la rigidité localisée cause l'augmentation de courbure au même point. Le changement de la courbure s'obtient alors par la flexibilité au lieu des déformées propres.

$$\Delta = \sum_{i=1}^n |F_i^{*''} - F_i''| \quad (1.7)$$

Où Δ et n représentent respectivement le changement de courbure absolu et le nombre de degré de liberté (ou dans le nombre de modes identifiés). En appliquant, soit un opérateur de différence centrée pour mesurer l'amplitude modale, soit un opérateur polynomial adapté à l'amplitude modale, ultérieurement différencié, la courbure associée à chaque chargement unitaire de la flexibilité peut être obtenue. L'interpolation peut encore se faire pour générer les degrés de liberté supplémentaires entre les capteurs[9].

Abdel Wahab et De Roeck [10] ont légèrement modifié l'indicateur MSC (Mode Shape Curvature) pour détecter les endommagements dans des poutres simplement appuyées. Les

structures contiennent des endommagements à différents endroits. Ils ont proposé le facteur d'endommagement "Curvature Damage Factor (CDF)", que nous avons choisi pour la détection d'endommagements dans ce mémoire, comme suit :

$$CDF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(\varphi_i^{endommagé})'' - (\varphi_i^{sain})''| \quad (1.8)$$

- N Représente le nombre de modes à considérer.

D'après les données mesurées sur un pont en béton, les auteurs ont montré que la détection de plusieurs endommagements peut être difficile avec les courbures modales classiques à partir des résultats d'un seul mode, et que le facteur CDF permet une identification claire de ces endommagements.

Chen et al. [11], ont présenté un algorithme d'identification des dommages en deux étapes pour utiliser le changement de courbure de déplacement statique mesurée et la théorie du système gris.

Wang et al. [12], ont proposé un algorithme d'identification en deux étapes pour identifier les dommages structurels en utilisant les changements de fréquences naturelles et mesurer les déplacements statiques.

Bakhtiari-Nejad et al. [13], ont présenté une méthode pour décrire la variation du déplacement statique de certains degrés de liberté en minimisant la différence entre les vecteurs de charge des structures endommagées et non endommagées.

Xu et al.[14, 15], ont présenté une nouvelle méthodologie d'identification paramétrique dans le domaine temporel utilisant à la fois des séries temporelles de mesure de déplacement structurel et de vitesse sans aucun processus d'extraction de valeurs propres et de modes propres.

Sieniawska et al. [16], ont identifié la rigidité en flexion d'un pont sur la base de mesures de déplacement soumises à une charge mobile avec une amplitude constante connue. En cas d'excitations inconnues du véhicule, les excitations d'entrée et les paramètres structurels du pont doivent être identifiés en même temps.

Law [17], a proposé une procédure dans le domaine temporel en deux étapes pour l'identification simultanée des charges mobiles et des dommages au pont à partir des mesures de déplacement avec un placement complet du capteur.

I.3.1 Méthode basée sur les déplacements statiques[18] :

Dans le modèle éléments finis (EF), la matrice de rigidité globale K peut être exprimé sous la forme suivante de non-positif décomposition des paramètres :

$$K = \sum_{i=1}^m a_i K_i = a_1 K_1 + a_2 K_2 + \dots + a_m K_m \quad (1.9)$$

où m est le nombre des éléments de la structure, α_i est le paramètre de rigidité élémentaire initial (ESP : elemental stiffness parameter), et K_i est la i – ième matrice de rigidité élémentaire divisée par α_i .

- Basé sur la matrice de sensibilité de fréquence naturelle, l'équation suivante peut être décrite :

$$S^{FREQ} . \Delta \alpha = \Delta \lambda \quad (1.10)$$

Où, où $\Delta \alpha$ est la variation du vecteur α_i .

$\Delta \lambda$ Changement du vecteur de valeurs propres calculé par les fréquences naturelles.

et S^{FREQ} désigne la matrice de sensibilité à la fréquence naturelle qui peut être résolue par la formule dans l'article [8] :

$$S_{ij}^{FREQ} = \Phi_i^T K_j \Phi_i, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, \quad (1.11)$$

où Φ_i désigne la forme modale. Puisque $\Delta \lambda$ peut être facilement mesuré, $\Delta \alpha$ peut être résolu en utilisant $\Delta \lambda$.

- Sur la base de la matrice de sensibilité au déplacement statique dans la méthode de détection des endommagement, l'équation suivante peut être décrite :

$$S^{DISP} = \Delta \alpha = \Delta u \quad (1.12)$$

où Δu est la variation du vecteur de déplacement et S^{DISP} désigne la matrice de sensibilité au déplacement statique qui peut être résolue par la formule dans la référence[19].

I.4 Méthodes basses sur les fréquences :

I.4.1 La fréquence :

La fréquence est une grandeur liée à un phénomène périodique, qui mesure le nombre de fois où ce phénomène se reproduit dans un intervalle donné, est définie aussi comme le nombre de cycles complets d'un processus périodique se produisant par unité de temps[20], D'un point de vue structurel, on peut évaluer la fréquence non amortie en utilisant :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (1.13)$$

- f C'est la fréquence (Hz).
- K La rigidité.
- M La masse.

Le système structurel avec un Ddl n'a qu'une seule fréquence.

D'après l'équation (1.13), il est évident que tout changement de fréquence est dû à des changements de rigidité ou de masse ou des deux. On suppose souvent que la masse ne change pas et qu'elle reste constante. Par conséquent, s'il y a un changement de fréquence, il est dû au

changement de rigidité. Dans les systèmes amortis, des changements de fréquence peuvent résulter de changements d'amortissement et il est courant que les deux (rigidité et amortissement) changent.

Ce changement des paramètres est dû à des défaillances et des endommagements dans les différents systèmes et structures mécaniques, pour cela les méthodes fréquentielles représentent un axe important dans le domaine préventif.

I.4.2 Relation entre la fréquences et l'incrémentation de l'énergie :

Gudmundson [21] a utilisé une théorie des perturbations du premier ordre pour prédire les changements de fréquences de résonance d'une structure dus à des fissures, des encoches et d'autres changements géométriques. Il a montré que les changements de fréquence propre dépendent de la différence d'énergie de déformation de la structure fissurée et non fissurée. Les fréquences propres en vibration transversale d'une poutre avec une fissure, peuvent être exprimées en termes d'énergie stockée dans la fissure et l'énergie de vibration de la structure comme [21].

$$\frac{w_n^{*2}}{w_n^2} = 1 - \frac{\Delta U_n}{U_n} \quad (1.14)$$

- w_n Est la fréquence propre de la structure non fissurée dans le nième mode.
- w_n^* Est la fréquence propre de la structure fissurée dans le nième mode.
- U_n Est l'énergie de déformation de la structure non endommagée dans le nième mode.
- U_n^* Est l'énergie de déformation de la structure endommagée dans le nième mode.
- $\Delta U_n = U_n^* - U_n$ Est la différence entre les énergies de déformation de la structure non endommagée, égale à l'énergie de déformation stockée dans la fissure dans son nième mode.

$$\left[\frac{\Delta w}{w} \right]_n = DI \left[\frac{x}{x_{RMS}} \right]_n^2 \quad (1.15)$$

L'équation (1.3) reliant la variation des fréquences naturelles au paramètre d'endommagement DI et à la courbure normalisée à l'emplacement de l'endommagement (relative à la courbure moyenne de la structure et représentée par x_{RMS}), est assez générale et également applicable à d'autres structures[22].

I.4.3 Variations des fréquences propre Δf

Ces méthodes basées sur l'identification des variations des fréquences propres résultent des variations des matrices de raideur ou de masse. Plusieurs articles contiennent des résultats numériques ou expérimentaux de détection d'endommagement à l'aide de telles méthodes avec plusieurs applications.

Elle est considérée comme l'une des méthodes prédominantes de détection d'endommagements dans les procédures d'évaluation structurelle.

Lorsqu'un endommagement existe dans une structure, la rigidité est réduite et par conséquent la diminution des fréquences propres du système peut être observée. L'un des avantages de cette technique de détection est que la mesure des fréquences peut être effectuée rapidement et facilement.

La détection des dommages par la méthode de changement de fréquence demande une estimation précise de ces fréquences mesurées. Comme le temps d'acquisition est court, les erreurs possibles sont comparables aux décalages de fréquence dus aux dommages, il est donc impossible d'observer l'apparition de dommages à un stade précoce. Les méthodes simples réelles telles que le zero-padding, le fenêtrage de signal ou l'interpolation n'offrent pas une réelle amélioration de la lisibilité de la fréquence[23].

Les fréquences propres, considérées comme un indicateur très sensible à l'endommagement, ont été utilisées dans plusieurs applications, notamment pour la surveillance des structures de type ponts et bâtiments. Le principe repose sur le fait que l'endommagement, selon sa position et sa taille, induit une perturbation du comportement global de la structure, traduite par une réduction des fréquences propres[24] Cette réduction, exprimée le plus souvent en pourcentage, est calculée via l'équation suivante :

$$\Delta f = \frac{f_i^u - f_i^d}{f_i^u} \quad (1.16)$$

Les termes (f_i^u) et (f_i^d), représentent respectivement la i ème fréquence propres à l'état initiale et la i ème fréquence propre à l'état final.

Messine et al. [25] suggèrent une erreur standard de $- + 0,15\%$ comme valeur de référence pour les fréquences naturelles mesurées en laboratoire avec la technique du marteau à impulsion. En revanche, les estimations de l'amortissement modal et de la forme modale ont des niveaux d'erreur jusqu'à 20 fois pires [26] que ceux des estimations de fréquence naturelle correspondantes.

Cawley et Adams [27] ont utilisé les changements des fréquences naturelles avec un modèle élément finis pour localiser le site endommagé.

Certains chercheurs [25-30] ont trouvé que la méthode sensible aux erreurs de mesure et des moyens d'améliorer la localisation ont été proposés [30].

Doebeling *et al.* [31], ils sont travaillés sur l'article qui a proposé de détecter les endommagements en utilisant la mesure des vibrations a été écrit par Lifshitz et Rotem [32] Ils ont utilisé la variation des fréquences naturelles via des changements dans les modules dynamiques pour détecter les endommagements dans les élastomères.

I.4.4 Méthode basée sur le temps des fréquences

Dans l'analyse des vibrations, il est possible de visualiser le signal en forme d'onde dans le temps sur des oscilloscopes et par conséquent les composantes de fréquence. La formule suivante donne la relation entre le temps et la fréquence :

$$T = \frac{1}{f} \quad (1.16)$$

Où : T est la période en secondes, et f est la fréquence en Hz.

Cette formule permet de déterminer les composantes de fréquence à partir du signal de temps (données en forme d'onde)

L'analyse dans le domaine temporel possède des limites dans l'identification des défauts dans un composant spécifique parce que dans une machine ou bien dans une structure la composition générale est combiner de nombreux éléments et leurs contributions individuelles au signal global de vibration sont très difficiles à distinguer. Plusieurs paramètres peuvent être utilisés pour interpréter le signal dans le domaine d'analyse temporel.

C'est la raison pour laquelle les chercheurs se sont intéressés à l'analyse dans le domaine de fréquence. Dans cette analyse, la fréquence des principaux pics peut être associés aux composants spécifiques en se basant sur la spécification géométrique et la vitesse opératoire des composants. En surveillant des fréquences particulières, on peut détecter plus facilement le composant défectueux. Parmi les techniques permettant d'analyser le signal vibratoire dans le domaine des fréquences, la plus connue est la transformée de Fourier qui permet d'exprimer un signal périodique en tant que somme de différentes fréquences sinusoïdales ou exponentielles.

Plusieurs techniques telles que le spectre de puissance (SP) utilisent la transformée de Fourier comme base d'analyse. Le spectre de puissance automatique du signal est simplement une transformation de Fourier du signal multiplié par son conjugué complexe. **Cavacece et al** (2002) ont utilisé l'auto puissance et la puissance croisée des spectres pour détecter les défauts à un stade précoce dans les transmissions aéronautiques.

La théorie complexe de l'analyse temps-fréquence limite les ingénieurs dans l'utilisation de ces méthodes dans le diagnostic des machines. Pour cette raison un logiciel maison (logiciel A : TFAAnalysis) a été développé afin de permettre l'utilisation de différentes méthodes d'analyse temps fréquence tel que la transformée de Fourier à fenêtre glissante, la représentation de **Wigner-Ville** et les ondelettes. Le programme permet à l'utilisateur d'effectuer les différentes distributions de la classe Cohen regroupant les méthodes temps-fréquence telles que les distributions de **ChoiWilliams**, de **Born-Jordan-Cohen**. Ce programme a été développé spécialement pour le diagnostic de défauts dans les structure, et comprend la plupart des méthodes couramment utilisées dans l'analyse temps-fréquence[33].

Les méthodes temps-fréquence permettent :

- 1- De fournir une représentation du signal en trois dimensions (amplitude-temps-fréquence).
- 2- De détecter et de suivre le développement des défauts qui génèrent une faible puissance vibratoire.

- 3- De superviser des machines dans lesquelles le processus de fonctionnement normal produit une amplitude élevée des chocs périodiques.

Toute représentation temps-fréquence qui remplit les équations (1.5) et (1.6) sont considérée comme une distribution d'énergie temps-fréquence [34] (TFED) $P(t, f)$

$$|x(t)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} P(t, f) df \quad (1.17)$$

$$|S(f)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} P(t, f) dt \quad (1.18)$$

L'énergie totale du signal[34] est :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} P(t, f) dt df \quad (1.19)$$

Ce concept est important pour la détection des dommages structurels si l'on souhaite utiliser une approche énergétique, car seules les distributions d'énergie temps-fréquence (TFED) peuvent montrer un flux d'énergie réel et complet dans le plan temps-fréquence[35].

(Oh et Sohn ; Farrar et Worden ; Gui et al).[36-38] Ils ont noté que la précision des méthodes basées sur les données pour le diagnostic structurel est associée à la sélection appropriée des données d'entités. D'un point de vue systématique, cependant, peu de tentatives ont été faites pour aborder le diagnostic structurel basé sur les données et la détection des endommagements pour les ponts à haubans en termes d'applicabilité des techniques d'extraction de caractéristiques et de formation aux données. Les résultats de ces études précédentes peuvent ne pas tenir pleinement compte du processus de données dans divers scénarios dans un pont à haubans. En outre, les approches basées sur les données étendent également la fonctionnalité de ces méthodes conventionnelles basées sur la physique (par exemple : les ondelettes ou les transformées de Fourier à court terme), qui sont définies dans des séries temps-fréquence pour être plus robustes et disposent d'outils adaptatifs pour l'extraction de caractéristiques.

(Bin et al). De plus, les autres techniques temps-fréquence, dont la transformée de Hilbert-Huang (HHT)[39].

(Yang et al ; Hsu et al) [40] ils ont développés le transformé de Teager Huang (THT).

(Kim et Melhem). [41] Ils ont sélectionnés des méthodes d'extraction de caractéristiques c'est essentielle pour garantir l'efficacité des données du processus d'apprentissage automatique. Le signal pour l'extraction de caractéristiques temps-fréquence se situe dans un domaine temporel court.

Méthodes des éléments finis et la dynamique des structures

II Méthodes des éléments finis et la dynamique des structures :

II.1 Méthodes des éléments finis :

II.1.1 Introduction

La méthode des éléments finis (M.E.F.) est un des outils les plus efficaces et les plus généraux pour l'analyse des structures dans de nombreux secteurs de l'industrie aérospatial, automobile, nucléaire, génie civil, construction navale, mécanique, etc., dans ces domaines, la conception et la construction les essais théoriques et les simulations représentent une partie primordiale afin d'assurer une sécurité pour l'utilisateur et une rentabilité pour les constructeurs.

C'est une phase qui va compléter le dimensionnement des systèmes après avoir étudié leurs comportements, parmi les méthodes les plus utilisées c'est la méthode des éléments finis, cette méthode est devenue pratique pour résoudre des problèmes d'ingénierie seulement au cours des 60 dernières années.

Nous allons dans ce sous chapitre présenter les méthodes d'éléments finis les plus simples, on se focalisant sur les matrices de raideurs et de masses pour les barres, poutre et portique.

II.1.2 Généralité sur les méthodes des éléments finis

Les éléments finis font maintenant partie des outils couramment utilisés pour la conception et l'analyse des produits industriels. Les outils d'aide à la modélisation devenant de plus en plus perfectionnés, l'utilisation de la méthode des éléments finis s'est largement développée et peut sembler de moins en moins une affaire de spécialistes. Si l'utilisation de la méthode se démocratise de par la simplicité croissante de mise en œuvre, la fiabilité des algorithmes et la robustesse de la méthode, il reste néanmoins des questions essentielles auxquelles l'ingénieur devra répondre s'il veut effectuer une analyse par éléments finis dans de bonnes conditions.

Ce processus de modélisation d'un corps en le divisant en un système équivalent de plus petits corps d'unités (éléments finis) interconnectés en des points communs à deux ou plusieurs éléments (points nodaux ou nœuds) et/ou lignes limites et/ou surfaces est appelé discrétisation.

- Formaliser les non-dits et les réflexions qui justifient les choix explicites ou implicites de son analyse du problème ;
- Evaluer la confiance qu'il accorde aux résultats ;
- Analyser les conséquences de ces résultats par rapport aux objectifs visés[42].

II.1.3 Démarches de la méthode des éléments finis

Pour la construction d'un modèle éléments finis on doit passer par ces principales étapes :

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème
- Assemblage des matrices élémentaires
- Prise en compte des conditions aux limites
- Résolution du système d'équations

II.1.3.1 Discrétisation géométrique

Discrétisation géométrique ou bien maillage c'est une étape qui consiste à découper et diviser un milieu continue en sous domaine.

$$D = \sum_{e=1}^n D^e \quad (1.1.1)$$

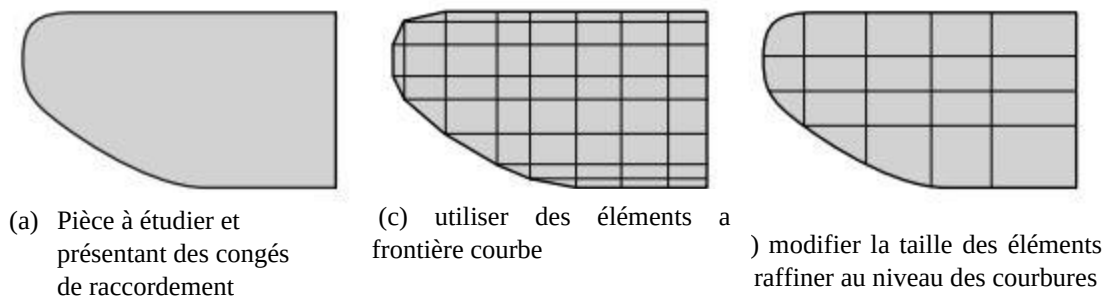


Figure II-1: Discrétisation géométrique.

$$Da \ll Db \ll Dc \quad (1.1.2)$$

Lors du maillage il faut vérifier que :

- il ne y'a pas de vides entres les vides.
- il n y'a pas de chevauchement entres les éléments.
- le maillage de frontière complexe nécessite un raffinement de maillage la qualité de la solution de l'élément finis dépend du maillage, plus que on se rapproche de la solution exacte plus le maillage est plus raffiner, ce qui alourdi le temps de calcule.

II.1.3.2 Approximation nodale

Dans le cadre de la MEF on adopte une approximation sur chaque élément qui ne dépend que des nœuds, on parle de représentation nodale de l'approximation ou plus simplement d'approximation nodale.

Aussi on peut dire que l'approximation par éléments finis est une approximation nodale par sous domaines ne faisant intervenir que les variables nodales du domaine élémentaire D_e .

Soit M point de l'élément D.

$$u(M) = N \cdot u_n \varepsilon \quad (1.1.3)$$

$u(M)$: Représente la valeur de la fonction approchée en tout point M de l'élément.

N : La matrice ligne des fonctions d'interpolation de l'élément.

u_n : Variables nodales relatives aux nœuds d'interpolation de l'élément

(a) Approximation nodale de quelques éléments de référence :

Chaque élément de forme géométrique simple est considéré comme élément de référence avec des frontières rectilignes, Le passage de l'élément de référence à l'élément réel sera réalisé par une transformation géométrique. Nous entendons par élément réel, un élément quelconque du domaine discrétisé.

Deux grandes familles d'éléments sont souvent présentées :

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

Type Lagrange : on augmente le nombre de nœuds en conservant une seule variable nodale.

Type Hermite : on augmente le nombre de variables nodales, en retenant par exemple les valeurs des dérivées du champ aux nœuds.

- Élément a une dimension :

Soit l'élément illustré dans la figure considérer comme élément de référence

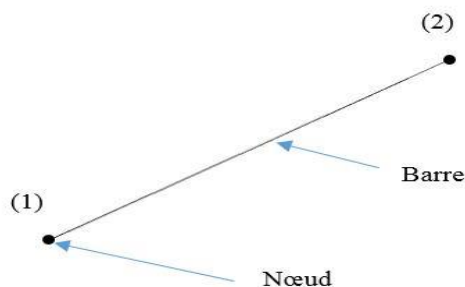


Figure II-2:élément de référence barre à deux DDL.

$$u_n = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad \text{Et} \quad \vec{u} = N_1 u_1 + N_2 u_2 \quad N_1 = a_1 x + b_1$$

$$N_2 = a_2 x + b_2$$

Avec l'application des conditions aux limites aux nœuds :

Dans le nœud (1) $\vec{u} = u_1 \quad u_1 = 1 \quad u_2 = 0$

Dans le nœud (2) $\vec{u} = u_2 \quad u_1 = 0 \quad u_2 = 1$
après calcul on obtient les approximations nodaux suivantes :

$$N_1 = 1 - \frac{x}{L}$$

$$N_2 = \frac{x}{L}$$

$$\text{Donc } \vec{u} = \left\langle 1 - \frac{x}{L} \mid \frac{x}{L} \right\rangle$$

Quelques formes d'approximation aux

Éléments à une dimension

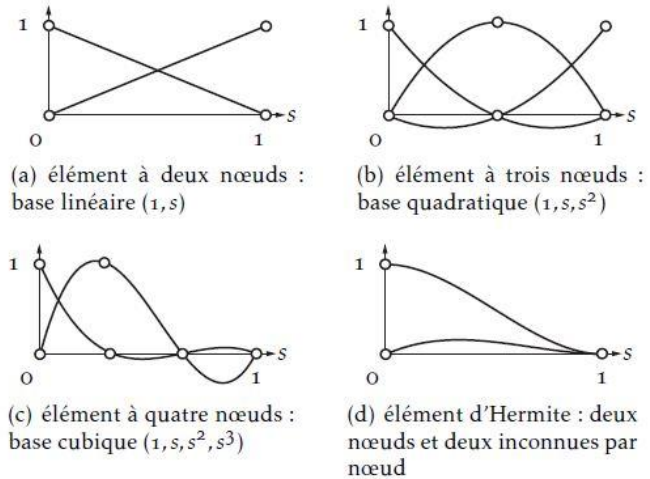


Figure II-3: Fonctions de forme à une dimension

Pour l'élément (a) : $N_1(s) = L_1 = 1 - s$

$$N_2(s) = L_2 = s$$

Pour l'élément (b) : $N_1(s) = L_1(2L_1 - 1) \quad ; \quad N_2(s) = 4L_1L_2 \quad ; \quad N_3(s) = L_2(2L_2 - 1)$

Pour l'élément (c) :

- $N_1(s) = \frac{L_1}{2} (3L_1 - 1)(3L_1 - 2)$
- $N_2(s) = \frac{9}{2} (3L_1 - 1)L_1L_2$
- $N_3(s) = \frac{9}{2} L_2L_1(3L_2 - 1)$
- $N_4(s) = \frac{L_2}{2} (3L_2 - 1)(3L_2 - 2)$

Pour l'élément (b) :

- $N_1(s) = 1 - 3S^2 + 2S^3$
- $N_2(s) = S - 2S^2 + S^3$
- $N_3(s) = 3S^2 + 2S^3$
- $N_4(s) = 2S^2 + S^3$

II.1.4 Relation entre déformation et déplacement :

La relation s'exprime de la manière suivante :

$$\{\varepsilon\} = BU^e \quad (1.1.4)$$

Il s'agit ici de trouver la matrice B reliant les déformations ε de l'élément à ses déplacements nodaux U^e [42].

II.1.5 Relation entre contraintes et déformations

La relation contrainte et déformation est de cette façon :

$$\{\sigma\} = D\{\varepsilon\} \quad (1.1.5)$$

Le matériaux élastique et linéaire, Ou D est une matrice carrée symétrique dont les termes dépendent des caractéristiques mécaniques des matériaux, en général le module de Young E et le coefficient de poisson ν [42].

II.1.6 L'énergie de déformation :

L'expression générale de l'énergie de déformation d'un élément s'écrit comme suit :

$$U = \frac{1}{2} \cdot \int_{\tau} \varepsilon \sigma d\sigma \quad (1.1.6)$$

On sait que la formule du déplacement nodale est comme suite

$$U(x, y, z) = N^t U^e \quad (1.1.7)$$

Après dérivation de cette équation on obtient la formule suivante :

$$\{\varepsilon\} = B U^e \quad (1.1.8)$$

On remplace les équations (1.1.8) dans (1.1.6) on obtient

$$U = \frac{1}{2} \cdot \int (B U^e)^t \cdot D \cdot B U^e d\tau \quad (1.1.9)$$

$$U = \frac{1}{2} \cdot \{U^e\}^t \cdot \int B^t \cdot D \cdot B d\tau \cdot [U^e] \quad (1.1.10)$$

$$U = \frac{1}{2} \{U^e\}^t \cdot K_e \cdot [U^e] \quad (1.1.11)$$

$$K_e = \int B^t \cdot D \cdot B d\tau \quad (1.1.12)$$

K_e : Matrice de rigidité.

II.1.7 Les matrices de rigidité élémentaire

1. Matrice de rigidité pour une barre 1D

Soit un élément de barre qui ne travaille qu'en traction compression qui signifie l'effort se transmet l'effort de la manière indiqué dans la figure I-4, soit les nœuds nommé i et j positionner aux extrémités de l'élément distant d'une longueur L , L'axe local x est pris dans la direction axiale de l'élément dont l'origine se situe au nœud i . Dans le système de coordonnées locales, il n'y a qu'un seul degré de liberté (ddl) à chaque nœud de l'élément, c'est-à-dire le déplacement axial. Par conséquent, il existe au total deux ddl pour l'élément, c'est-à-dire : $Nbr\ ddl = 2$.

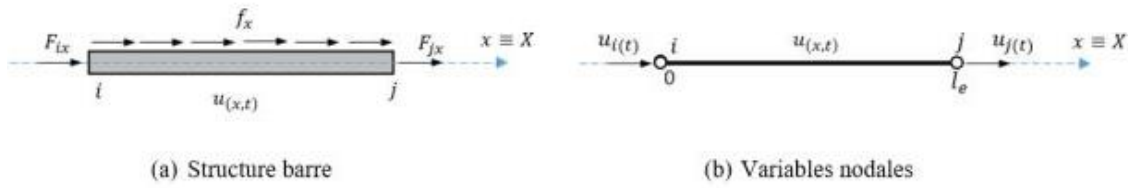


Figure II-4:: Approximation nodale d'une barre de deux DDL.

Les hypothèses qu'on peut prendre en considération

- Petits déplacements.
- Petites déformations.
- Section droite avant déformation reste droite après déformation.
- Milieu isotope homogène élastique.

Formules acquises dès les modules de MMC et de RDM:

Relation déplacement-déformation : $\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} = u_x$ et $\sigma_{xx} = E\varepsilon_{xx}$

$$u(x) = q_1 + (q_2 - q_1) \frac{x}{l} \quad (1.1.13)$$

Avec :

$$\{u(x)\} = [N] \vec{q}^e \quad (1.1.14)$$

$$[N] = \left[\left(1 - \frac{x}{l}\right) \quad \frac{x}{l} \right] \quad (1.1.15)$$

$$\vec{q}^e = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} \quad (1.1.16)$$

Soit q_2 et q_1 les degrés de liberté des nœuds en coordonnées local.

$$\text{Donc } \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u(x)}{\partial x} = \frac{q_1 - q_2}{l}$$

$$\text{Soit } [B_x] = [L_x][N_x] = \frac{d}{dx} \left[\left(1 - \frac{x}{l}\right) \quad \frac{x}{l} \right] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{l} & \frac{1}{l} \end{bmatrix}$$

$$[K^e] = \iiint_{V^e} [B]^T [D] [B] dV = A \int_{x=0}^l \left\{ \begin{bmatrix} -1/l \\ 1/l \end{bmatrix} \right\}^T E \left\{ \begin{bmatrix} -1/l \\ 1/l \end{bmatrix} \right\} = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.1.17)$$

$$[K_e] = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.1.18)$$

2. Matrice de rigidité pour une barre a 2D

Soit i et j deux nœuds dans un élément avec des déplacements respectivement u_i et u_j dans le système de coordonnées $x y z$ les déplacements de ces nœuds sont représentés comme suite dans la figure 5

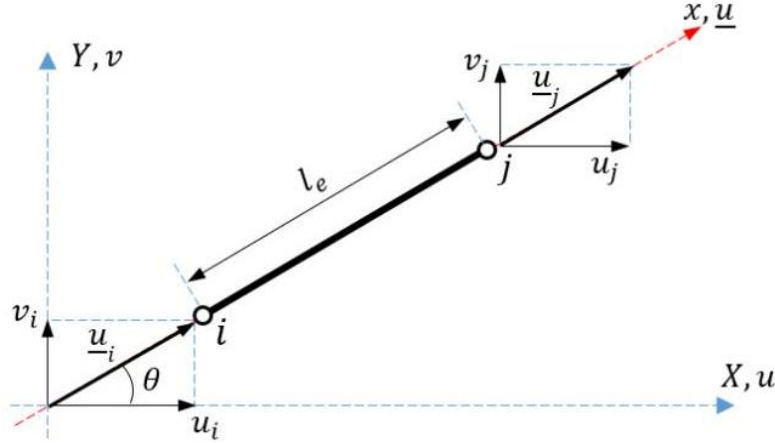


Figure II-5:élément de référence barre 2D dans le système des coordonnées globales.

$$u_i = (u_i \cos \theta + v_i \sin \theta)$$

$$u_j = u_j \cos \theta + v_j \sin \theta$$

Soit la forme matricielle comme suite

$$\begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \end{Bmatrix} \quad (1.1.19)$$

D'une autre forme

$$\{u_e\} = [T]\{u_e\} \quad (1.1.20)$$

Soit [T] une matrice de passage d'un système de coordonnées locales au système de coordonnées globale $[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix}$

On pose :

$$l_{ij} = \cos \theta = \cos(x, X) = \frac{X_j - X_i}{l} \quad (1.1.21)$$

$$m_{ij} = \sin \theta = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \frac{Y_j - Y_i}{l} \quad (1.1.21)$$

$$l = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2} \quad (1.1.22)$$

l_{ij} désigne le cosinus directeur entre la ligne ij et la direction globale X.
 m_{ij} Désigne le cosinus directeur entre la ligne ij et la direction globale Y.

(X_j, X_i) et (Y_j, Y_i) sont, respectivement, les coordonnées globales des nœuds i et j . l est la longueur de l'élément ij . La matrice élémentaire de raideur $[K_e]$ dans le système de coordonnées globales est donnée comme suit :

$$[K] = [T]^t [K_e] [T] = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} l_{ij}^2 & l_{ij}m_{ij} & -l_{ij}^2 & -l_{ij}m_{ij} \\ l_{ij}m_{ij} & m_{ij}^2 & -l_{ij}m_{ij} & -m_{ij}^2 \\ -l_{ij}^2 & -l_{ij}m_{ij} & l_{ij}^2 & l_{ij}m_{ij} \\ -l_{ij}m_{ij} & -m_{ij}^2 & l_{ij}m_{ij} & m_{ij}^2 \end{bmatrix} \quad (1.1.23)$$

Pour calculer la matrice élémentaire $[K_e]$ d'un élément barre bidimensionnel possédant un seul degré de liberté dans le repère local et deux dans le repère global, on doit, pour envisager ce changement de base, exprimer la matrice élémentaire de raideur $[K_e]$ établie en dans le cas de 1D sous forme d'une matrice 4×4 . Pour ce faire, on reprend l'expression de $[K_e]$ on rajoute deux lignes et deux colonnes de zéros associées aux déplacements v_i et v_j

$$[K_e] = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \end{Bmatrix} \quad (1.1.24)$$

3. Matrice de rigidité pour une barre a 3D

Le déplacement local d'un nœud dans l'espace devrait comporter trois composantes dans les directions globales X , Y et Z . Par exemple, le déplacement local u_i du $i^{ème}$ nœud aura trois composantes désignés par u_i, v_i et w_i [43] comme le montre la figure 6.

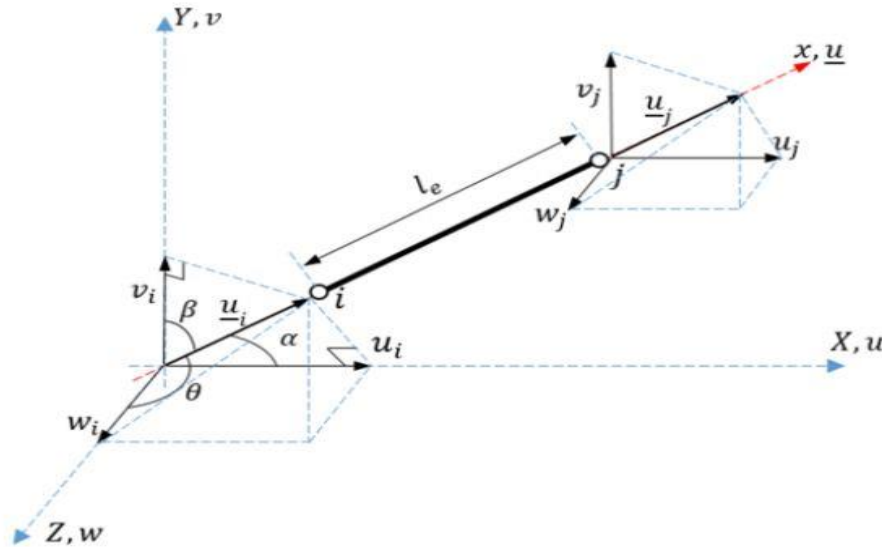


Figure II-6:élément de référence barre 2D dans le système des coordonnées globales.

De la même façon que le cas qui précède celui du 2D le vecteur de déplacements locaux est donné

$$\{u_e\} = [T] \{u_e\} \quad \text{suite :} \quad (1.1.25)$$

$$\{u_e\}_t = \{u_i v_i w_i u_j v_j w_j\} \quad (1.1.26)$$

Soit $[T]$ matrice de passage pour les treillis $[T] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix}$

Soit

$$l_{ij} = \cos\alpha = \cos(x, X) = \frac{X_j - X_i}{l} \quad (1.126)$$

$$m_{ij} = \cos\beta = \cos(x, Y) = \frac{Y_j - Y_i}{l} \quad (1.127)$$

$$n_{ij} = \cos\theta = \cos(x, Z) = \frac{Z_j - Z_i}{l} \quad (1.128)$$

Et

$$l = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2} \quad (1.129)$$

La matrice élémentaire de raideur dans le système de coordonnées globales pour les éléments de barres tridimensionnels est donnée comme suit :

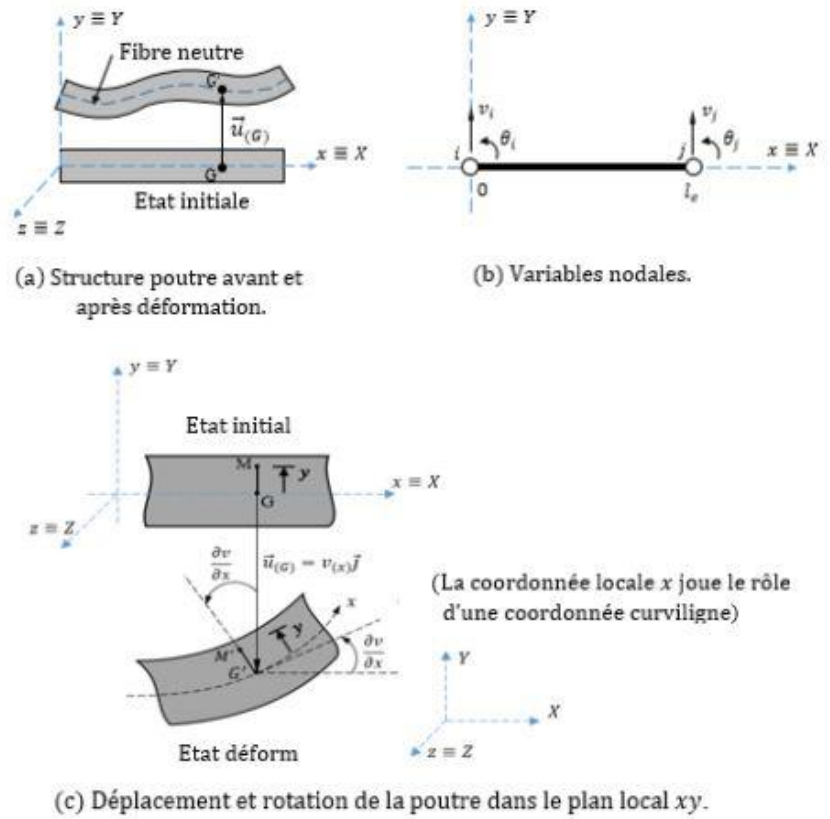
$$[K_e] = [T]^t [K_e] [T] \quad (1.130)$$

$$[K_e] = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} l_{ij}^2 & l_{ij}m_{ij} & l_{ij}n_{ij} & -l_{ij}^2 & -l_{ij}m_{ij} & -l_{ij}n_{ij} \\ l_{ij}m_{ij} & m_{ij}^2 & m_{ij}n_{ij} & -l_{ij}m_{ij} & -m_{ij}^2 & -m_{ij}n_{ij} \\ l_{ij}n_{ij} & m_{ij}n_{ij} & n_{ij}^2 & -l_{ij}n_{ij} & -m_{ij}n_{ij} & -n_{ij}^2 \\ -l_{ij}^2 & -l_{ij}m_{ij} & -l_{ij}n_{ij} & l_{ij}^2 & l_{ij}m_{ij} & l_{ij}n_{ij} \\ -l_{ij}m_{ij} & -m_{ij}^2 & -m_{ij}n_{ij} & l_{ij}m_{ij} & m_{ij}^2 & m_{ij}n_{ij} \\ -l_{ij}n_{ij} & -m_{ij}n_{ij} & -n_{ij}^2 & l_{ij}n_{ij} & m_{ij}n_{ij} & n_{ij}^2 \end{bmatrix} \quad (1.131)$$

4. Matrice de rigidité pour une poutre 2D

Soit une poutre plane sollicitée dans son plan moyen et ne travaillant qu'en flexion dans le plan global (XY) supposé initialement confondu avec le plan local (xy)

Les variables nodales qui sont les déplacements nodaux transversaux $v_{i(t)}$ et $v_{j(t)}$ et les rotations au niveau des nœuds $\theta_{i(t)}$ et $\theta_{j(t)}$ donc les approximations sont de forme polynomiale cubique à quatre paramètres d'approximation $a_{1(t)}$, $a_{2(t)}$, $a_{3(t)}$ et $a_{4(t)}$



Donc :

Figure II-7: Déformation d'un élément poutre sur le plan xy

$$v_{(x,t)} = a_{1(t)} + a_{2(t)}x + a_{3(t)}x^2 + a_{4(t)}x^3 \quad (1.1.32)$$

D'une représentation vectorielle

$$v_{(x,t)} = \langle 1|x|x^2|x^3 \rangle \begin{Bmatrix} a_{1(t)} \\ a_{2(t)} \\ a_{3(t)} \\ a_{4(t)} \end{Bmatrix} \quad (1.1.33)$$

Pour la détermination de ces fonctions de forme on applique les conditions aux limites ce qui nous mène vers les fonctions suivantes

$$\begin{aligned} N_1(x) &= \frac{2x^3 - 3lx^2 + l^3}{l^3} & N_2(x) &= \frac{x^3 - 2lx^2 + l^2x}{l^2} \\ N_3(x) &= -\frac{2x^3 - 3lx^2}{l^3} & N_4(x) &= \frac{x^3 - lx^2}{l^2} \end{aligned}$$

$$v_{(x,t)} = \left\langle \frac{2x^3 - 3lx^2 + l^3}{l^3} \mid \frac{x^3 - 2lx^2 + l^2x}{l^2} \mid -\frac{2x^3 - 3lx^2}{l^3} \mid \frac{x^3 - lx^2}{l^2} \right\rangle \begin{Bmatrix} v_{i(t)} \\ \theta_{i(t)} \\ v_{j(t)} \\ \theta_{j(t)} \end{Bmatrix} \quad (1.1.34)$$

- **Approximation des déformations :**

On sait que la déformation axiale des fibres de la poutre est donnée comme suite

$$\varepsilon_{xx} = -y \frac{\partial^2 v(x)}{\partial x^2} = -y \frac{\partial^2 [N(x)]}{\partial x^2} \{v_e(t)\} = [B(x)] \{v_e(t)\} \quad (1.1.35)$$

$$[B(x)] = \frac{\partial [B(x)]}{\partial x} = \frac{\partial^2 [N(x)]}{\partial x^2} \quad (1.1.36)$$

$$[B(x)] = -\frac{y}{l^3} \begin{bmatrix} (12x - 6l) & l(6x - 4l) & -(12x - 6l) & l(6x - 2l) \end{bmatrix} \quad (1.1.37)$$

D'où la matrice de rigidité :

$$[K^e] = \iiint_{V^e} [B(x)]^T [D_{(M)}] [B] dv_e = E \int_{x=0}^l \left(\int_{S_e} dS_e \right) [B(x)]^T [B(x)] dx \quad (1.1.38)$$

$$[K^e] = \frac{E}{l^6} \int_{S_e} y^2 dS_e \int_{x=0}^l \begin{Bmatrix} (12x - 6l) \\ l(6x - 4l) \\ -(12x - 6l) \\ l(6x - 2l) \end{Bmatrix} \{ (12x - 6l) \quad l(6x - 4l) \quad -(12x - 6l) \quad l(6x - 2l) \} dx \quad (1.1.39)$$

Après intégration on obtient la matrice de raideur suivante

$$[K_e] = \frac{EI_{zz}}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (1.1.40)$$

Où I_{zz} représente le moment d'inertie de la section droit

- **Pour le repère global :**

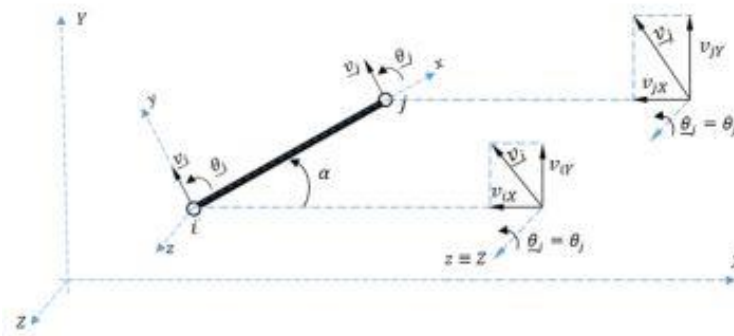


Figure II-8:élément de référence poutre dans le plan (xy) et global (XY).

Le vecteur $v_e(t)$ représente les variables nodales dans le plan (xy)s'exprime dans le repère global(XY) comme suite :

$$\begin{Bmatrix} v_i \\ \theta_i \\ v_j \\ \theta_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{ij} & m_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_{ij} & m_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_{ix} \\ v_{iy} \\ \theta_i \\ v_{jx} \\ v_{jy} \\ \theta_j \end{Bmatrix} \quad (1.1.41)$$

D'où

$$\{\underline{v}_{e(t)}\} = [T]\{v_{e(t)}\} \quad (1.1.42)$$

Avec :

$$[T] = \begin{bmatrix} l_{ij} & m_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_{ij} & m_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.1.43)$$

$$l_{ij} = \cos(y, X) = \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) = \frac{Y_j - Y_i}{l} \quad (1.1.44)$$

$$m_{ij} = \cos(y, Y) = \cos(\alpha) = \frac{X_j - X_i}{l} \quad (1.1.45)$$

Et

$$l = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2} \quad (1.1.46)$$

α Représente l'angle entre l'axe local x et globale X .

Sauf que les deux axes z et Z sont confondues les rotations $\underbrace{(\theta_i \theta_j)}_{(xy)} de z$ et $\underbrace{(\theta_i \theta_j)}_{(XY)} de Z$ sont les même ce qui produit l'apparition de (1) dans la matrice de passage [T]

Donc la matrice de rigidité est définie comme suite

$$[K_e] = [T]^t [K_e] [T] \quad (1.1.47)$$

$$[K_e] = \begin{bmatrix} 12l^2_{ij} & 12l_{ij}m_{ij} & 6l.l_{ij} & -12l^2_{ij} & -12l_{ij}m_{ij} & 6l.l_{ij} \\ 12l_{ij}m_{ij} & 12m^2_{ij} & 6lm_{ij} & -12l_{ij}m_{ij} & -12m^2_{ij} & 6lm_{ij} \\ 6l.l_{ij} & 6lm_{ij} & 4l^2 & -6l.l_{ij} & 6lm_{ij} & 2l^2 \\ -12l^2_{ij} & -12l_{ij}m_{ij} & -6l.l_{ij} & 12l^2_{ij} & 12l_{ij}m_{ij} & -6l.l_{ij} \\ -12l_{ij}m_{ij} & -12m^2_{ij} & 6lm_{ij} & 12l_{ij}m_{ij} & 12m^2_{ij} & -6lm_{ij} \\ 6l.l_{ij} & 6l.m_{ij} & 2l^2 & -6l.l_{ij} & -6l.m_{ij} & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (1.1.48)$$

5. Matrice de rigidité pour un portique 3D

Soit un élément portique 3D cela signifie que c'est un élément barre droite de section constante soumis à des forces axiales, et moments fléchissant autour des axes principaux du plan de sa section droite, moment de torsion sur son axe de centre de gravité.

- Déplacements axiaux :

Comme indiqué dans la figure I-9 Un modèle de déplacement linéaire nous conduit à la matrice de rigidité (du déplacement axial) suivante :

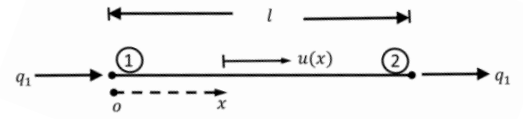
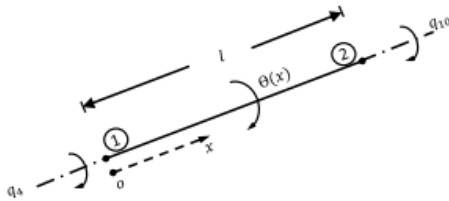


Figure II-9: Déplacements axiaux.

$$[K_{Fa}^e] = \iiint_{V^e} [B]^T [D] [B] dV = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.1.49)$$

Où A ; E , et λ , respectivement, surface de la section, module de Young et longueur de l'élément, et $[K_{Fa}^e]$ représente la matrice de rigidité résultante de la force axiale.

- Déplacements de torsion



Supposant que y'a une variation constante des déplacements et de torsion ainsi l'angle de torsion.

Figure II-10: Déplacements de torsion.

$$\theta(x) = [N] \bar{q}_t \quad (1.1.50)$$

$$[N] = \left[\left(1 - \frac{x}{l}\right) \quad \left(\frac{x}{l}\right) \right] \quad (1.1.51)$$

$$\bar{q}_t = \begin{bmatrix} q_4 \\ q_{10} \end{bmatrix} \quad (1.1.52)$$

Soit la section droite de l'élément est circulaire d'où la contrainte de cisaillement est formulée de la manière suivante

$$\varepsilon_{\theta x} = r \frac{d\theta}{dx} \quad (1.1.53)$$

L'espace de la fibre par rapport à l'axe canroïde de l'élément est représenté par r . Ainsi, la relation contrainte-déplacement s'écrit :

$$\vec{\varepsilon} = [B] \bar{q}_t \vec{\varepsilon} = \{\varepsilon_{\theta x}\} \text{ et } [B] = \left\{ -\frac{r}{l} \quad \frac{r}{l} \right\} \quad (1.1.54)$$

Et d'après la relation contrainte déformation et la loi de Hooke

$$\vec{\sigma} = [D] \vec{\varepsilon} \quad , \quad \vec{\sigma} = \{\sigma_{\theta x}\} ; [D] = [G] \quad (1.1.55)$$

$[G]$ représente le module de cisaillement du matériau

La matrice de rigidité de torsion est comme suite :

$$[K_t^e] = \iiint_{V^e} [B]^T [D] [B] dV \quad (1.1.56)$$

$$G \int_{x=0}^1 dx \iint A r^2 dA \begin{bmatrix} -\frac{1}{l} \\ \frac{1}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{l} & \frac{1}{l} \end{bmatrix} \quad (1.1.57)$$

On sait que $J = \iint_A r^2 dA$: le moment d'inertie polaire de la section droite.

$$[K_t^e] = \frac{GJ}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.1.58)$$

- **Déplacement de flexion sur le plan xy :**

La matrice de raideur pour une flexion sur le plan xy s'écrit comme suit :

$$[K_{xy}^e] = \frac{EI_{zz}}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (1.1.59)$$

$I_{zz} = \iint_A y^2$ Représente le moment d'inertie de la section droite de l'élément par rapport à l'axe z.

- **Déplacement de flexion sur le plan xz :**

La flexion des éléments se fait sur le plan $\xi\zeta$ au lieu du plan $\xi\eta$, ainsi, il sera question des quatre degrés de liberté :

$$[K_{xz}^e] = \frac{EI_{yy}}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (1.1.60)$$

Ou I_{yy} : le moment d'inertie de la section droite de l'élément par rapport a l'axe y

- **Assemblage pour l'obtention de la matrice de raideur globale :**

Les matrices de rigidité issues des différents déplacements sont maintenant assemblées (par superposition) afin d'obtenir la matrice globale de l'élément.

$$[K^e] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_{zz}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_{zz}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12EI_{yy}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_{yy}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-6EI_{yy}}{l^2} & 0 & \frac{4EI_{yy}}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_{yy}}{l^2} & 0 & \frac{4EI_{yy}}{l} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_{zz}}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_{zz}}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_{zz}}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_{zz}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{-6EI_{zz}}{l^2} & 0 & \frac{12EI_{zz}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-12EI_{yy}}{l^3} & 0 & \frac{6EI_{yy}}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_{yy}}{l^3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-6EI_{yy}}{l^2} & 0 & \frac{2EI_{yy}}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_{yy}}{l^2} & 0 & \frac{4EI_{yy}}{l} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_{zz}}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_{zz}}{l} & 0 & \frac{-6EI_{zz}}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_{zz}}{l} \end{bmatrix} \quad \text{Symétrique} \quad (1.1.61)$$

II.2 Dynamique Des Structures :

II.2.1 Introduction :

L'étude dynamique d'une structure a pour but essentiel de caractériser les déplacements, les déformations et les contraintes qui règnent au sein de cette structure et qui résultent d'un chargement thermomécanique quelconque. En effet, dans de nombreux secteurs industriels, il est primordial de déterminer, pour le dimensionnement et la conception, les niveaux d'efforts que les structures peuvent soutenir, mais également les propriétés amortissantes qu'elles peuvent développer.

Dans cette partie, la problématique du comportement dynamique des solides et structures est présentée. A travers l'exemple de l'oscillateur élémentaire, on peut illustrer les grands types de réponses (sur-amorti, critique, sous-amorti) dynamiques d'un système soumis à des excitations variées (impulsionnelle, régime force).

II.2.2 Définition :

Dans le contexte de la mécanique des structures, la dynamique est la branche qui concerne l'étude des oscillations des structures soumises à diverses sollicitations en général et aux séismes en particulier. En bref, par rapport à la statique familière aux ingénieurs du génie civil, la dynamique fait intervenir un paramètre supplémentaire : le temps. Les bases théoriques de la

dynamique proviennent de la physique générale. Par conséquent, il s'agit d'une matière plutôt théorique dont les développements requièrent quelques notions mathématiques, notamment de calcul matriciel pour traiter les systèmes à plus d'un degré de liberté.

- Aéronautique confort acoustique, vibrations aérodynamiques, vibrations propulseurs.
- Ferroviaire confort acoustique, chocs de roulement.
- Automobile confort habitacle, fréquences propres boîtes de vitesse, crash (dynamique rapide).
- Dans le secteur du génie civil (séismes, explosions, propagations dynamiques d'ondes, ...).

II.2.3 Rappel sur la dynamique des structure

II.2.3.2 Système a un degré de liberté :

Un système fermé sans dissipation et sans sollicitation extérieure ne peut être le siège que d'oscillations propres. Si le mouvement est périodique, il existe autant de fréquences propres que de degré de liberté.

- Il peut être nécessaire de linéariser l'équation différentielle pour la résoudre comme par exemple le cas du pendule double.
- D'un point de vue énergétique, dans un système fermé il y a transfert d'énergie potentielle en énergie cinétique et inversement. C'est le fondement de la mécanique vibratoire.

II.2.3.3 Mise en équation du système :

Afin d'illustrer les oscillations libres d'un système quelconque, on considère dans cette introduction le cas du comportement dynamique d'une masse suspendue à un ressort. On suppose que dans ce système les efforts s'appliquent au centre de gravité G de la masse, et que seul le mouvement dans la direction $\vec{x}$ est possible.

II.2.3.4 Principe fondamental de la dynamique :

En appliquant le Principe fondamental de la dynamique (PFD) à la masse qu'on isole, on obtient les efforts appliqués au centre de gravité G ;

$$\vec{F}_r = -k(l - l_0 + u)\vec{x} \quad (1.2.1)$$

$$\vec{P} = mg\vec{x} \quad (1.2.2)$$

$$m\vec{\gamma}_G(t) = \ddot{a}\vec{x} \quad (1.2.3)$$

Où l_0 est la longueur initiale du ressort G_0 , l la longueur à l'équilibre statique, et $u(t)$ mesure l'écart de position par rapport cet équilibre. K est la raideur du ressort, m est la masse

et $\gamma_G(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$ est l'accélération subie en G_0 . On peut alors écrire le PFD qui va interpréter l'équilibre des efforts intérieurs et extérieurs du système lorsqu'il est en mouvement. C'est une relation complémentaire caractérisant l'équilibre statique à l'état initial du système lorsque la masse est ajoutée au ressort (), on suppose les conditions homogènes pour $t = t_0$, $x(t = t_0) = 0$, $\dot{x}(t = t_0) = 0$

$$-k(l - l_0 + x) + mg = m\ddot{x} \quad (1.2.4)$$

$$-k(l - l_0) + mg = 0 \quad (1.2.5)$$

L'équilibre statique étant réalisé, l'équilibre dynamique du système masse-ressort est caractérisé par l'écart à cet équilibre pour tout instant t ultérieur à t_0 grâce à l'équation du PFD :

$$m\ddot{x} + kx(t) = 0 \quad (1.2.6)$$

En se plaçant dans un repère galiléen (R_0), en tous points d'un solide (S) on a l'égalité entre le torseur des actions extérieures $\tau_{\text{ext}} \rightarrow S$ et le torseur des quantités d'accélération galiléennes ou absolues D_S^a . Si l'équilibre est considéré en un point fixe par rapport au repère du mouvement (R_0) et le contenu du système (S) est invariable, le torseur des actions dynamiques D_S^a est directement égal à la dérivée par rapport au temps du torseur cinétique.

On a alors 2 équations vectorielles appelées **Théorème de la quantité de mouvement** pour les résultantes et **Théorème du moment cinétique** pour les moments.

La réponse vibratoire du système masse-ressort est la solution $u(t)$ de l'équation différentielle, dans le cas où : $x(t = t_0) = 0$, $\dot{x}(t = t_0) = 0$

$$u(t) = \frac{\dot{u}_0}{\omega_p} \sin \omega_p(t) \quad (1.2.7)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{k}{m}} = 2\pi f \quad (1.2.8)$$

Avec :

- $\dot{u}_0$ La vitesse initiale à $t = 0$
- ω_p La pulsation propre du système
- f La fréquence propre

II.2.3.5 Méthode énergétique :

D'un point de vue énergétique, le théorème de l'énergie cinétique traduit pour un système fermé et la conservation lorsque le système est sollicité. En appliquant à la masse m entre 2 états $t=0$ et t , ou de manière équivalente entre $x_0=0$ et $x(t)$ quelconque, les mêmes équations d'équilibre sont formulées :

$$\dot{O}w_{\text{int}} + \dot{O}w_{\text{ext}} = \delta_0^x T \quad (1.2.9)$$

Où $\dot{O}w_{\text{int}}$ et $\dot{O}w_{\text{ext}}$ sont respectivement le travail effectué, entre les instants correspondants à $x_0 = 0$ et $x(t)$, par les efforts à l'intérieur et à l'extérieur du système considéré. $\delta_0^x T$ est la variation entre les abscisses x_0 et $x(t)$ de l'énergie cinétique du système. Dans notre cas, $\dot{O}w_{\text{int}} = 0$ car la masse m est indéformable, d'où le théorème de l'énergie cinétique pour notre système masse-ressort s'écrit :

$$\int_0^x mg dx + \int_0^x -k(l - l_0 + x) dx = T_{\text{masse}}^x - T_{\text{masse}}^{x_0} \quad (1.2.10)$$

$$[mg - k(l - l_0)]u - k\frac{1}{2}x^2 = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 - \dot{x}_0^2) \quad (1.2.11)$$

$$-P_{\text{pesanteur}} - P_{\text{ressort}} = \delta_0^x T_{\text{masse}} \quad (1.2.12)$$

Par définition cette relation étant vérifiée à tout pour des conditions initiales homogènes la relation qui en découle est que $\frac{d}{dt}([mg - k(l - l_0)]u - k\frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 - \dot{x}_0^2))$ est identiquement nulle :

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (1.2.13)$$

II.2.3.6 Etude des systèmes à un degré de liberté :

Le système à un degré de liberté constitue le modèle de vibration le plus élémentaire, il constitue base de compréhension des systèmes à plusieurs degrés de liberté. La modélisation d'un tel système se fait par la caractérisation de ses éléments constitutifs qui sont : une masse m (corps rigide), un ressort k (élément élastique) et un amortisseur c (élément dissipatif). Ce modèle est appelé aussi le modèle de Voigt. Le ressort et l'amortisseur sont reliés en une extrémité à un support fixe et à l'autre à la masse. Sur la masse est exercée une force extérieure $F(t)$ dans la direction de x qui est la direction de son mouvement. Le problème consiste à déterminer la position x du solide en fonction du temps. L'équation du mouvement d'un système à un degré de liberté dans le cas général est donnée par :

$$m\ddot{x} + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (1.2.14)$$

L'équation (1.2.14) s'obtient en appliquant le principe fondamental de la dynamique ou par l'équation de Lagrange. Dans la réalité les systèmes ne sont pas parfaits, ils sont donc le siège de dissipations d'énergie. L'évolution du système est alors représentée par une courbe déplacement/temps dont l'amplitude diminue, car l'amortissement dissipe les énergies cinétique et potentielle emmagasinées dans le système à l'instant initial t_0 . Le problème ici se ramène alors à la résolution d'une équation différentielle de second ordre linéaire.

1. Système libre non amorti (conservatif) :

Le régime libre décrit le comportement d'un système, sans fourniture d'une énergie ultérieure par une force extérieure. Dans le cas d'un système conservatif l'équation du mouvement est :

$$m\ddot{x} + kx(t) = 0 \quad (1.2.15)$$

Sa solution sera de la forme :

$$x(t) = A\cos(\omega_0 t) + B\sin(\omega_0 t) \quad (1.2.16)$$

La solution (1.2.16) peut se mettre sous la forme complexe $x(t) = Ce^{\omega_0 t + \varphi}$ avec $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ est la pulsation propre du système, C, A et B sont des constantes à déterminer par le biais des conditions initiales de position et de vitesse.

2. Système libre amorti :

L'équation du mouvement de ce système est :

$$m\ddot{x} + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (1.2.17)$$

La résolution de cette équation revient à résoudre une équation différentielle homogène à coefficients constants. En divisant les termes de cette équation par m, elle deviendra :

$$\ddot{x} + 2\lambda\dot{x}(t) + \omega_0^2 = 0 \quad (1.2.18)$$

Avec $\lambda = \frac{c}{2m}$ est le coefficient d'amortissement. On définit aussi le facteur d'amortissement par

$$\xi = \frac{\lambda}{\omega_0} \quad (1.2.19)$$

La solution est de la forme :

$$x(t) = Ae^{rt} \quad (1.2.20)$$

Son équation caractéristique est :

$$r^2 + 2\lambda r + \omega_0^2 = 0 \quad (1.2.21)$$

Elle dépend de la valeur de ξ , qui peut prendre trois valeurs $\xi < 1$, $\xi = 1$ ou $\xi > 1$.

(a) Cas sous-amorti (sous-critique) : $\xi < 1$

Les racines de l'équation caractéristique sont complexes $r_{1,2} = -\xi \pm j\omega_0\sqrt{1 - \xi^2}$ et le déplacement du système est périodique. En remplaçant r_1 et r_2 par leurs valeurs dans l'équation (1.2.20) on obtient :

$$x(t) = e^{-\xi\omega_0 t} \left[A \cos(\omega_0\sqrt{1 - \xi^2}t) + B \sin(\omega_0\sqrt{1 - \xi^2}t) \right] \quad (1.2.22)$$

A et B sont à déterminer par les conditions initiales de déplacement et de vitesse.

(b) Cas sur-amorti (sur-critique) : $\xi > 1$

Dans ce cas les racines de l'équation caractéristique sont réelles :

$$r_{1,2} = -\xi \pm \omega_0 \sqrt{\xi^2 - 1} \quad (1.2.23)$$

Et le déplacement n'est plus périodique. La solution de l'équation différentielle du mouvement est :

$$X(t) = Ae^{r_1 t} + Be^{r_2 t} \quad (1.2.24)$$

Dans ce cas les racines de l'équation caractéristique sont réelles :

$$r_{1,2} = -\xi \pm \omega_0 \sqrt{\xi^2 - 1} \quad (1.2.25)$$

Et le déplacement n'est plus périodique. La solution de l'équation différentielle du mouvement est :

$$X(t) = Ae^{r_1 t} + Be^{r_2 t} \quad (1.2.26)$$

(c) Cas critique $\xi = 1$

L'équation caractéristique aura une racine double : $r_1 = r_2 = -\xi\omega = -\omega_0$

Et la solution de l'équation du mouvement aura la forme :

$$x(t) = (A_1 + A_2 t)e^{-\omega_0 t} \quad (1.2.27)$$

Les constantes A_1 et A_2 sont identifiées par le biais des conditions initiales.

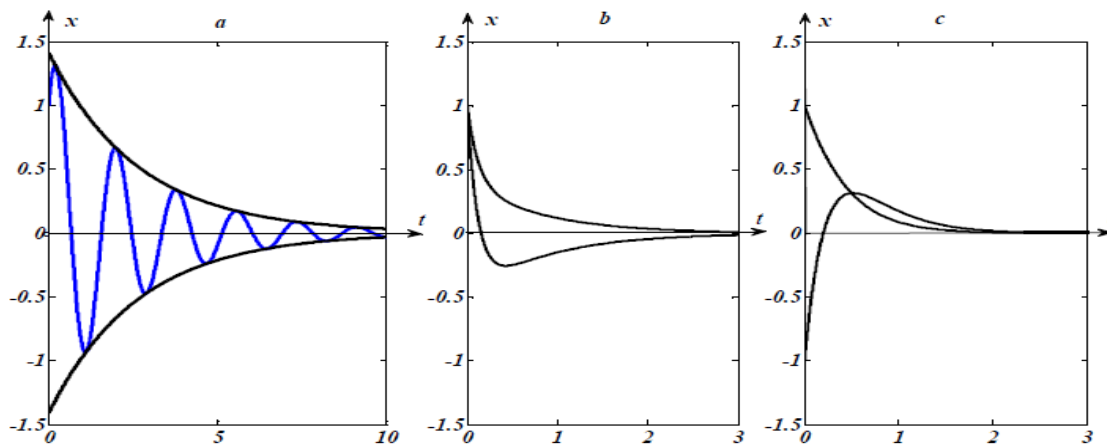


Figure II-11: Réponse typique d'un système à un degré de liberté libre amorti a): système sous amorti ; b) : système sur-amorti ; c) : système critique.

3. Système forcé amorti :

Dans ce cas le second membre de l'équation différentielle n'est pas nul. La solution générale est la somme de la solution du mouvement libre et une solution particulière de l'équation. Assez souvent nous nous intéressons qu'au mouvement en régime permanent. C'est-à-dire nous prendrons en compte que la solution particulière.

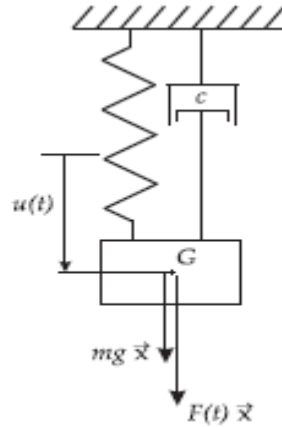


Figure II-12: système oscillateur élémentaire dissipatif : masse - amortisseur – ressort.

Prenons une force sinusoïdale appliquée à la masse m :

$$F(t) = f_0 \sin(\omega t) \quad (1.2.28)$$

ω : pulsation de la force d'excitation, D'où la solution est sous forme :

$$x(t) = x_H(t) + x_P(t) \quad (1.2.29)$$

Et comme nous avons cité en haut, nous prendrons en compte que la solution particulière ($x_P(t)$), qui est sous forme :

$$x_P(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.2.30)$$

Avec X : déphasage de la réponse par rapport à l'excitation.

Alors que :

$$\varphi = \text{atan}\left(\frac{2a\omega_0\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right) \quad (1.2.31)$$

Et :

$$A = \frac{F_0}{m} \times \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2a\omega_0\omega)^2}} \quad (1.2.32)$$

Et comme nous avons cité en haut, nous prendrons en compte que la solution particulière ($x_H(t)$), qui est sous forme :

$$x_H(t) = B \cos(\omega t - \varphi) \quad (1.2.33)$$

Et

$$B = \frac{F_0}{k} \times \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2\varepsilon\omega}{\omega_p}\right)^2}} \quad (1.2.34)$$

II.2.3.7 Etude des systèmes à plusieurs degrés de liberté

1. Analyse de vibrations libres :

L'étude des systèmes à plusieurs degrés de liberté est la généralisation de celle d'un système à un degré de liberté en faisant les analogies suivantes :

La masse m se généralise à la matrice de masse $[M]$; l'amortissement c à la matrice $[C]$; N la rigidité k à la matrice de rigidité $[K]$; le déplacement x aux vecteurs déplacements $\{x\}$ et la force F au vecteur forces $\{F\}$. Pour une structure ayant n éléments discrets, les matrices M , C et K sont données par les formules ci-dessous :

$$M = \sum_{i=1}^n M_i^{(e)} \quad C = \sum_{i=1}^n C_i^{(e)} \quad K = \sum_{i=1}^n K_i^{(e)}$$

Avec $M_i^{(e)}$, $C_i^{(e)}$ et $K_i^{(e)}$ sont respectivement, les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité de l'élément i . Elles seront développées en détails par la méthode des éléments finis dans le chapitre qui suit.

2. Réponse transitoire du système libre non amorti :

L'équation du mouvement se résume en :

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (1.2.35)$$

Par analogie au comportement d'un système à un seul degré de liberté, on suppose que la solution est harmonique ; il s'exprime sous la forme :

$$\{x(t)\} = \{X\}e^{i\omega t} \quad (1.2.36)$$

En remplaçant l'expression (1.2.36) et sa dérivée seconde dans l'équation du mouvement, on obtient :

$$[K - \omega^2 M]\{X\}e^{i\omega t} = 0 \quad (1.2.37)$$

Comme $e^{i\omega t}$ est non nul, la solution de (1.2.37) devient en simplifiant par $e^{i\omega t}$:

$$[K - \omega^2 M]\{X\} = 0 \quad (1.2.38)$$

L'équation (1.2.38) est dite problème aux valeurs propres. Son équation caractéristique est donnée par :

$$\det[K - \omega^2 M] = 0 \quad (1.2.39)$$

La solution de l'équation (1.2.39) fournit N valeurs $\omega_n^2 = 1, 2, \dots, N$ qui sont les carrés des pulsations propres du système. Pour chaque valeur propre ω_n , on résout l'équation (1.2.39) pour trouver le vecteur propre :

$$\{X^n\} = \{X_1^n \dots X_i^n \dots X_N^n\}^T \quad (1.2.40)$$

Les valeurs de ω_n^2 sont regroupées dans une matrice diagonale $[\Lambda] = \text{diag}\{\omega_1^2, \dots, \omega_n^2, \dots, \omega_N^2\}$ appelée matrice spectrale et les vecteurs propres $\{X_n\}$ sont regroupés dans une matrice : $[\Phi] = [X^1 | \dots | X^n | \dots | X^N]$ Appelée matrice modale. La donnée du couple $(\omega_n^2, \{X^n\})$ définit la *nème* solution propre de vibration du système considéré. La solution du système (1.2.39) est donnée par :

$$\{x(t)\} = [\Phi] \begin{bmatrix} \sin(\omega_1 t) & & \\ & \sin(\omega_n t) & \\ & & \sin(\omega_N t) \end{bmatrix} \{a\} + [\Phi] \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t) & & \\ & \cos(\omega_n t) & \\ & & \cos(\omega_N t) \end{bmatrix} \{b\} \quad (1.2.41)$$

Les vecteurs $\{a\}$ et $\{b\}$ sont obtenus à partir des conditions initiales sur les déplacements et les vitesses. Soient $\{x\}_0$ et $\{\dot{x}\}_0$ les conditions initiales de déplacement et de vitesse respectivement.

$$\text{Alors : } \{b\} = [\Phi]^{-1} \{x\}_0 \quad \text{et} \quad \{a\} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_1} & & \\ & \frac{1}{\omega_n} & \\ & & \frac{1}{\omega_N} \end{bmatrix} \{\dot{x}\}_0$$

3. Réponse forcée d'un système libre non amorti dans le cas d'une excitation harmonique :

L'équation du mouvement s'écrit :

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F_0\} \sin(\Omega t) \quad (1.2.42)$$

La solution particulière de l'équation (1.33) s'écrit sous la forme :

$$x(t) = \{A\} \sin(\Omega t) \quad (1.2.43)$$

On effectue le changement de base :

$$\{X(t)\} = [\Phi]\{D\} \sin(\Omega t) \quad (1.2.44)$$

Où représente le vecteur des projections modales. On remplace l'expression (1.2.44) et de son deuxième dérivé par rapport au temps dans l'équation du mouvement et on pré multiplie par $[\Phi]^T$, on obtient :

$$-\Omega^2[\Phi]^T[M][\Phi]\{D\} + [\Phi]^T[K][\Phi]\{D\} = [\Phi]^T\{F_0\} \quad (1.2.45)$$

En appliquant les propriétés d'orthogonalité de la matrice modale $[\Phi]$:

$$[\Phi]^T[M][\Phi] = [I_N] \quad \text{et} \quad [\Phi]^T[K][\Phi] = [\Lambda]$$

L'équation (1.2.45) deviendra alors :

$$[\Lambda - \Omega^2]\{D\} = [\Phi]^T\{F_0\} \quad (1.2.46)$$

On tire l'expression de D comme suit :

$$\{D\} = [\Lambda - \Omega^2]^{-1}[\Phi]^T\{F_0\} \quad (1.2.47)$$

Finalement, la solution de l'équation (1.2.47) est :

$$\{x(t)\} = [\Phi][\Lambda - \Omega^2]^{-1}[\Phi]^T\{F_0\} \sin(\Omega t) \quad (1.2.48)$$

Cette méthode de résolution est appelée « la méthode de la transformée modale ».

II.2.3.8 Matrices de masse, raideur et amortissement

Puisque dans plusieurs méthodes nous devons utiliser les équations de Lagrange, nous déterminons d'abord les expressions de l'énergie cinétique T, de celle de déformation U, et l'expression de la fonction de dissipation de Rayleigh R, qui seront utilisées dans ces équations.

Soit $x_n = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ est le vecteur de déplacement et $F_n(t) = \{F_1(t), F_2(t), \dots, F_n(t)\}$ le vecteur des forces extérieures.

1. Matrice masse dans le système de coordonnées global :

Pour réduire l'effort de calcul, généralement les matrices de masses cohérentes des éléments qui ne sont pas assemblée sont dérivées dans des systèmes de coordonnées locales appropriées et sont ensuite transformées en système global pour la structure assemblée. Si $[\mathbf{m}^e]$, $\vec{x}$ et $\dot{\vec{x}}$ désignent la matrice de masse, le vecteur de déplacement nodal et le vecteur de vitesse nodal dans la coordonnée locale, l'énergie cinétique du mouvement de l'élément est exprimée comme suite :

$$T = \frac{1}{2} m^e (\dot{\vec{x}}^e)^2 \quad (1.2.49)$$

$$T = \frac{1}{2} \{\dot{\vec{x}}^e\}^T [m^e] \{\dot{\vec{x}}^e\} \quad (1.2.50)$$

Si les déplacements nodaux et les vitesses nodales des éléments sont indiqués par les lettres $\vec{X}^e$ et $\dot{\vec{X}}^e$ dans le système global, nous avons les relations de transformations suivantes :

$$\vec{x}^e = [\lambda] \vec{X}^e \quad (1.2.51)$$

$$\dot{\vec{x}}^e = [\lambda] \dot{\vec{X}}^e \quad (1.2.52)$$

En substituant l'équation 2.86 dans l'équation 2.84, on obtient :

$$T = \frac{1}{2} \{[\lambda] \dot{\vec{X}}^e\}^T [m^e] \{[\lambda] \dot{\vec{X}}^e\} \quad (1.2.53)$$

En sachant que la matrice de masse $[M^e]$ de l'élément dans le système global de coordonnées est comme suite :

$$[M^e] = \dot{\vec{X}}^e{}^T [m^e] \dot{\vec{X}}^e \quad (1.2.54)$$

L'énergie cinétique associée au mouvement de l'élément peut être exprimée par :

$$T = \frac{1}{2} \{\dot{\vec{X}}^e\}^T [M^e] \{\dot{\vec{X}}^e\} \quad (1.2.55)$$

2. Matrice de raideur et d'amortissement :

Les énergies sont données par les formules suivantes :

$$U = \frac{1}{2} k^e (x_i - x_j)^2 \quad (1.2.56)$$

Et :

$$R = \frac{1}{2} c^e (x_i - x_j)^2 \quad (1.2.57)$$

Avec x_i et x_j : Les déplacements aux nœuds i et j .

La raideur du ressort et le coefficient d'amortissement visqueux entre ces deux nœuds. Par l'application des équations de Lagrange par rapport aux coordonnées $\mathbf{X}_i$, nous obtenons le système d'équations suivant

$$[M]\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} + [C]\{\dot{\mathbf{x}}(t)\} + [K]\{\mathbf{x}(t)\} = \{\mathbf{F}(t)\} \quad (1.2.58)$$

Où :

[M] : Matrice de masse.

[C] : Matrice d'amortissement.

[K] : Matrice de raideur.

{F(t)} : Vecteur des sollicitations extérieures.

Les matrices [M], [K] et [C] sont symétriques, l'énergie de déformation et la fonction de dissipation de Rayleigh peuvent s'annuler même si les déplacements ne sont pas nuls. Donc les matrices de raideur et d'amortissement sont dites semi-définies positives.

3. Matrice de masse pour une barre 1D

Pour une barre unidimensionnelle (1D), notant que nous avons deux nœuds, nous prendrons en considération que les déplacements axiaux, soit ; u_1 et u_2 ,

$$M_e = \int_{V_e} [N]^T \rho [N] dV_e \quad (1.2.59)$$

$$dV_e = du_e = dx_e \quad (1.2.60)$$

La matrice de l'équation (1.2.59) la matrice de masse d'une barre unidirectionnelle s'écrit comme suit :

$$[M^e] = \frac{\rho Al}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2.60)$$

4. Matrice de masse pour une barre a 2D

Pour le cas d'une barre (2D), on obtenaient la matrice de masse facilement en ajoutant les degrés de liberté v_1 et v_2 de la matrice de l'équation (1.2.59), de ce faite on peut écrire la matrice de masse d'une barre bidimensionnelle tel que :

Dans le cas de **lumped méthode** :

$$[M^e] = \frac{\rho Al}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2.61)$$

Et dans le cas de **constant méthode** :

$$[M^e] = \frac{\rho Al}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (1.2.62)$$

5. Matrice de masse pour une barre a 3D

On a:

$$[N] = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{x}{l}\right) & 0 & 0 & \frac{x}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \left(1 - \frac{x}{l}\right) & 0 & 0 & \frac{x}{l} & 0 \\ 0 & 0 & \left(1 - \frac{x}{l}\right) & 0 & 0 & \frac{x}{l} \end{bmatrix} \quad (1.2.63)$$

Avec :

$$\vec{x}^e = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ \theta_i \\ u_j \\ v_j \\ \theta_j \end{Bmatrix} \quad (1.2.64)$$

Pour le cas d'une barre (3D), on obtient la matrice de masse facilement en utilisant l'équation :

$$[M^e] = \iiint_{V^e} [N]^T \rho [N] \det(J) dV \quad (1.2.65)$$

De cette faite on peut écrire la matrice de masse d'une barre tridimensionnelle tel que :

Dans le cas de **lumped méthode** :

$$[M^e] = \frac{\rho A l}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.2.66)$$

Et dans le cas de **constant méthode** :

$$[M^e] = \frac{\rho A l}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (1.2.67)$$

6. Matrice de masse pour une poutre 2D

L'élément de poutre élastique bidimensionnel est un élément de ligne droite à deux nœuds.

Chaque nœud a deux degrés de liberté de translation et un de rotation dans le système de coordonnées globales.

L'élément prend des forces nodales ou des déplacements. Cet élément est utilisé pour modéliser les membres du cadre plan.

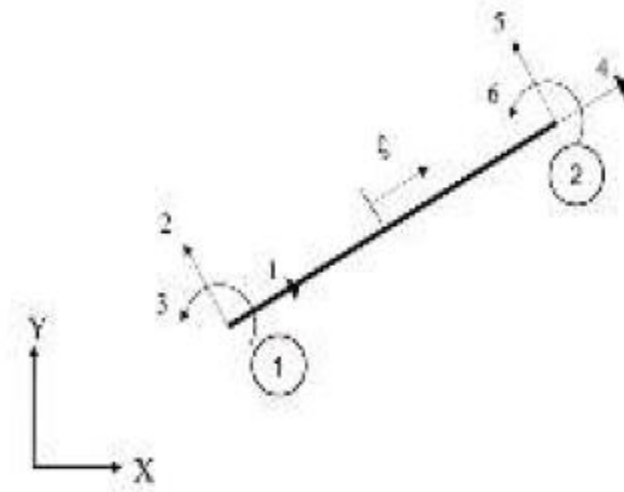


Figure II-13:élément poutre bidimensionnelle.

La matrice de masse est évaluée selon la formulation cohérente et donnée sous une forme Explicite par rapport au système de coordonnées de l'élément comme suite :

$$[M^e] = \frac{\rho A l}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22l & 0 & 54 & -13l \\ 0 & 22l & 4l^2 & 0 & 13l & -3l^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13l & 0 & 156 & -22l \\ 0 & -13l & -3l^2 & 0 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (1.2.68)$$

Puisque les poutres travaillent généralement en flexion ce qui fait de la traction un paramètre négligeable :

$$[M^e] = \frac{\rho A l}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (1.2.69)$$

7. Matrice de masse pour un portique 3D :

La matrice de masse est évaluée selon la formulation cohérente et est donnée sous une forme explicite par rapport au système de coordonnées de l'élément, en sachant que l'élément barre dans l'espace possède 12 degrés de liberté et en utilisant l'équation :

$$[M^e] = \rho A l \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13}{35} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{9}{70} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{13}{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{9}{70} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{J}{3A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{J}{6A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-11l}{200} & 0 & \frac{l^2}{105} & 0 & 0 & 0 & \frac{-13l}{420} & 0 & \frac{-l^2}{140} & 0 \\ 0 & \frac{11l}{210} & 0 & 0 & 0 & \frac{l^2}{105} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{l^2}{105} \\ \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9}{70} & 0 & 0 & 0 & \frac{13l}{420} & 0 & \frac{13}{35} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{9}{70} & 0 & \frac{-13l}{420} & 0 & 0 & 0 & \frac{13}{35} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{J}{6A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{J}{3A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{13l}{420} & 0 & \frac{-l^2}{140} & 0 & 0 & 0 & \frac{11}{210} & 0 & \frac{l^2}{105} & 0 \\ 0 & \frac{-13l}{420} & 0 & 0 & 0 & \frac{-l^2}{140} & 0 & \frac{-11}{210} & 0 & 0 & 0 & \frac{l^2}{105} \end{bmatrix} \quad (1.2.70)$$

Symétrique

II.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, en premier lieu, nous avons présenté la démarche des éléments finis et on se basent sur les rapports déformations déplacement et contraites puis nous avons donné les matrices de rigidités pour les différents systèmes. Ensuite, nous avons fait un rappel sur la dynamique des structures et les systèmes non amortis à n degrés de liberté et enfin, nous avons fait point sur les matrices de masses, d'amortissement pour les divers systèmes.

*Nouvelle méthode robuste l'index de flexibilité
pour l'identification et la quantification
d'endommagements.*

III Méthode robuste sur l'index de flexibilité pour l'identification et la quantification des endommagements.

III.1 Introduction :

Dans les différentes conceptions et structures, la protection est une question importante qui doit être prise en compte. Récemment, des chercheurs ont largement exploité sur les données pour l'analyse de la variation de ces structures comme indiqué dans les références. [44, 45] L'avantage de l'analyse de variation est l'estimation des dommages dans les structures. L'analyse la plus récente des dommages s'est concentrée sur les indicateurs de courbure et de dommages modaux, qui étaient basés sur des structures saines et malsaines, comme mentionné dans la réf. [46]. Rytter [47] a expliqué les quatre niveaux de dommages importants, tels que la présence de dommages, l'emplacement des dommages, le taux de dommages et la durée de vie restante.

Identification des dommages basée sur le changement de la matrice de flexibilité de la structure a été utilisé par Pandey et al. [48]. Cette technique a permis de détecter et de localiser correctement les éléments endommagés, et a été expérimentalement validé. Une étude statique et dynamique des poutres RC endommagées renforcées avec des armatures en fibre de carbone montées près de la surface (NSM) des tiges de polymère forcé (CFRP) ont été étudiées par Capozucca [49] sur la base d'une analyse expérimentale.

Dans ce chapitre, la détection, la localisation et la quantification des endommagements basés sur un indicateur de flexibilité amélioré, sont présentés théoriquement.

III.2 Indicateur des endommagements amélioré :

L'indice de flexibilité modale amélioré est proposé pour la détection et la localisation des dommages. Avec les déformées modales normalisées à l'unité $\Phi^T M \Phi = I$, les matrices de rigidité et de flexibilité sont liées aux données modales comme [50] :

$$\begin{cases} K = M \Phi \Omega \Phi^T M = M \left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \varphi_i \varphi_i^T \right) M \\ F = \Phi \Omega^{-1} \Phi^T = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i \varphi_i^T}{\omega_i^2} \end{cases} \quad (3.1)$$

Où K et M sont la matrice de rigidité et de masse, $\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n]$, est le vecteur de forme de mode φ_i et ω_i sont le $i^{ème}$ mode de forme et fréquence modale, $\Omega = \text{diag}(\omega_i^2)$ est la matrice de rigidité modale et F est la matrice de flexibilité. Les changements dans la matrice de flexibilité ΔF peuvent être obtenus comme :

$$\Delta F = F_u - F_d \quad (3.2)$$

où F_u et F_d sont les matrices de flexibilité pour les cas intacts et endommagés, respectivement

Ainsi, le taux de changement de flexibilité locale (LoFCR), afin de localiser la position de l'endommagement, cela peut être un indicateur important.

$$LoFCR_{ij} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i^d (\varphi_i^d)^T}{\omega_i^{2d}} - \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i^u (\varphi_i^u)^T}{\omega_i^{2u}} \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i^u (\varphi_i^u)^T}{\omega_i^{2u}}} \quad (3.3)$$

Pour le $j^{ème}$ degré de liberté (DOF), $\overline{\gamma_j}$ la valeur absolue maximale des éléments dans la colonne correspondante de $LoFCR_{ij}$, Ensuite, nous calculons les valeurs absolues maximales $\overline{\gamma_j}$ pour chaque colonne de $LoFCR_{ij}$ et pour chaque degré de liberté (DOF).

$$\overline{\gamma_j} = \frac{\max_i |LoFCR_{ij}|}{\chi_j} \quad (3.4)$$

Ou, nous avons $\chi_j = \max_i (|LoFCR_{ij}|)$

On néglige les valeurs inférieures à 10^{-1} , Afin de pouvoir écrire notre indicateur de dommages, nous allons augmenter la dimension du vecteur $\overline{\gamma_j}$, ayant la dimension du nombre total de DDL dans la structure, y compris les DDL constraints,

$$\overline{\Gamma_j} = \{ \overline{\gamma^{bc}_j} \quad \overline{b\gamma_j} \} \quad (3.5)$$

Ou, $\overline{\gamma^{bc}_j}$ est un vecteur nul en fonction du nombre de degrés de liberté constraints, et $\overline{b\gamma_j} = \overline{\gamma_j}$, est le vecteur calculé au niveau des supports.

La matrice de topologie $Edof$ pour les treillis planaires 2D peut être écrite comme :

$$Edof = \begin{bmatrix} el_1 & dof_1^x|^1 & dof_1^y|^1 & dof_2^x|^1 & dof_2^y|^1 \\ el_2 & dof_1^x|^2 & dof_1^y|^2 & dof_2^x|^2 & dof_2^y|^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ el_N & dof_1^x|^N & dof_1^y|^N & dof_2^x|^N & dof_2^y|^N \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Et pour le treillis spatial 3D, nous écrivons :

$$Edof = \begin{bmatrix} el_1 & dof_1^x|^1 & dof_1^y|^1 & dof_1^z|^1 & dof_2^x|^1 & dof_2^y|^1 & dof_2^z|^1 \\ el_2 & dof_1^x|^2 & dof_1^y|^2 & dof_1^z|^2 & dof_2^x|^2 & dof_2^y|^2 & dof_2^z|^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ el_N & dof_1^x|^N & dof_1^y|^N & dof_1^z|^N & dof_2^x|^N & dof_2^y|^N & dof_2^z|^N \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Ou, el_nu est le nombre d'élément, $\vartheta = dof$ c'est les degrés de libertés, N c'est le nombre d'éléments de la première colonne dans $Edof$ contient le numéro de l'élément, la deuxième colonne ($N + 1$), représentent les degrés de liberté de chaque élément.

Le vecteur $\overline{\Gamma}_j$ est disposé selon $Edof$ de la structure :

$$\overline{\Gamma}_j = \begin{bmatrix} el_1 & \Gamma_{dof_{n_1}} & \Gamma_{dof_{y_1}} & \Gamma_{dof_{z_1}} & \Gamma_{dof_{x_2}} & \Gamma_{dof_{y_2}} & \Gamma_{dof_{z_2}} \\ el_2 & \Gamma_{dof_{n_1}} & \Gamma_{dof_{y_1}} & \Gamma_{dof_{z_1}} & \Gamma_{dof_{x_2}} & \Gamma_{dof_{y_2}} & \Gamma_{dof_{z_2}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ el_{nel} & \Gamma_{dof_{n_1}} & \Gamma_{dof_{y_1}} & \Gamma_{dof_{z_1}} & \Gamma_{dof_{x_2}} & \Gamma_{dof_{y_2}} & \Gamma_{dof_{z_2}} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

On site trois vecteurs, selon les direction (x, y, z) , $\overline{\Gamma}_j$ comme indiqué dans (3.9)

$$\begin{cases} \Gamma_j^x = (\Gamma(dof_2^x) - \Gamma(dof_1^x))_j \\ \Gamma_j^y = (\Gamma(dof_2^y) - \Gamma(dof_1^y))_j \\ \Gamma_j^z = (\Gamma(dof_2^z) - \Gamma(dof_1^z))_j \end{cases} ; \begin{cases} \overline{\Gamma}_j^x = (\Gamma(dof_1^x) + \Gamma(dof_2^x))_j \\ \overline{\Gamma}_j^y = (\Gamma(dof_1^y) + \Gamma(dof_2^y))_j \\ \overline{\Gamma}_j^z = (\Gamma(dof_1^z) + \Gamma(dof_2^z))_j \end{cases} \quad (3.9)$$

L'indicateur d'endommagement basé sur LoFCR, peut être présenté par la formulation suivante :

$$DI_{LoFCR} = (\overline{\Gamma}_j^x + \overline{\Gamma}_j^y + \overline{\Gamma}_j^z) + (\Gamma_j^x + \Gamma_j^y + \Gamma_j^z) \quad (3.10)$$

III.3 La quantification de l'endommagement :

L'indicateur amélioré peut prédire correctement l'emplacement des éléments endommagés dans les différents types de structures, une nouvelle technique d'optimisation est utilisée pour l'identification des dommages.

La fonction fitness est définie comme la différence entre $(DI_{LoFCR})_j^{Measured}$ et $(DI_{LoFCR})_j^{Calculated}$ et se calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$OF = \sum_{j=1}^N |(DI_{LoFCR})_j^{Measured} - (DI_{LoFCR})_j^{Calculated}| \quad (3.11)$$

III.4 Application :

III.4.1 Structure 2D avec 31 éléments :

Une structure en treillis plane simplement supportée a servi pour l'étude de simulation dans cet article se compose de 31 barres en alliage d'aluminium (1,52 m de longueur, 0,0025 m² de section transversale) et 14 nœuds, le modèle d'éléments finis de la structure en treillis est établi en utilisant le logiciel commercial MATLAB.

Chaque barre de la structure en treillis est simulée comme un élément fini. Le module d'Young et la densité de la barre sont respectivement de 70 GPa et 2770 kg/m³. La structure est supportée aux nœuds 1 et 7[51].

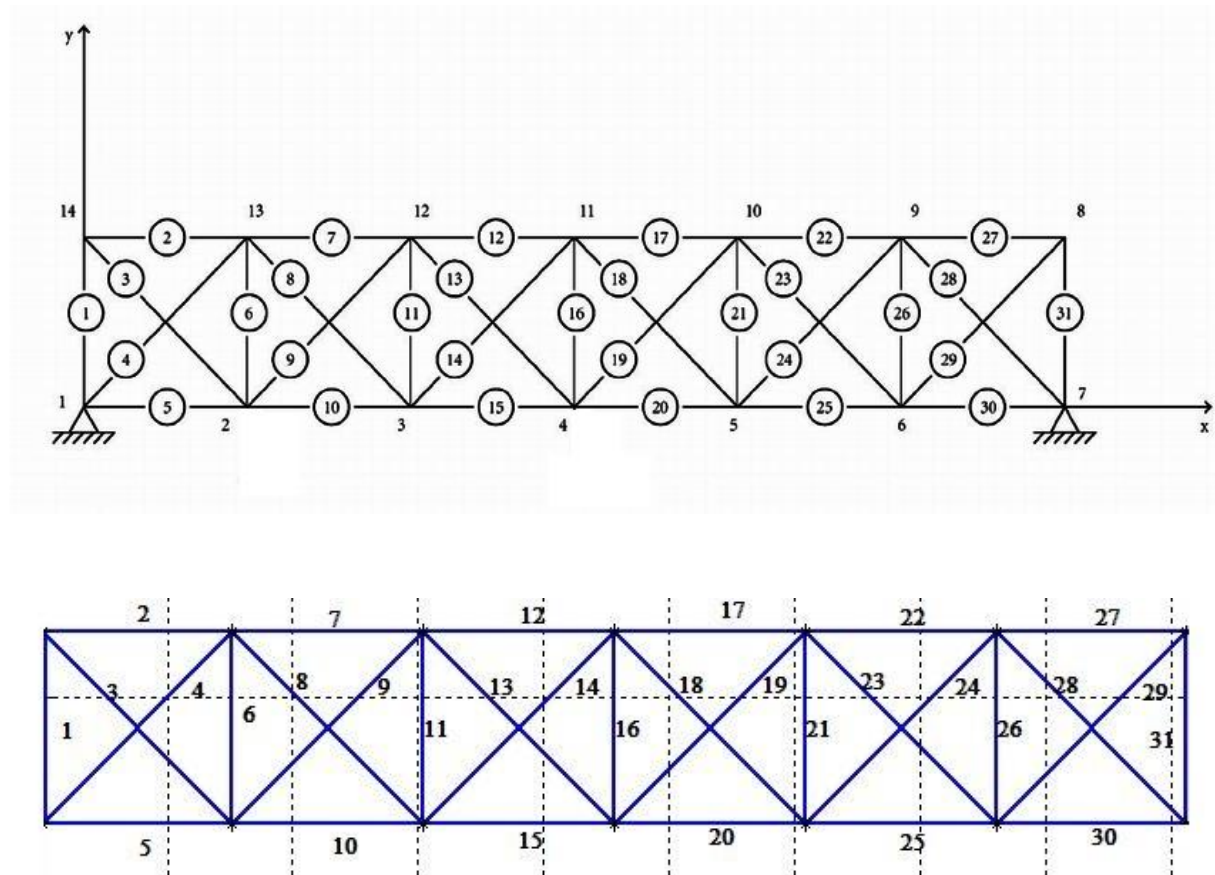


Figure III-1: structure treillis 2D à (31) éléments.

Section transversale [m ²]	Module de Young [GPa]	Masse volumique [kg/m ³]	Longueurs des barres [m]
0,0025	70	2770	1,52

Tableau III-1: Propriétés mécaniques et géométriques de la structure treillis 2D à (31) éléments[8].

Afin de valider la technique d'évaluation des endommagements proposée, trois scénarios sont considérés, dans lesquels les endommagements simples, doubles 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.

Scénario d'endommagement	Élément endommagés (% réduction de rigidité)		
Scénario 1	16 (10%)		
Scénario 2	10(10%)	22(15%)	
Scénario 3	15(20%)	20(15%)	25(25%)

Tableau III-2: Scénarios d'endommagements de la structure treillis 2D à (31) éléments.

Mode	Fréquences saine [Hz]			Scénario 1		Scénario 2		Scénario 3	
	MEF [51]	Expérimentale	Erreur%	F [Hz]	Erreur%	F [Hz]	Erreur %	F [Hz]	Erreur%
1	36,09	36,4323	0,94846	36,4319	0,00109	36,0428	1,0691	34,9666	4,0230
2	75,63	76,0952	0,6151	76,0665	0,03771	75,0843	1,3284	75,7420	0,46415
3	132,95	133,8103	0,6470	133,7956	0,01098	133,1017	0,5295	130,7177	2,3111
4	220,95	223,3793	1,0994	223,1986	0,08089	220,9369	1,09338	218,2051	2,31632
5	248,58	250,1825	0,6446	250,149	0,01339	250,1232	0,02370	247,5525	1,05123

Tableau III-3: Fréquences naturelles saines et endommagées de la structure (31) éléments 2D.

Les résultats des indicateurs d'endommagements de différents scénarios d'endommagement sont présentés dans le tableau 3. Les Cinq premières fréquences naturelles, énumérées dans ce même Tableau, sont affiliées dans ce cas pour tous les scénarios d'endommagements afin de calculer la forme l'erreur.

III.4.1.1 La localisation des endommagements par la méthode de l'index de flexibilité :

(a) Premier scénario :

L'élément 16 de la structure est endommagé de 10%.

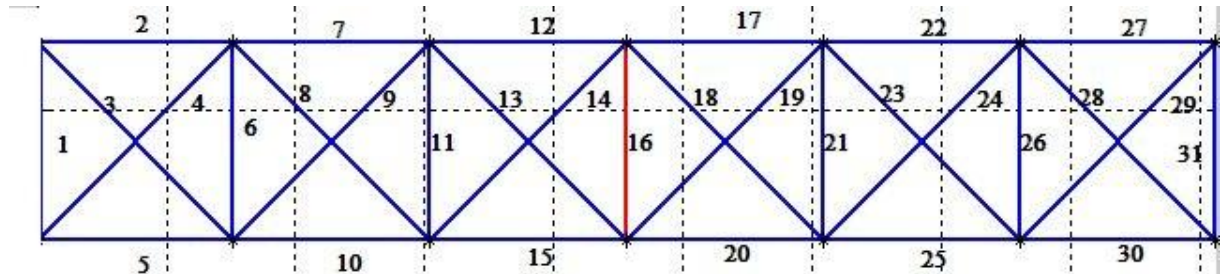


Figure III-2:premier scénario d'endommagement pour la structure 31 éléments 2D

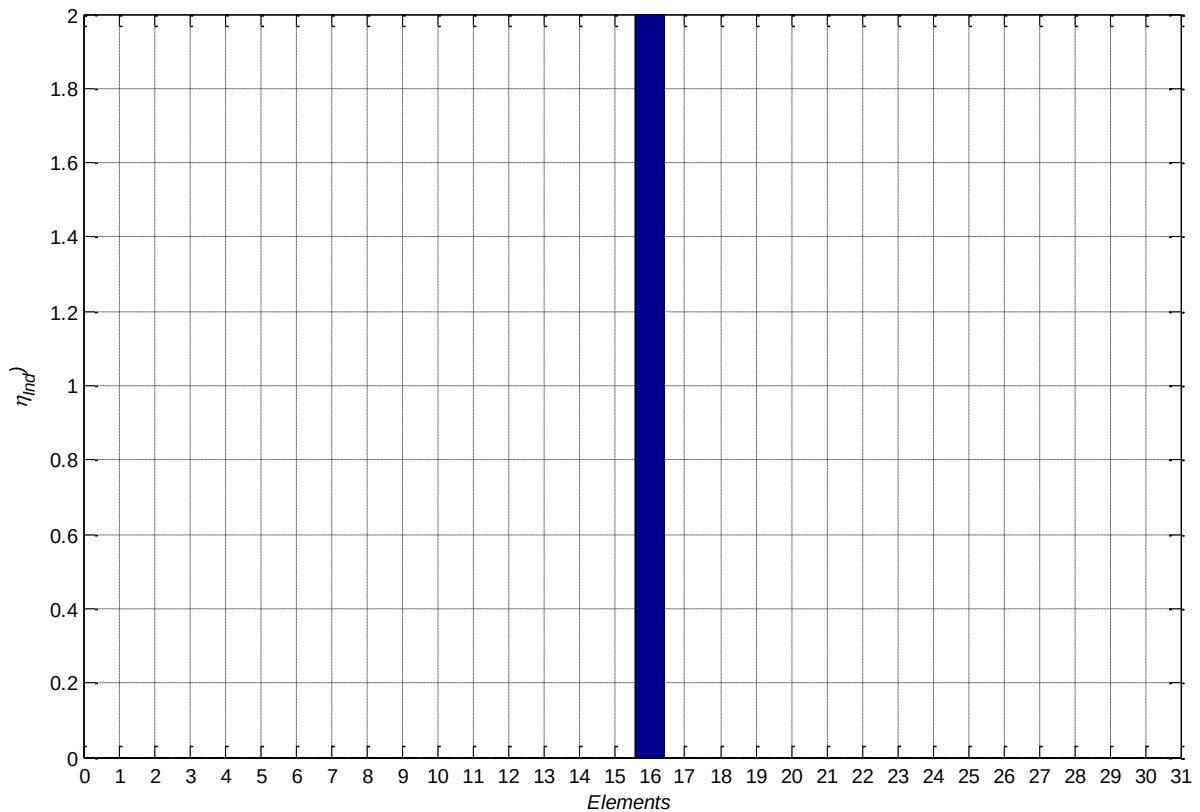


Figure III-3: Identification d'endommagements du treillis 2D à 31 éléments(Premier scénario d'endommagement).

Notre représentation graphique indique la présence d'une anomalie dans l'élément 16, ce pic présenter sous forme de barre situer sur l'élément 16 affirme qu'il y'a eu changement dans la flexibilité de cette élément.

(b) Deuxième scénario :

Les éléments 10 et 22 sont endommagés respectivement de 10% et 15%.

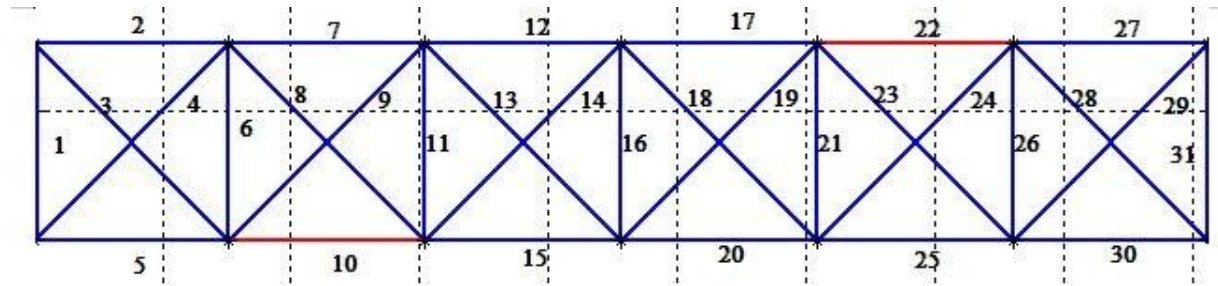


Figure III-4: Deuxième scénario d'endommagement pour la structure 31 éléments 2D

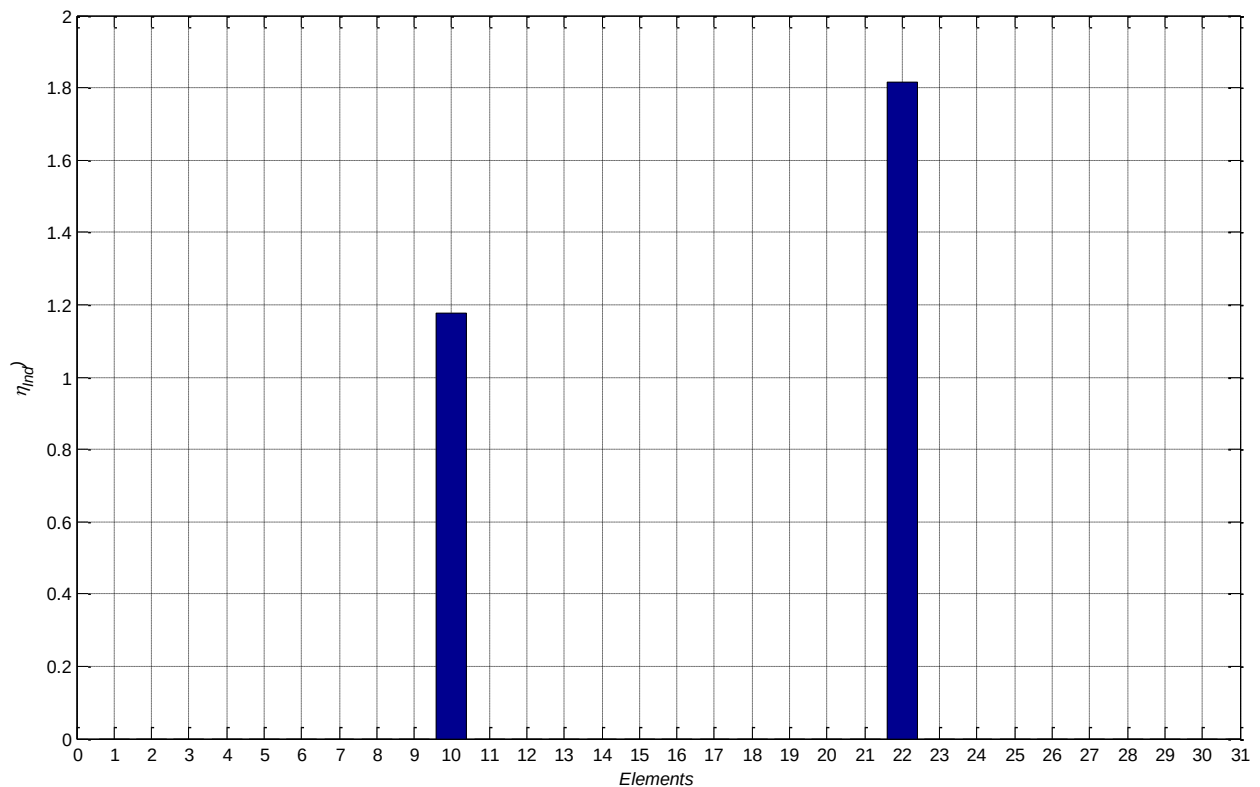


Figure III-5: Identification d'endommagements du treillis 2D à 31 éléments (Deuxième scénario d'endommagement).

Cette figure est affilée au deuxième scénario, ou on a endommagé les éléments 10 et 22, l'indication graphique nous affirme cela par la perturbation de flexibilité indiqué.

(c) Troisième scénario :

Les éléments 15, 20 et 25 sont endommagés respectivement de 15%, 20% et 25%.

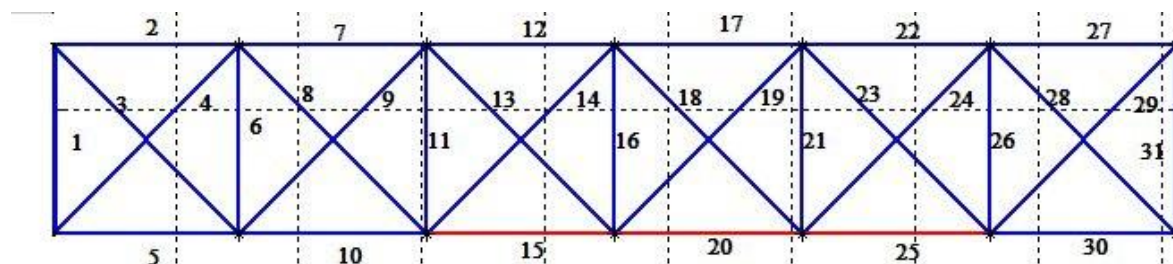


Figure III-6: Troisième scénario d'endommagement pour la structure 31 éléments 2D.

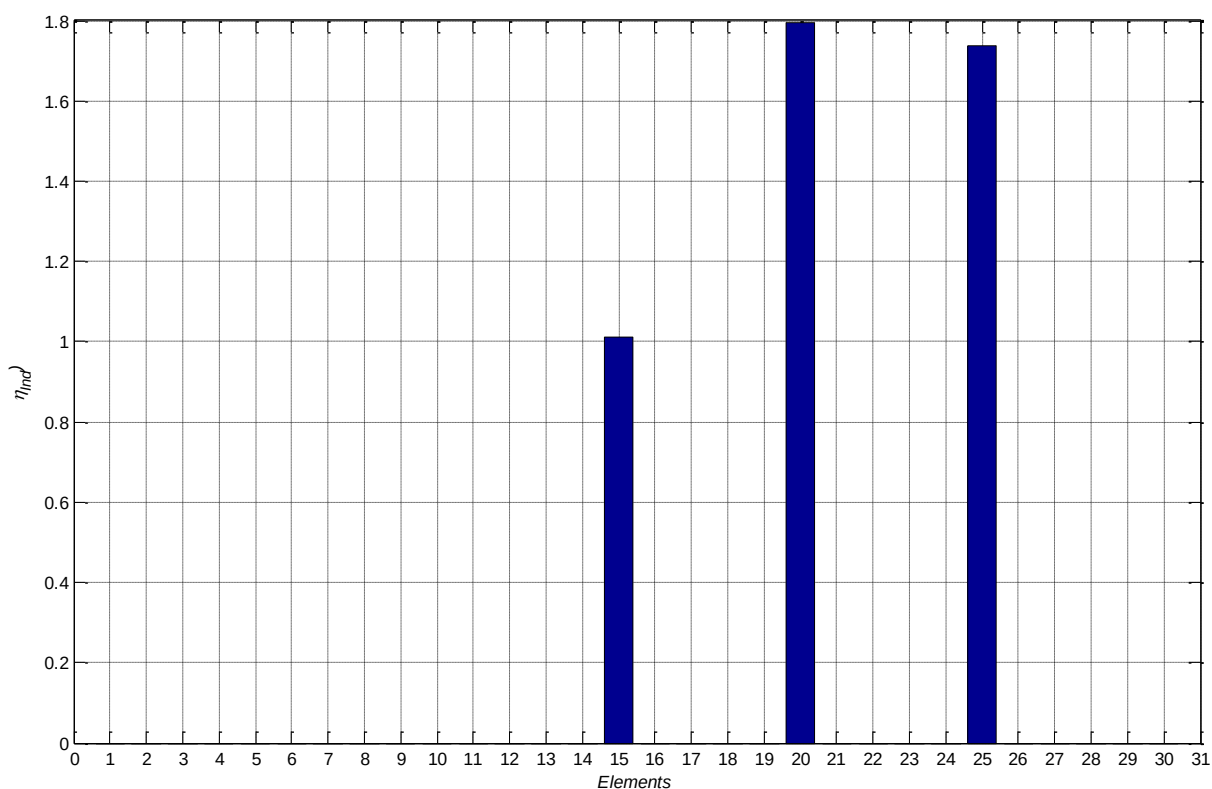


Figure III-7: Identification d'endommagements du treillis 2D à 31 éléments (Troisième scénario d'endommagement).

Cette figure affirme le troisième scénario qui implique l'endommagement des éléments 15, 20 et 25, comme représenté par ces divers pics, ils reflètent le changement dans la flexibilité de ces éléments.

III.4.2 Structure 3D avec 28 éléments :

Une structure en treillis composé de 28 éléments en 3D, le modèle est divisé en 28 éléments de 3 ddl pour chaque nœud, les propriétés de l'élément de poutre sont énumérées dans la figure 8, et les propriétés mécaniques et géométriques de la structure sont donnée dans le tableau 4.

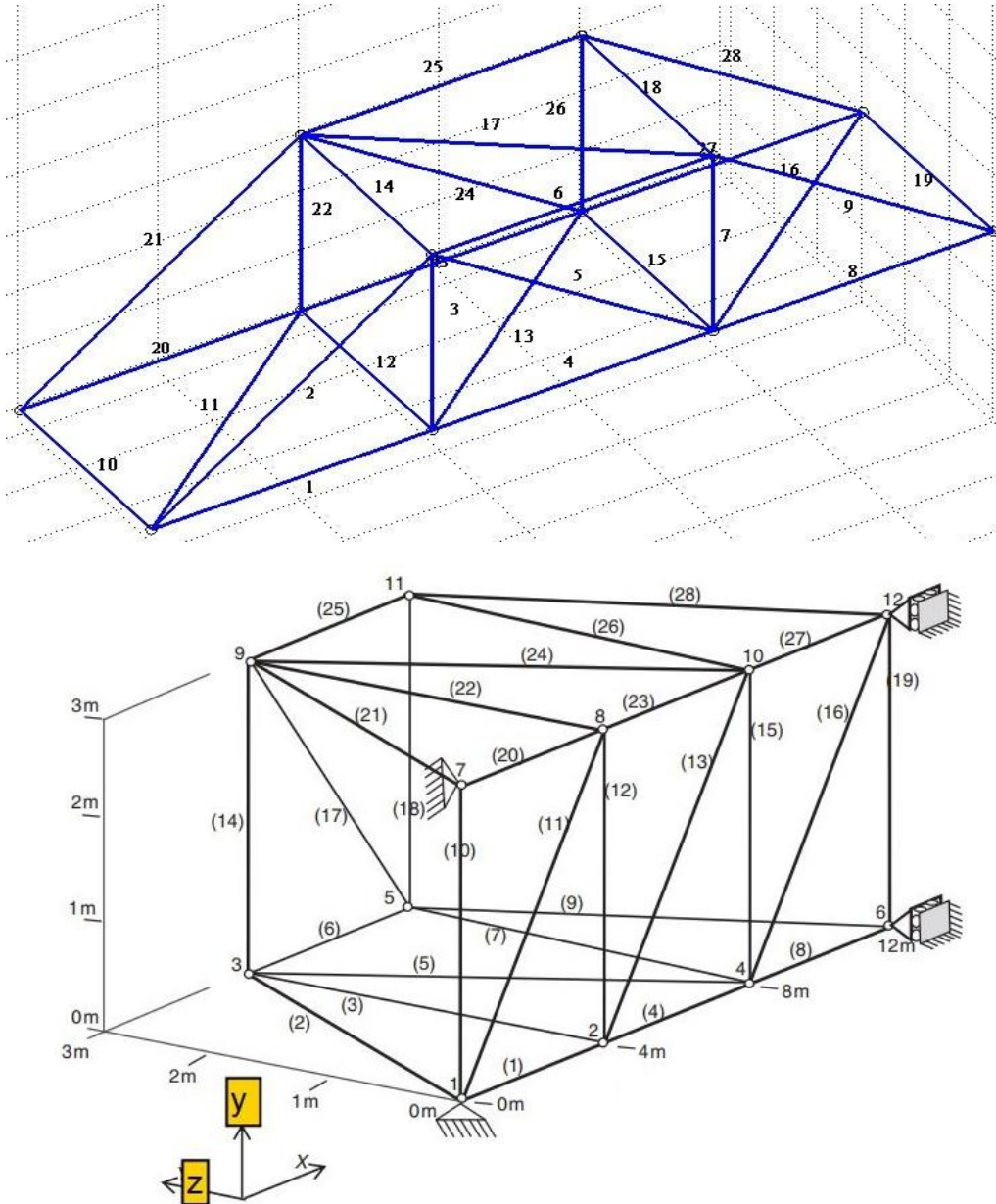


Figure III-8: structure treillis 3D à (28) éléments[52].

Section transversal [m ²]	Module de Young [KN/ m ²]	Masse volumique [Kg/m ³]
0.01	2.1×10^8	7830

Tableau III-4: Propriétés mécanique et géométrique de la structure a 28 éléments 3D[52].

Nœuds	X	Y	Z
1	0	0	0
2	4	0	0
3	4	0	3
4	8	0	0
5	8	0	3
6	12	0	0
7	0	3	0
8	4	3	0
9	4	3	3
10	8	3	0
11	8	3	3
12	12	3	0

Tableau III-5: Systèmes de coordonnées par rapport aux axes x, y et z.

Afin de valider la technique d'évaluation des endommagements proposée, trois scénarios sont considérés, dans lesquels les endommagements simples, doubles ainsi que les endommagements multiples sont étudiés comme indiqué dans

Scénario d'endommagement	Élément endommagés (% réduction de rigidité)		
Scénario 1	13(10%)		
Scénario 2	25 (10%)	18 (15%)	
Scénario 3	17 (20%)	14(15%)	6 (25%)

Tableau III-6: Scénarios d'endommagements de la structure treillis 3D à (28) éléments.

Mode	Fréquences saine [Hz]			Scénario 1		Scénario 2		Scénario 3	
	MEF[52]	EXP	Erreur [%]	F [Hz]	Erreur [%]	F [Hz]	Erreur [%]	F [Hz]	Erreur(%)
1	24,526	24,494	0,1304	24,318	0,71854	24,4932	0,00327	24,4941	0,0004
2	51,761	51,468	0,5660	51,468	0	51,4377	0,05887	51,3180	0,29144
3	65,266	64,572	1,0633	64,132	0,68141	64,3071	0,41024	64,5131	0,09122
4	100,052	97,460	2,5906	97,456	0,0041	97,3227	0,14088	93,7149	3,8427
5	114,281	110,416	3,3820	110,24	0,1594	109,7513	0,602	109,0734	1,21595
6	121,937	117,253	3,84132	117,05	0,17313	116,6714	0,49602	116,6054	0,55231

Tableau III-7: Fréquences naturelles saines et endommagées de la structure (25) éléments 3D.

Les résultats des indicateurs d'endommagements de différents scénarios d'endommagement sont présentés dans le tableau 7. Les six premiers modes fréquences naturelles, énumérées dans ce même Tableau, sont affiliées dans ce cas pour tous les scénarios d'endommagements afin de calculer la forme l'erreur.

III.4.2.2 La localisation des endommagements par la méthode de l'index de flexibilité :

(a) Premier scénario :

Dans ce scénario l'élément 13 est endommagé de 10%

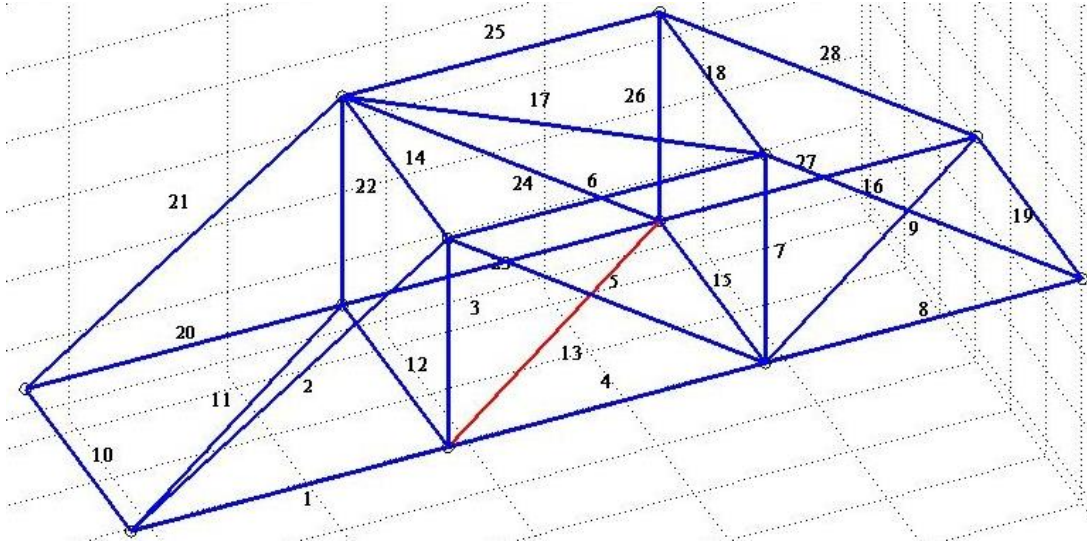


Figure III-9:premier scénario d'endommagement pour la structure 28 éléments 3D

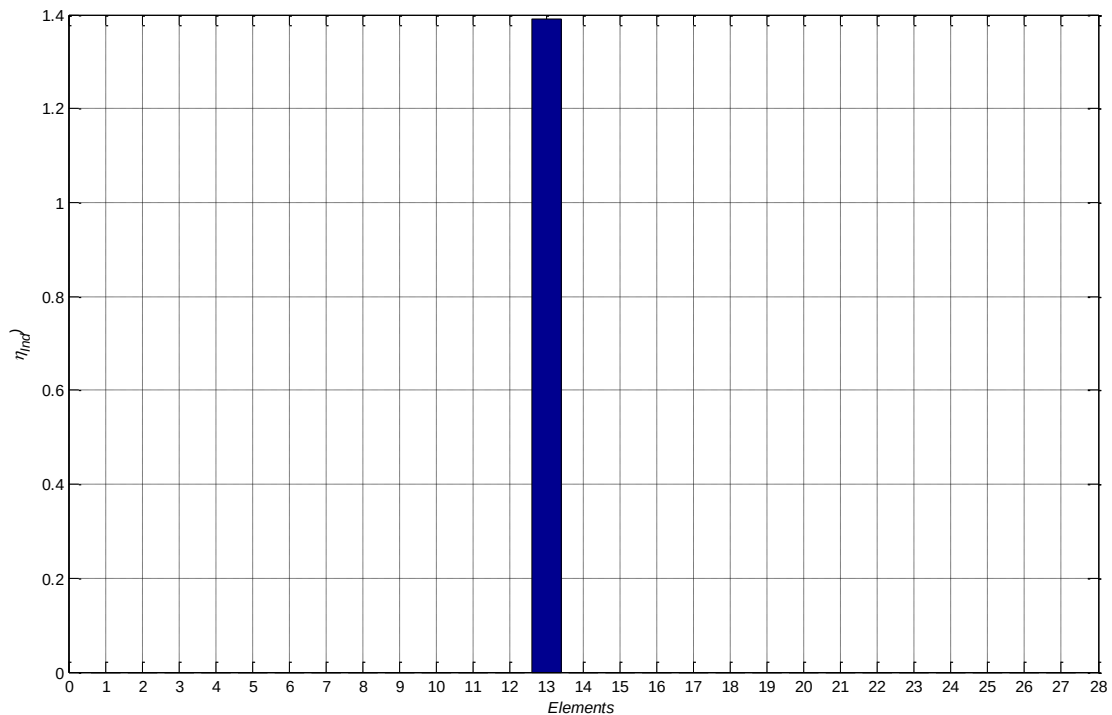


Figure III-10:Identification d'endommagements du treillis 3D à 28 éléments(Premier scénario d'endommagement).

Cette représentation graphique indique la présence d'une anomalie dans l'élément 13, ce pic présenter sous forme de barre situer sur l'élément 13 affirme qu'il y'a eu changement dans la flexibilité de cette élément.

(b) Deuxième scénario :

L'élément 25 et 18 sont endommagés respectivement de 10% et 25%.

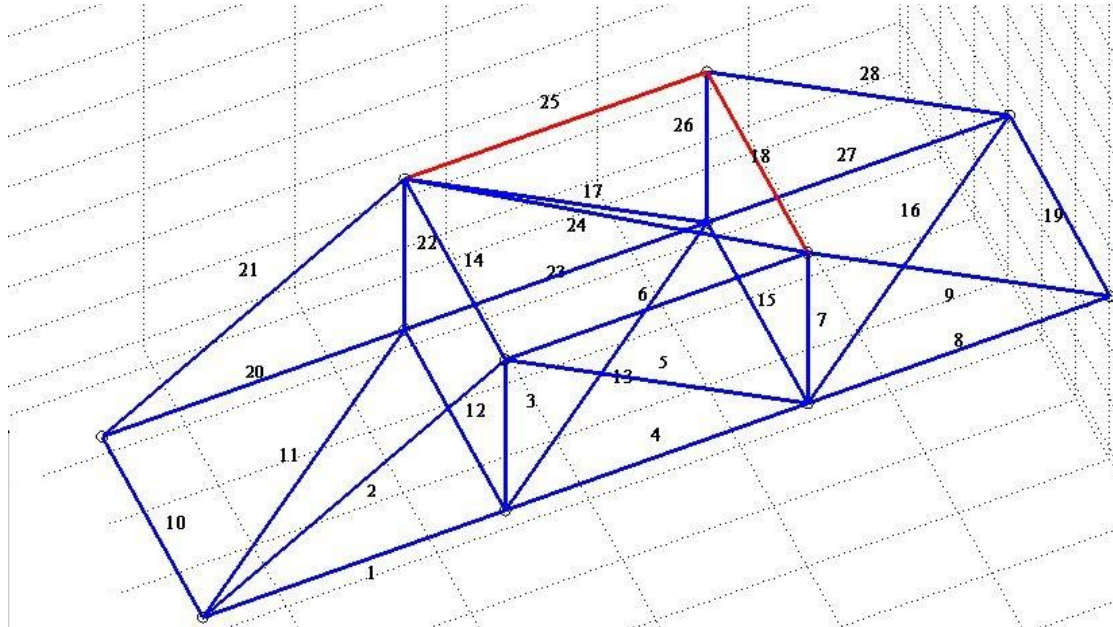


Figure III-11:Deuxième scénario d'endommagement pour la structure 28 éléments 3D.

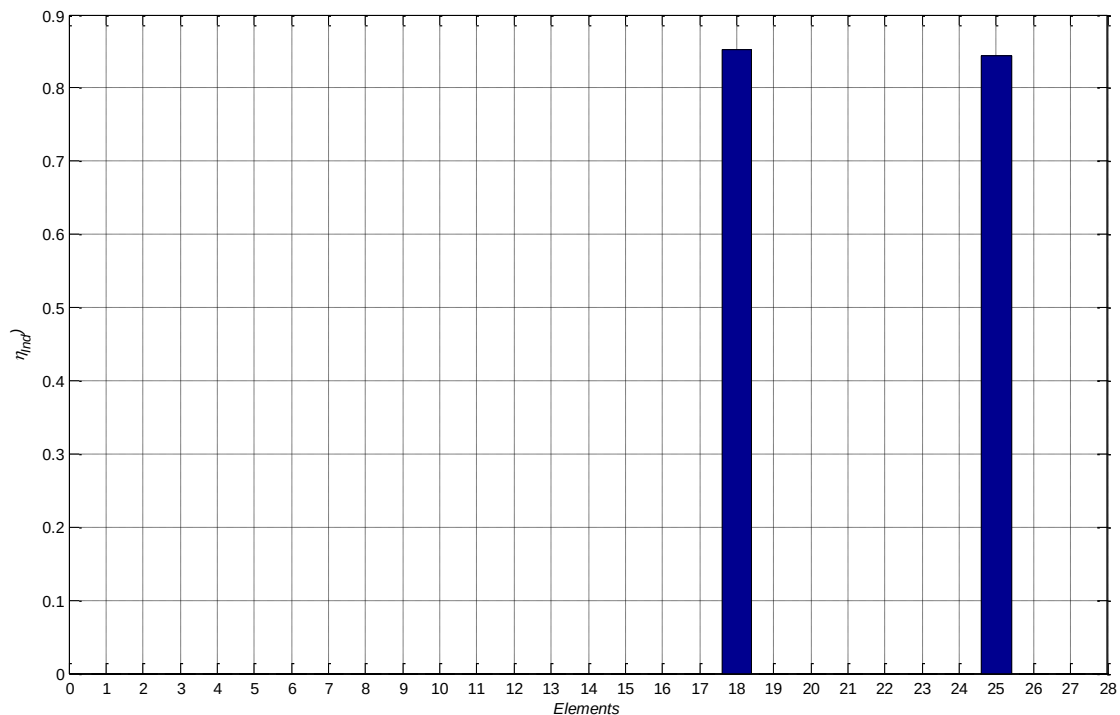


Figure III-12 : Identification d'endommagements du treillis 3D à 28 éléments(Deuxième scénario d'endommagement).

Dans ce deuxième scénario, ou on a endommagé les éléments 18 et 25, l'indication graphique nous affirme cela par la perturbation de flexibilité indiqué par ces pics.

(c) Troisième scénario :

Les éléments 14, 17 et 6 sont endommager respectivement de 15%, 20% et 25%.

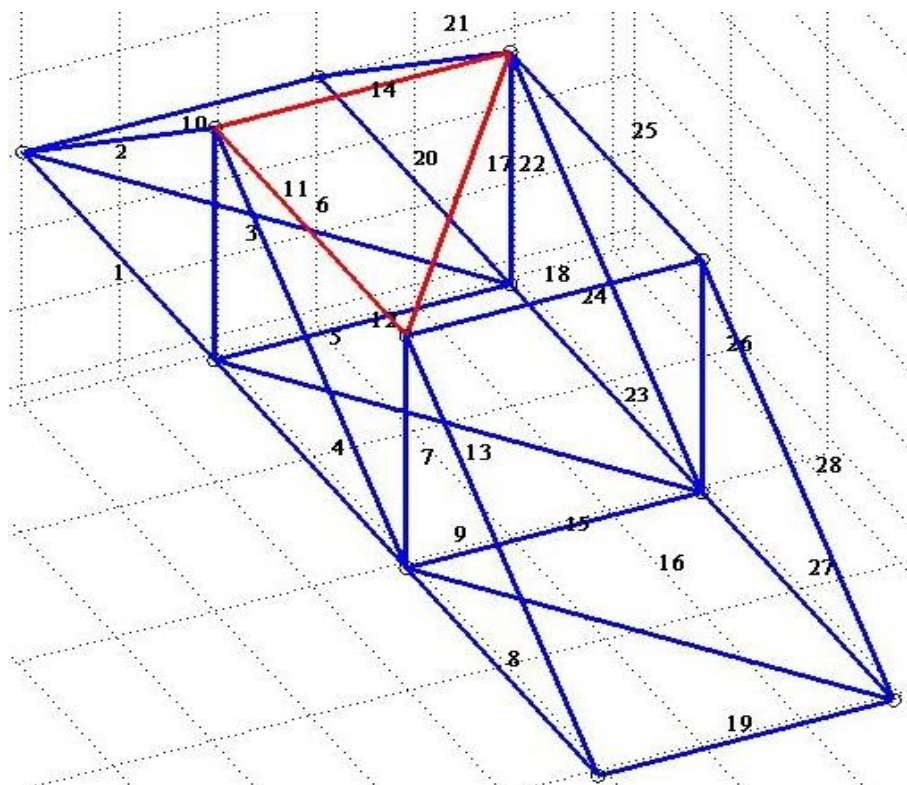


Figure III-13: Troisième scénario d'endommagement pour la structure 28 éléments 3D.

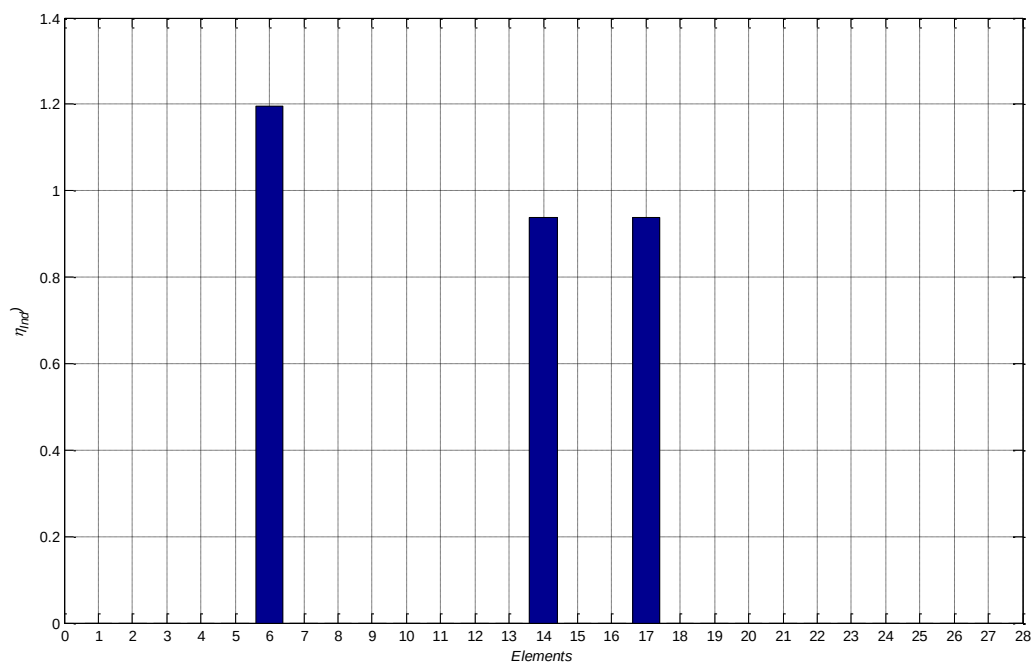


Figure III-14: Identification d'endommagements du treillis 3D à 28 éléments (Troisième scénario d'endommagement).

Le troisième scénario qui implique l'endommagement des éléments 6, 14 et 17, comme représenter pas ces divers pics, ils reflètent le changement dans la flexibilité de ces éléments.

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons utilisé la méthode de l'index de flexibilité modale basée sur les déformées modales et les matrices de flexibilité et rigidité pour déterminer l'emplacement d'endommagement dans les structures en treillis.

Nous avons prouvé la faisabilité et l'efficacité de cette méthode en tant qu'indicateur d'endommagement. La validation de cette approche a été faite, implantée et calculé grâce aux MATLAB™, étant donné sa précision et son efficacité dans la détermination des emplacements des dommages.

Méthode d'optimisation

IV Méthodes d'optimisations

VI.1 Introduction

La détection des endommagements structurels est un problème d'ingénierie typique, qui a reçu beaucoup d'attention, l'emploi des paramètres sensibles et d'algorithmes d'optimisation sont essentiels pour obtenir des résultats précis. Diverses signatures vibratoires ont été utilisées pour construire des indicateurs des endommagements ou des fonctions objectives lors de l'identification de l'emplacement des dommages pendant des années[53-58].

Il existe deux classes principales de techniques d'optimisation :

les méthodes déterministes, qui sont divisées en approches linéaires et non linéaires [59], Ces approches sont les méthodes déterministes les plus utilisées, désignées en utilisant l'érudition du gradient du problème pour explorer l'espace de recherche et trouver la solution optimale [60, 61]. Bien que ces approches soient utiles pour les problèmes de recherche linéaire (Uni modal), elles sont sensibles aux pièges optima locaux lors de la mise en œuvre de problèmes de recherche non linéaire (Multimodal), y compris les problèmes d'optimisation du monde réel. Pour surmonter ce problème, plusieurs méthodes peuvent être utilisées comme une stratégie de population initiale différente, l'hybridation ou la modification de l'algorithme [62].

Les méthodes stochastiques, qui sont une autre alternative qui génère et utilise des variables aléatoires telles que les algorithmes d'optimisation méta-heuristiques. Ces algorithmes d'optimisation sont utilisés pour rechercher globalement dans l'espace de recherche disponible du problème afin d'obtenir la solution quasi optimale [63], Les avantages de ces algorithmes sont la simplicité, la flexibilité, l'indépendance vis-à-vis du problème, la facilité d'utilisation et la nature sans gradient [60, 64, 65].

VI.2 L'algorithme de recherche de reptiles (The Reptile Search Algorithm RSA)

L'exploration (recherche globale) et l'exploitation Les phases (recherche locale) de l'algorithme de recherche de reptiles (RSA) proposé sont présentées, ils s'inspirent des mécanismes d'encerclement, des mécanismes de chasse et du comportement social des crocodiles dans la nature. Les comportements des crocodiles consistent à encercler et chasser la proie. Ces mécanismes sont modélisés mathématiquement pour présenter le RSA proposé et effectuer les processus d'optimisation. RSA est une méthode basée sur la population et sans gradient, elle peut donc être utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes ou simples soumis à des contraintes spécifiques. Les groupes cohésifs sont utiles pour une coopération active entre les crocodiles et maximisent également leur robustesse[66].

VI.2.1 Phase d'initialisation :

Dans RSA, le processus d'optimisation commence par un ensemble de solutions candidates (X) comme indiqué dans l'équation. (4.1), qui est généré de manière stochastique, et la meilleure solution obtenue est considérée comme la solution presque optimale à chaque itération.

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \dots & x_{1,j} & x_{1,n-1} & x_{1,n} \\ x_{2,1} & \dots & x_{2,j} & \dots & x_{2,n} \\ \dots & \dots & x_{i,j} & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N-1,1} & \dots & x_{N-1,j} & \dots & x_{N-1,n} \\ x_{N,1} & \dots & x_{N,j} & \dots & x_{N,n} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Où, X est un ensemble de solutions candidates générées aléatoirement en utilisant l'équation (4.2), $x_{i,j}$ désigne au $j^{ème}$ position affilier a $i^{ème}$ solution, N , est le nombre de solutions candidates, et n désigne la taille dimensionnelle du problème donné.

$$x_{i,j} = rand \times (UB - LB) + LB, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.2)$$

Ou, $rand$ est la valeur aléatoire, (UB et LB), désignent respectivement les bornes inférieure et supérieure du problème donné.

VI.2.2 Phase d'encerclement (exploration) :

Dans cette section, le comportement exploratoire (encerclement) de **RSA** est introduit. Selon le comportement d'encerclement, les crocodiles ont deux mouvements pendant l'encerclement : la marche haute et la marche sur le ventre. Ces mouvements renvoient à des règnes différents, dont l'engagement à la recherche d'exploration (globalement). Les mouvements des crocodiles (marche haute et sur le ventre) ne peuvent pas leur permettre d'approcher facilement la proie ciblée en raison de leur dérangement, contrairement à une autre phase de recherche (phase de chasse). Ainsi, la recherche d'exploration découvre un large espace de recherche ; il peut trouver la zone de densité peut-être après plusieurs efforts. De plus, les mécanismes d'exploration (marche haute et marche ventrale) sont exploités à ce stade d'optimisation pour soutenir l'autre phase (chasse/exploration) dans le processus de recherche grâce à des recherches approfondies et étendues[66].

Le RSA peut basculer entre les phases de recherche d'encerclement (exploration) et de chasse (exploitation), ce changement entre différents comportements se fait en fonction de quatre conditions ; diviser le nombre total d'itérations en quatre parties. Les mécanismes d'exploration de RSA explorent les régions de recherche et l'approche pour trouver une meilleure solution basée sur deux stratégies de recherche principales (stratégie de marche haute et stratégie de marche du ventre)[66].

Cette méthode de recherche est conditionnée par deux motifs, la stratégie de marche haute est reliée à la condition $t < \frac{T}{4}$, et pour la marche sur le ventre conditionnée par $t \leq 2\frac{T}{4}$ et $t > \frac{T}{4}$

Cela signifie que cette condition sera satisfaite pour presque la moitié du nombre d'itérations d'exploration (Marche haute) et une autre moitié pour la marche du ventre. Ce sont deux méthodes de recherche d'exploration. Notez qu'un coefficient d'échelle stochastique est examiné pour que l'élément génère des solutions plus diverses et explore des régions diverses. Nous avons utilisé la règle la plus simple, qui peut imiter le comportement d'encerclement des crocodiles. Dans cet article, les équations de mise à jour de position sont proposées pour la phase d'exploration comme dans l'équation(4.3)

$$x_{(i,j)}(t+1) \begin{cases} Best_j(t) \times n_{(i,j)}(t) \times \beta - R_{(i,j)}(t) \times rand & t < \frac{T}{4} \\ Best_j(t) \times x_{(r,j)} \times ES(t) \times rand & t \leq 2\frac{T}{4} \text{ and } t > \frac{T}{4} \end{cases} \quad (4.3)$$

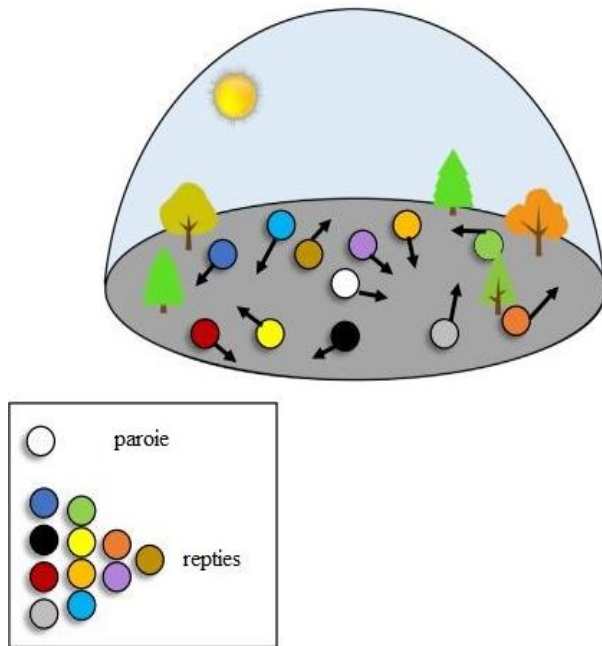


Figure IV-2: Encercler la proie, quand $t \leq \frac{T}{4}$

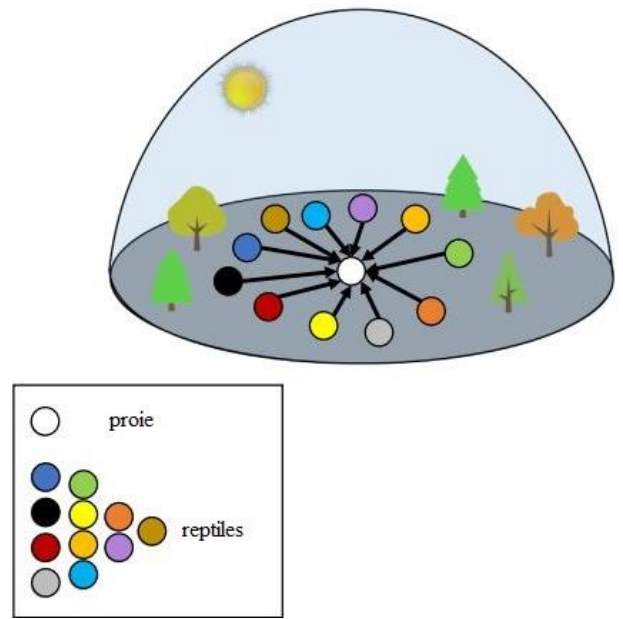


Figure IV-1: L'attaque de la proie $t > \frac{T}{4}$

Ou, $Best_j(t)$ est la $j^{ème}$ position dans la meilleure solution obtenue, $rand$ désigne un nombre aléatoire entre 0 et 1, t est le numéro de l'itération en cours, T est le nombre maximum d'itérations, $n_{(i,j)}$ désigne l'opérateur de chasse pour la $j^{ème}$ position dans la $i^{ème}$ solution qui est calculée en utilisant l'équation (4.4). β est un paramètre sensible, contrôle la précision d'exploration (c'est-à-dire la marche haute) pour la phase d'encerclement au cours des itérations, qui est fixée à 0,1, La fonction de réduction $R(i,j)$ est une valeur utilisée pour réduire la zone de recherche, qui est calculée à l'aide de l'équation (4.5), r_1 est un nombre aléatoire entre $[1 N]$ et $x_{(r_1,j)}$ désigne une position aléatoire de la $i^{ème}$ solution, N est le nombre de solutions candidates. Sens de l'évolution $ES(t)$ est un rapport de probabilité prend des valeurs

décroissantes aléatoirement entre 2 et -2 tout au long du nombre d'itérations, qui est calculé à l'aide de l'équation(4.6).

$$\eta_{(i,j)} = Best_j(t) \times P_{(i,j)} \quad (4.4)$$

$$R_{(i,j)} = \frac{Best_j(t) - x_{(r2,j)}}{Best_j(t) + \epsilon} \quad (4.5)$$

$$ES(t) = 2 \times r_3 \times \left(1 - \frac{1}{T}\right) \quad (4.6)$$

Ou, ϵ c'est une petite valeur r_2 c'est une valeur aléatoire compris entre $[1 \ N]$ dans l'équation (4.6), 2 est utilisé comme une valeur de corrélation pour donner des valeurs entre 2 et 0, r_3 c'est une valeur aléatoire compris entre $[-1 \ 1]$, $P_{(i,j)}$ est la différence en pourcentage entre la position de la meilleure solution obtenue et la position de la solution actuelle, qui est calculée à l'aide de l'équation (4.7).

$$P_{(i,j)} = \frac{x_{(i,j)} - M(x_i)}{Best_j(t) \times (UB_j - LB_j) + \epsilon} \quad (4.7)$$

Ou, $M(x_i)$ comme indiqué dans l'équation (4.7) est les positions moyennes de la solution , qui est calculée à l'aide de l'équation (4.8). $UB_j - LB_j$ sont respectivement les limites supérieure et inférieure de la $j^{ème}$ position, α est un paramètre sensible, contrôle également la précision d'exploration (la différence entre les solutions candidates) pour la coopération de chasse au cours des itérations, qui est fixée égale à 0,1 dans cet article[65].

$$M(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{(i,j)} \quad (4.8)$$

VI.2.3 Phase de chasse (exploitation) :

Dans cette section, le comportement d'exploitation (chasse) de RSA est présenté. Selon le comportement de chasse, les crocodiles ont deux stratégies pendant la chasse sont la coordination de la chasse et la coopération. Ces stratégies font référence à différentes techniques d'intensification, qui s'engagent dans la recherche d'exploitation (localement). Les stratégies des crocodiles (coordination et coopération de chasse) leur permettent de s'approcher facilement de la proie cible en raison de leur intensification, contrairement aux mécanismes d'encerclement. Par conséquent, la recherche d'exploitation découvre la solution quasi optimale, peut-être après plusieurs efforts. Par ailleurs, les mécanismes d'exploitation sont opérés à ce stade d'optimisation pour mener une recherche d'intensification à proximité de la solution optimale et privilégier la communication entre eux.

Les mécanismes d'exploitation de RSA exploitent l'espace de recherche et l'approche pour trouver la solution optimale basée sur l'utilisation de deux stratégies de recherche principales (c. (9)). La recherche dans cette phase est conditionnée comme la stratégie de coordination de chasse est conditionnée par $t \leq 3 \frac{T}{4}$ et $t > 2 \frac{T}{4}$ sinon, la stratégie de coopération de chasse est

exécutée, quand $t \leq T$ et $t > 3\frac{T}{4}$. Notez que les coefficients stochastiques sont considérés pour générer des solutions plus denses et exploiter les régions prometteuses (localement). Nous avons utilisé la règle la plus simple, qui peut imiter le comportement de chasse des crocodiles. Dans cet article, les équations de mise à jour de position suivantes sont proposées pour la phase d'exploitation équation (4.9)

$$x_{(i,j)}(t+1) \begin{cases} Best_j(t) \times P_{(i,j)}(t) \times rand & t < 3\frac{T}{4} \text{ et } t > 2\frac{T}{4} \\ Best_j(t) - \eta_{(i,j)}(t) - R_{(i,j)}(t) \times rand & t \leq T \text{ and } t > 3\frac{T}{4} \end{cases} \quad (4.9)$$

Ou, $Best_j(t)$ est la j^{emme} position dans la meilleure solution obtenue, $\eta_{(i,j)}$ désigne l'opérateur de chasse pour la j^{emme} position dans la i^{emme} solution qui est calculée en utilisant l'équation (4.4), $P_{(i,j)}$ est le pourcentage de différence entre la j^{emme} position de la meilleure solution obtenue et la j^{emme} position de la solution actuelle qui est calculé à l'aide de l'équation (4.7) $\eta_{(i,j)}$ désigne l'opérateur de chasse pour la j^{emme} position dans la i^{emme} solution, qui est calculée à l'aide de l'équation (4.4) [65].

VI.2.4 Pseudocode de l'algorithme de recherche de reptiles (RSA) :

Pour rappel, dans RSA, le processus d'optimisation commence par la génération d'un ensemble aléatoire de solutions candidates (population). Au cours de la trajectoire de répétition, les mécanismes de recherche du RSA explorent les positions possibles de la solution quasi optimale. Chaque solution remplace ses positions par rapport à la solution la mieux obtenue selon les processus du RSA proposé RSA proposé. Pour mettre l'accent sur l'exploration et l'exploitation, les processus de recherche sont divisés en deux méthodes principales (exploration et exploitation) avec quatre stratégies. Exploration : stratégie de marche haute et stratégie de marche sur le ventre. Exploitation : chasse coordination et coopération. Les solutions candidates tentent d'élargir la zone de recherche lorsque $t \leq \frac{T}{2}$ et tenter de converger vers la solution quasi optimale lorsque $t > \frac{T}{2}$ dans la phase d'exploration, la stratégie de mouvement de marche haute est exécutée lorsque $t \leq \frac{T}{4}$ et la stratégie de mouvement de marche du ventre est exécutée lorsque $t \leq 2\frac{T}{4}$ et $t > \frac{T}{4}$.

Enfin, le RSA est arrêté lorsqu'il remplit le critère de fin. Le pseudo code du RSA proposé est détaillé dans l'algorithme 1. Le processus intuitif et détaillé du RSA est montré dans la figure

Algorithm 1 Pseudo-code of the Reptile Search Algorithm (RSA)

```

1: Initialization phase
2: Initialize RSA parameters  $\alpha$ ,  $\beta$ , etc.
3: Initialize the solutions' positions randomly.  $X: i = 1, \dots, N$ .
4: while ( $t < T$ ) do
5:   Calculate the Fitness Function for the candidate solutions ( $X$ ).
6:   Find the Best solution so far.
7:   Update the  $ES$  using Equations
8:   The beginning of the RSA
9:   for ( $i=1$  to  $N$ ) do
10:    for ( $j=1$  to  $n$ ) do
11:      Update the  $\eta$ ,  $R$ ,  $P$  and values using Equations

12:      if ( $t \leq \frac{T}{4}$ ) then
13:         $x_{(i,j)}(t+1) = Best_j(t) \times \eta_{(i,j)}(t) \times \beta \times R_{(i,j)}(t) \times rand$ ,  $\triangleright$  {High walking}
14:      else if ( $t \leq \frac{2T}{4}$  and  $t > \frac{T}{4}$ ) then
15:         $x_{(i,j)}(t+1) = Best_j(t) \times x_{(i,j)}(t) \times ES(t) \times rand$ ,  $\triangleright$  {Belly walking}
16:      else if ( $t \leq \frac{3T}{4}$  and  $t > \frac{2T}{4}$ ) then
17:         $x_{(i,j)}(t+1) = Best_j(t) \times P_{(i,j)}(t) \times rand$ ,  $\triangleright$  {Hunting coordination}
18:      else
19:         $x_{(i,j)}(t+1) = Best_j(t) - \eta_{(i,j)}(t) \times \epsilon \times R_{(i,j)}(t) \times rand$ ,  $\triangleright$  {Hunting cooperation}
20:      end if
21:    end for
22:  end for
23:   $t=t+1$ 
24: end while
25: Return the best solution ( $Best(X)$ ).

```

Figure IV-3:Pseudocode du Reptile Search Algorithm (RSA)[65].

VI.2.5 Complexité temporelle du RSA :

La complexité du RSA développé dépend de la complexité de trois paramètres principaux (c. Notez que la complexité de calcul du processus d'initialisation, avec N solutions, est $O(N)$. La complexité de calcul des processus avec mise à jour c'est $O(T \times N) + O(T \times N \times D)$

Par conséquent, la complexité de calcul du RSA proposé est la suivante.

$$O(RSA) = O(N \times (T \times D + 1)) \quad (4.10)$$

Ou, T représente le nombre d'itération, N présente le nombre de solutions utilisées et D présente le nombre de solutions utilisées.

VI.3 Optimisation des essaims de thons (Tuna Swarm Optimization TSO)

Les problèmes d'optimisation du monde réel sont devenus plus difficiles, ce qui nécessite des méthodes de résolution plus efficaces. Différents chercheurs ont étudié diverses approches pour résoudre ces problèmes complexes et difficiles du monde réel. Une partie des chercheurs résolvent ces problèmes d'optimisation en utilisant des méthodes traditionnelles telles que les méthodes de programmation quasi-Newton, à gradient conjugué et quadratique séquentiel.

Cependant, en raison des caractéristiques non linéaires et non productives de la plupart des problèmes d'optimisation du monde réel et de l'implication de plusieurs variables de décision et de contraintes complexes, ces algorithmes traditionnels sont difficiles à résoudre efficacement [67, 68]. Les algorithmes méta heuristiques sont généralement classés en trois catégories [69] : les algorithmes basés sur l'évolution, les algorithmes basés sur la physique et les algorithmes basés sur l'essaim.

Les algorithmes basés sur l'essaim sont inspirés du comportement social de différentes espèces dans des groupes naturels. L'optimisation des essaims de particules (PSO) [70] et l'optimisation des colonies de fourmis (ACO) [71] sont deux algorithmes typiques basés sur les essaims. PSO et ACO imitent le comportement d'agrégation des colonies d'oiseaux et le comportement de recherche de nourriture des colonies de fourmis, respectivement.

Dans cette partie nous allons présenter une nouvelle méta heuristique basée sur les essaims est présenté, appelée optimisation des essaims de thons (TSO). Il s'inspire de deux types de comportement de recherche de nourriture en essaim de thons [72].

VI.3.1 Inspiration du Tuna Swarm Optimization (TSO):

Le thon, nommé scientifiquement Thunnini, est un poisson carnivore marin. Il existe de nombreuses espèces de thon, et la taille varie considérablement. Les thons sont des prédateurs marins de premier plan, se nourrissant d'une variété de poissons pélagiques et de surface, les thons sont des nageurs continus et ils ont une façon unique et efficace de nager (appelée forme en queue de poisson) dans laquelle le corps reste rigide tandis que la longue et fine queue oscille rapidement. Bien que le thon seul nage très vite, il n'est toujours pas aussi rapide que la réponse agile des petits poissons. Par conséquent, le thon utilisera la méthode du « voyage en groupe » pour la prédation. Ils utilisent leur intelligence pour trouver et attaquer leurs proies. Ces créatures ont développé une variété de stratégies de recherche de nourriture efficaces et intelligentes. La première stratégie est la recherche de nourriture en spirale. Lorsque les thons se nourrissent, ils nagent en formant une formation en spirale pour entraîner leurs proies dans des eaux peu profondes où ils peuvent être attaqués plus facilement.

La deuxième stratégie est la recherche de nourriture parabolique. Chaque thon nage après l'individu précédent, formant une forme parabolique pour enfermer sa proie.

Le thon se nourrit avec succès par les deux méthodes ci-dessus, un nouvel algorithme d'optimisation méta heuristique basé sur les essaims, à savoir l'optimisation des essaims de thons, est proposé sur la base de la modélisation de ces comportements naturels de recherche de nourriture [72].

VI.3.2 Modèle mathématique recherche en spirale :

Semblable à la plupart des métas heuristiques basées sur l'essaim, TSO démarre le processus d'optimisation en générant des populations initiales au hasard de manière uniforme dans l'espace de recherche,

$$X_i^{int} = rand(ub - lb) + lb, \quad i = 1, 2, \dots, NP \quad (4.11)$$

Où, X_i^{int} c'est i^{emme} individu initial, ub et lb sont les limites supérieure et inférieure de l'espace de recherche, NP est le nombre de populations de thon, et $rand$ est un vecteur aléatoire uniformément distribué allant de 0 à 1.

Lorsque des sardines, des harengs et d'autres petits poissons en banc rencontrent des prédateurs, tout le banc de poissons forme une formation dense changeant constamment la direction de la nage, ce qui rend difficile pour les prédateurs de verrouiller une cible. A ce moment, le groupe de thon chasse la proie en formant une formation en spirale serrée. Bien que la plupart des poissons du banc aient peu de sens de l'orientation, lorsqu'un petit groupe de poissons nage fermement dans une certaine direction, les poissons voisins ajustent leur direction l'un après l'autre et forment finalement un grand groupe avec le même objectif et commencent à chasser. En plus de poursuivre leur proie en spirale, les bancs de thon échangent également des informations entre eux. Chaque thon suit le poisson précédent, permettant ainsi le partage d'informations entre les thons voisins. Sur la base des principes ci-dessus, la formule mathématique de la stratégie de recherche de nourriture en spirale est la suivante :

$$X_{best}^t \begin{cases} \alpha_1 \cdot (X_{best}^t + \beta |X_{best}^t - X_i^t|) + \alpha_2 \cdot X_i^t, & i = 1 \\ \alpha_1 \cdot (X_{best}^t + \beta |X_{best}^t - X_{i-1}^t|) + \alpha_2 \cdot X_{i-1}^t, & i = 2, 3, \dots, NP \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\alpha_1 = a + (1 - a) \frac{t}{t_{max}} \quad (4.13)$$

$$\alpha_2 = (1 - a) - (1 - a) \frac{t}{t_{max}} \quad (4.14)$$

$$\beta = e^{bi} \cdot \cos(2\pi b) \quad (4.15)$$

$$l = e^{3 \cos\left(\left(\left(t_{max} + \frac{1}{t}\right) - 1\right)\pi\right)} \quad (4.16)$$

où X_i^{t+1} est le i ème individu de la $t + 1$ itération, X_{best}^t est l'individu optimal actuel (nourriture), α_1 et α_2 sont des coefficients de poids qui contrôlent la tendance des individus à se rapprocher de l'individu optimal et de l'individu précédent, a est une constante utilisée pour déterminer dans quelle mesure les thons suivent l'individu optimal et le individu précédent dans la phase initiale, t désigne le nombre d'itérations en cours, t_{max} est les itérations maximales et b est un nombre aléatoire uniformément réparti entre 0 et 1. Lorsque tous les thons se nourrissent en spirale autour de la nourriture, ils ont une bonne capacité d'exploitation pour le espace de recherche autour de la nourriture. Cependant, lorsque l'individu optimal ne parvient pas à trouver de la nourriture, suivre aveuglément l'individu optimal pour se nourrir est pas

propice à la recherche de nourriture en groupe. Par conséquent, nous envisageons de générer une coordonnée aléatoire dans l'espace de recherche comme point de référence pour la recherche en spirale, il permet à chaque individu de rechercher un espace plus large et rend TSO avec une capacité d'exploration globale, le modèle mathématique spécifique est décrit comme suit :

$$X_i^t \begin{cases} \alpha_1 \cdot (X_{rand}^t + \beta |X_{rand}^t - X_i^t|) + \alpha_2 \cdot X_i^t, & i = 1 \\ \alpha_1 \cdot (X_{rand}^t + \beta |X_{rand}^t - X_i^t|) + \alpha_2 \cdot X_{i=1}^t, & i = 2, 3, \dots, NP \end{cases} \quad (4.17)$$

Où, X_{rand}^t , est un point de référence généré aléatoirement dans l'espace de recherche.

En particulier, les algorithmes méta heuristiques effectuent généralement une exploration globale approfondie au début, puis passent progressivement à une exploitation locale précise. Par conséquent, TSO change les points de référence de la recherche de nourriture en spirale d'individus aléatoires à des individus optimaux à mesure que l'itération augmente. En résumé, le modèle mathématique final de la stratégie de recherche de nourriture en spirale est le suivant :

$$X_i^{t+1} \begin{cases} \alpha_1 \cdot (X_{rand}^t + \beta |X_{rand}^t - X_i^t|) + \alpha_2 \cdot X_i^t, & i = 1 \quad \text{if } rand < \frac{t}{t_{max}} \\ \alpha_1 \cdot (X_{rand}^t + \beta |X_{rand}^t - X_i^t|) + \alpha_2 \cdot X_{i=1}^t, & i = 2, 3, \dots, NP \\ \alpha_1 \cdot (X_{best}^t + \beta |X_{best}^t - X_i^t|) + \alpha_2 \cdot X_i^t, & i = 1 \quad \text{if } rand \geq \frac{t}{t_{max}} \\ \alpha_1 \cdot (X_{best}^t + \beta |X_{best}^t - X_i^t|) + \alpha_2 \cdot X_{i=1}^t, & i = 2, 3, \dots, NP \end{cases} \quad (4.18)$$

VI.3.3 Recherche de nourriture parabolique[72] :

En plus de se nourrir en formant une formation en spirale, les thons forment également une alimentation coopérative parabolique. Le thon forme une formation parabolique avec la nourriture comme point de référence. De plus, le thon chasse pour se nourrir en cherchant autour d'eux-mêmes. Ces deux approches sont effectuées simultanément, avec l'hypothèse que la probabilité de sélection est de 50 % pour les deux, le modèle mathématique spécifique est décrit comme suit :

$$X_i^{t+1} \begin{cases} X_{best}^t + rand \cdot (X_{best}^t - X_i^t) + TF \cdot p^2 \cdot (X_{best}^t - X_i^t) & \text{if } rand < 0,5 \\ TF \cdot p^2 \cdot X_i^t, & \text{if } rand \geq 0,5 \end{cases} \quad (4.19)$$

$$p = \left(1 - \frac{t}{t_{max}}\right)^{\left(\frac{t}{t_{max}}\right)} \quad (4.20)$$

Où, TF est un nombre aléatoire avec une valeur de 1 ou - 1.

Le thon chasse en coopération grâce à deux stratégies de recherche de nourriture, puis trouve sa proie. Pour le processus d'optimisation de TSO, la population est d'abord générée aléatoirement dans l'espace de recherche. A chaque itération, chaque individu choisit

aléatoirement l'une des deux stratégies de recherche de nourriture à exécuter, ou choisit de régénérer la position dans l'espace de recherche selon la probabilité z .

La valeur du paramètre z sera discutée dans le paramétrage expériences de simulation. Pendant tout le processus d'optimisation, tous les individus de TSO sont continuellement mis à jour et calculés jusqu'à ce que la condition finale soit remplie, puis l'individu optimal et la valeur de fitness correspondante sont renvoyés.

Le pseudocode TSO est montré dans l'algorithme 1 figure 4, Le processus détaillé de TSO est montré dans la figure 5.

```

Input: the population size  $NP$  and maximum iteration  $t_{\max}$ 
Output: the location of food (the best individual) and its fitness value
Initialize the random population of tunas  $X_i^{\text{int}}$  ( $i = 1, 2, \dots, NP$ )
Assign free parameters  $a$  and  $z$ 
While ( $t < t_{\max}$ )
    Calculate the fitness values of tunas
    Update  $X_{\text{best}}^t$ 
    For (each tuna) do
        Update  $\alpha_1, \alpha_2, p$ 
        If ( $\text{rand} < z$ ) then
            Update the position  $X_i^{t+1}$  using equation (1)
        Else if ( $\text{rand} \geq z$ ) then
            If ( $\text{rand} < 0.5$ ) then
                If ( $t/t_{\max} < \text{rand}$ ) then
                    Update the position  $X_i^{t+1}$  using Equation (7)
                Else if ( $t/t_{\max} \geq \text{rand}$ ) then
                    Update the position  $X_i^{t+1}$  using Equation (2)
            Else if ( $\text{rand} \geq 0.5$ ) then
                Update the position  $X_i^{t+1}$  using Equation (9)
        End for
         $t = t + 1$ 
    End while
Return the best individual  $X_{\text{best}}$  and the best fitness value  $F(X_{\text{best}})$ .

```

Figure IV-4:Le Pseudocode of TSO[72].

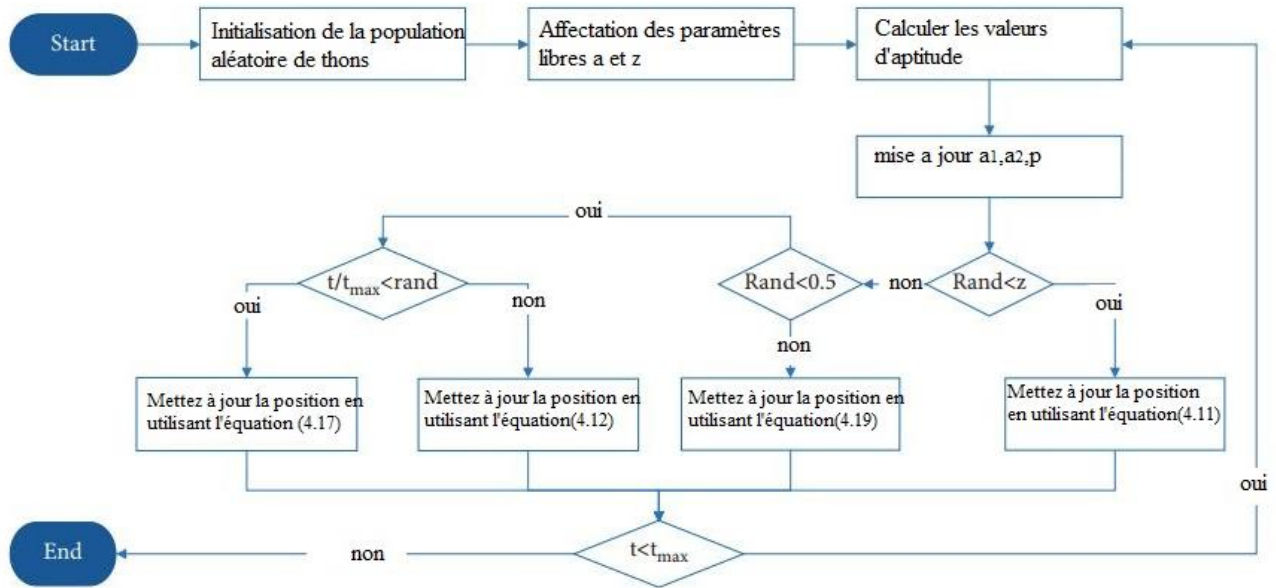


Figure IV-5: Organigramme de la méthode TSO[72].

VI.3.4 Les problèmes d'ingénierie avec TSO :

Utilise trois problèmes dans la conception technique pour évaluer la capacité de TSO à résoudre des problèmes du monde réel. Ces problèmes incluent le problème de conception des récipients sous pression, le problème de conception des ressorts de traction/compression et le problème de conception des poutres soudées. TSO utilise le même nombre d'itérations (1000) et de populations (50) pour résoudre ces problèmes de conception technique. Chaque problème est exécuté 30 fois indépendamment, et les résultats statistiques sont comparés avec d'autres algorithmes de la littérature[72].

Le problème de conception des récipients sous pression est un problème de conception d'essais de référence bien connu dans le but de réduire le coût total, le coût des matériaux et le coût de soudage.

Le problème de conception du ressort de traction/compression est un problème d'optimisation de la conception en génie mécanique, le problème consiste de réduire le poids du ressort. Il comprend quatre inégalités non linéaires.

Le problème de conception des poutres soudées est le problème classique d'optimisation structurelle. L'objectif de ce problème de conception est de minimiser le coût de fabrication de la poutre soudée.

VI.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté deux nouvelles méthodes méta-heuristiques la première appelée algorithme de recherche de reptiles (RSA), qui est motivée par le comportement de chasse du crocodile. Deux étapes principales du comportement du crocodile sont mises en œuvre, à savoir l'encerclement, qui est effectué par une marche haute ou une marche sur le ventre, et la chasse, qui est effectuée par une coordination de chasse ou une coopération de chasse. Ainsi, deux modèles mathématiques ont été introduits pour mettre à jour les positions des solutions candidates ; un pour la recherche diversifiée et un autre vers la région de recherche optimale

La deuxième est basé sur les essaims : l'optimisation des essaims de thons (TSO) est inspirée des mécanismes de recherche de nourriture coopératifs du thon, y compris la recherche de nourriture en spirale et la recherche de nourriture parabolique. La méthode a peu de paramètres réglables et peut être mise en œuvre facilement. TSO a été évalué de manière exhaustive à l'aide d'un ensemble de fonctions de référence dans différentes dimensions et a été comparé à d'autres algorithmes de pointe.

Résultats et discussion

V Résultats et discussion :

Dans cette section, grâce aux résultats obtenus à partir du calcul de la fonction objective Fitness qui indique la vitesse de l'endommagement dans une structure et Best qui indique le taux d'endommagement dans une structure, qui ont été calculés grâce à deux algorithmes d'optimisation (RSA, Reptile Search Algorithm) et (TSO, Tuna Swarm Optimization), nous avons établi des graphiques pour représenter les résultats de quantification des endommagements sur les deux structures :

- Une structure en treilles à (31) éléments en 2 D pour trois scénarios d'endommagements
 - Premier scénario : Élément (16) de cette structure est endommagé.
 - Deuxième scénario : les éléments (10) et (22) sont endommagés.
 - Troisième scénario : les éléments (15), (20) et (25) sont endommagés.

- Une structure en treilles à (28) éléments en 3D pour deux scénarios d'endommagements :
 - Premier scénario : Élément (1) de cette structure est endommagé.
 - Deuxième scénario : les éléments (13) et (9) sont endommagés.

Afin de réaliser une étude comparative, l'étude a été faite à la base d'indicateurs d'endommagement obtenus précédemment, en utilisant tous les modes propres de vibration. Nous avons fait varier les itérations (500,1000,2000) en variant les populations à (200,400,900) et vice versa.

V.1 Structure 31 éléments 2D

V.1.1 Premier scénario :

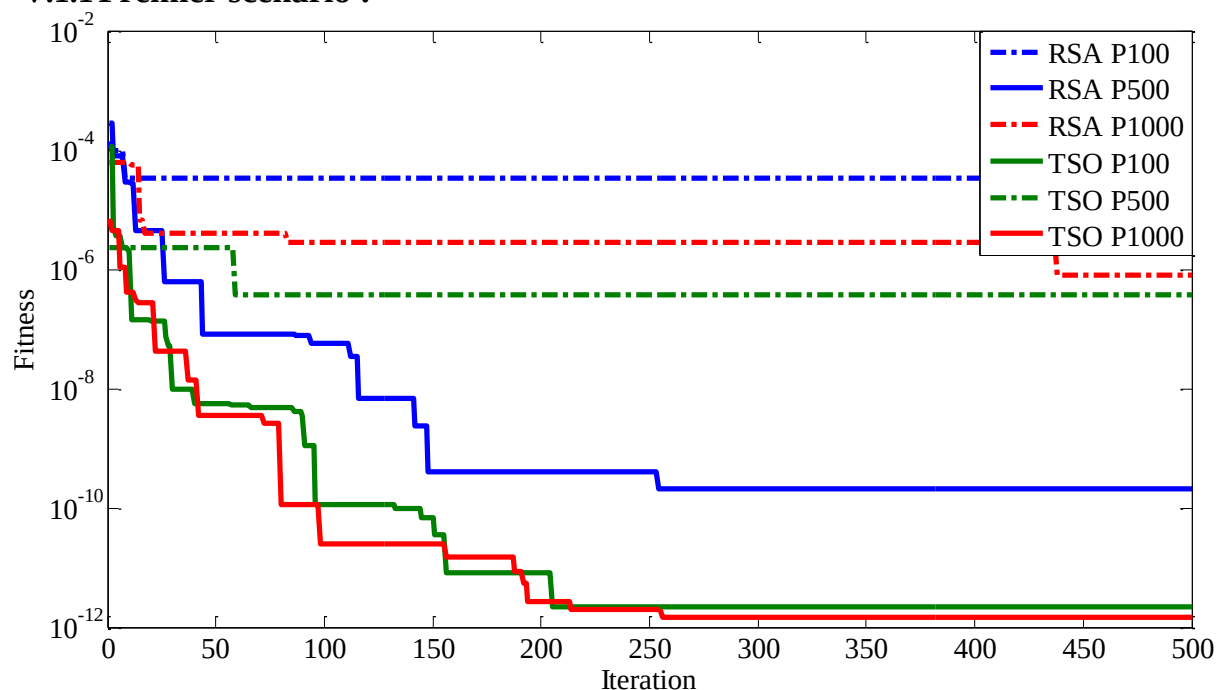


Figure V-1: Structure 2D 31 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 500 itérations.

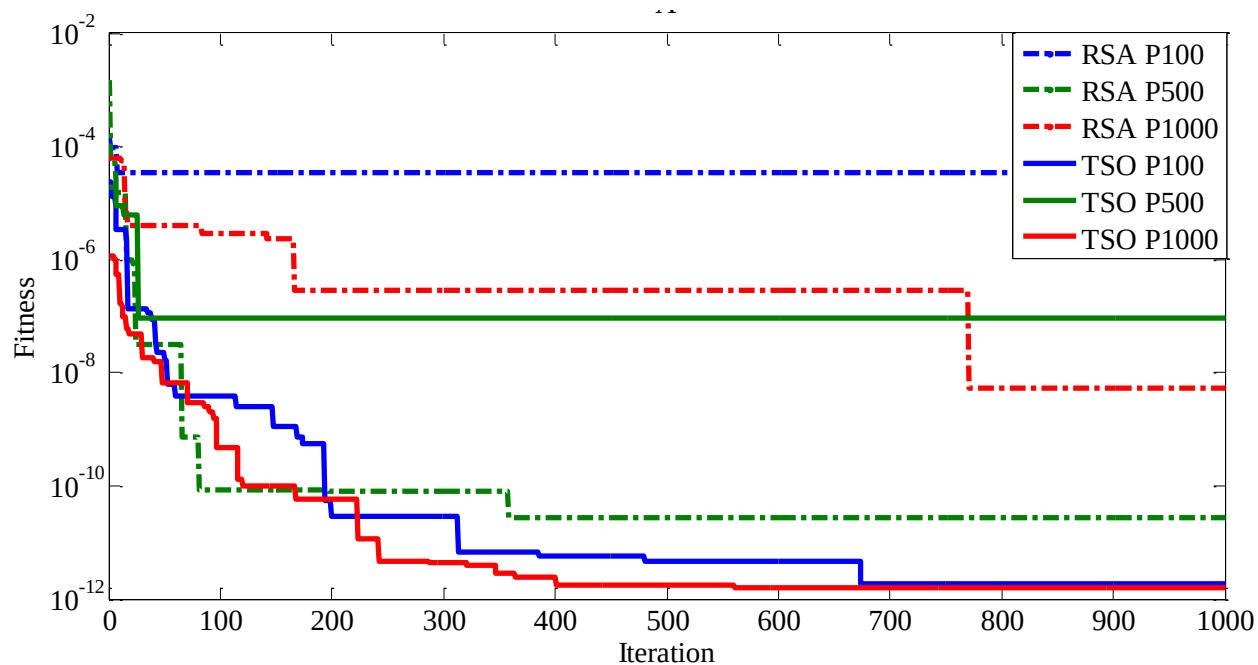


Figure V-2: Structure 2D 31 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 1000 itérations.

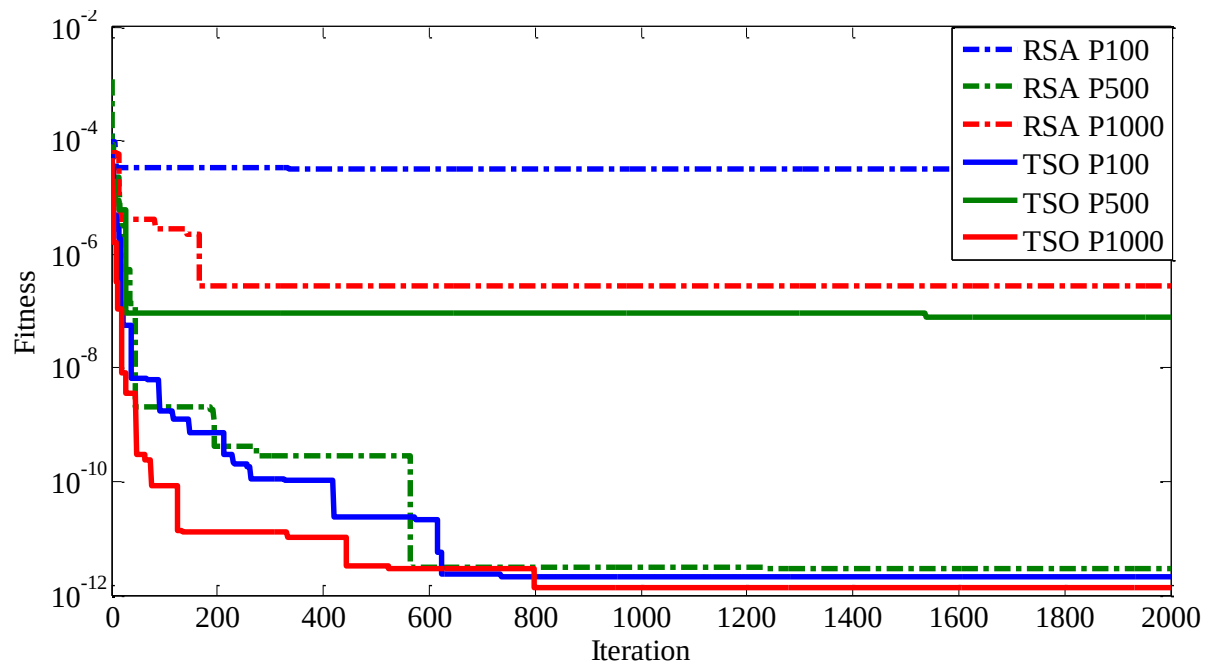


Figure V-3: Structure 2D 31 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 2000 itérations.

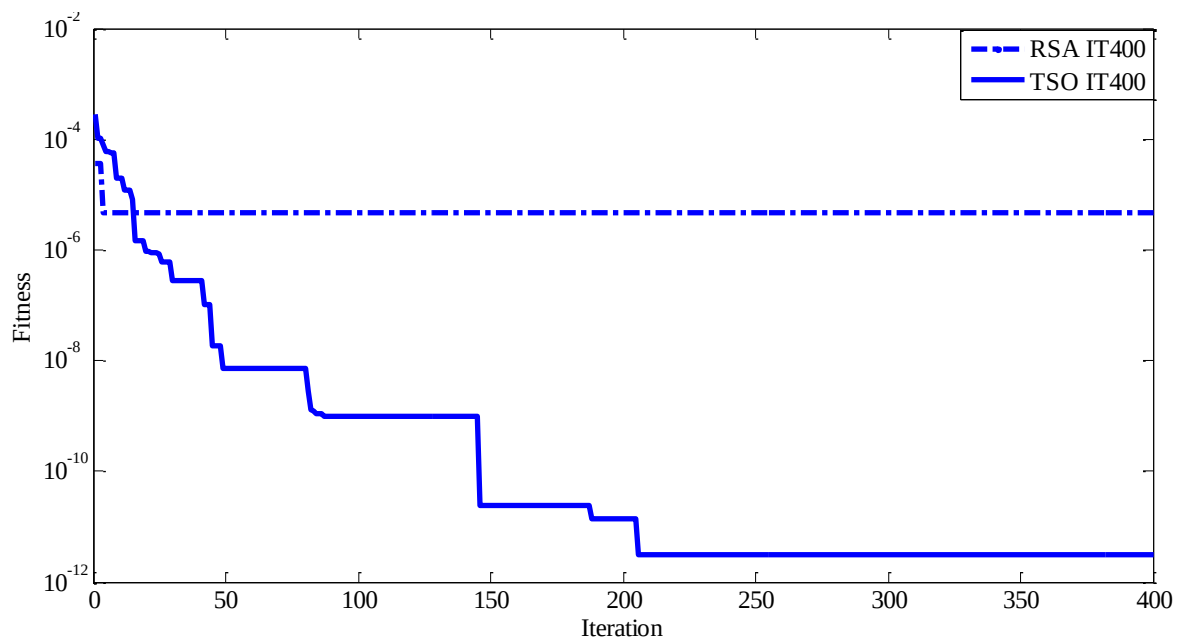


Figure V-4: Structure 2D 31 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 200 populations et 800 itérations.

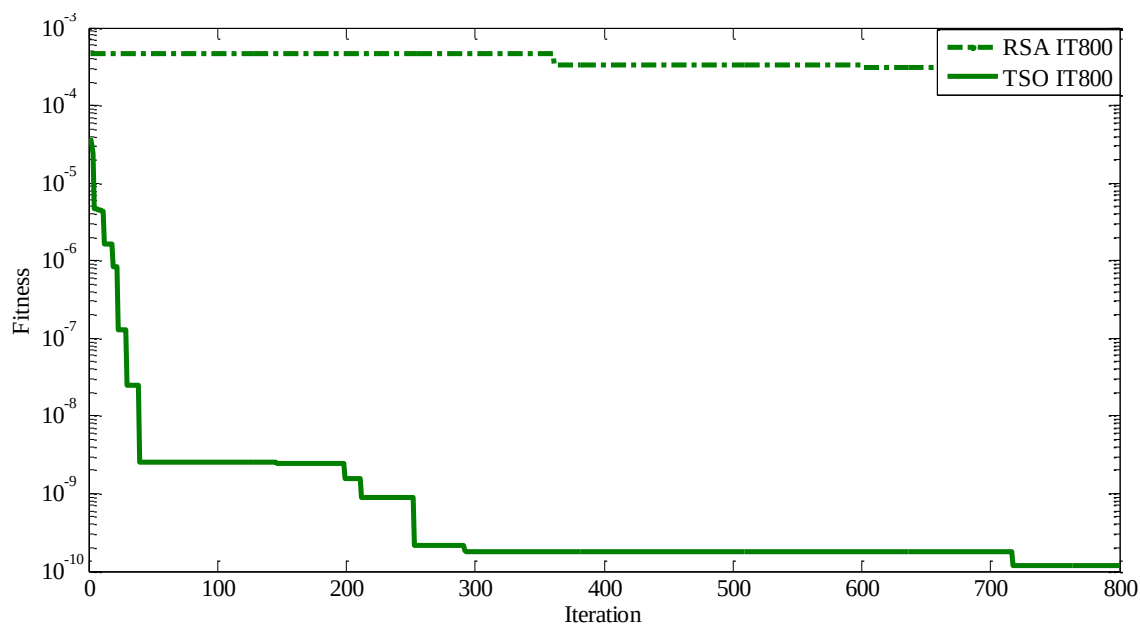


Figure V-5: Structure 2D 31 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 200 populations et 800 itérations.

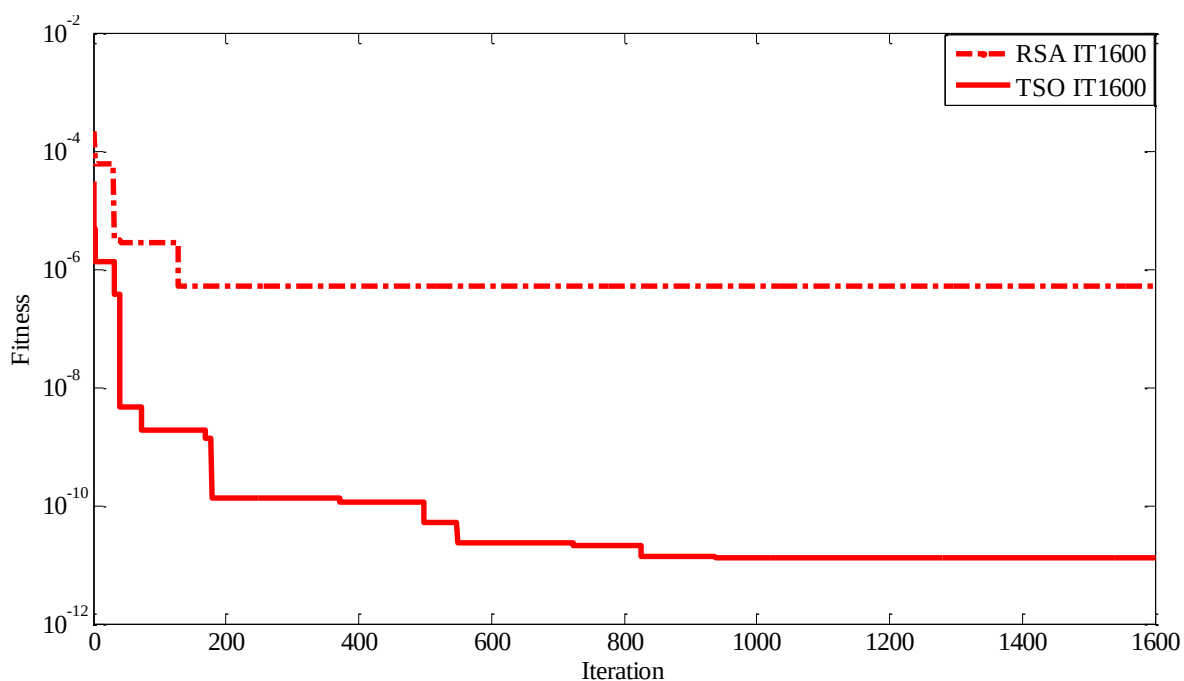


Figure V-6: Structure 2D 31 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 200 populations et 1600 itérations.

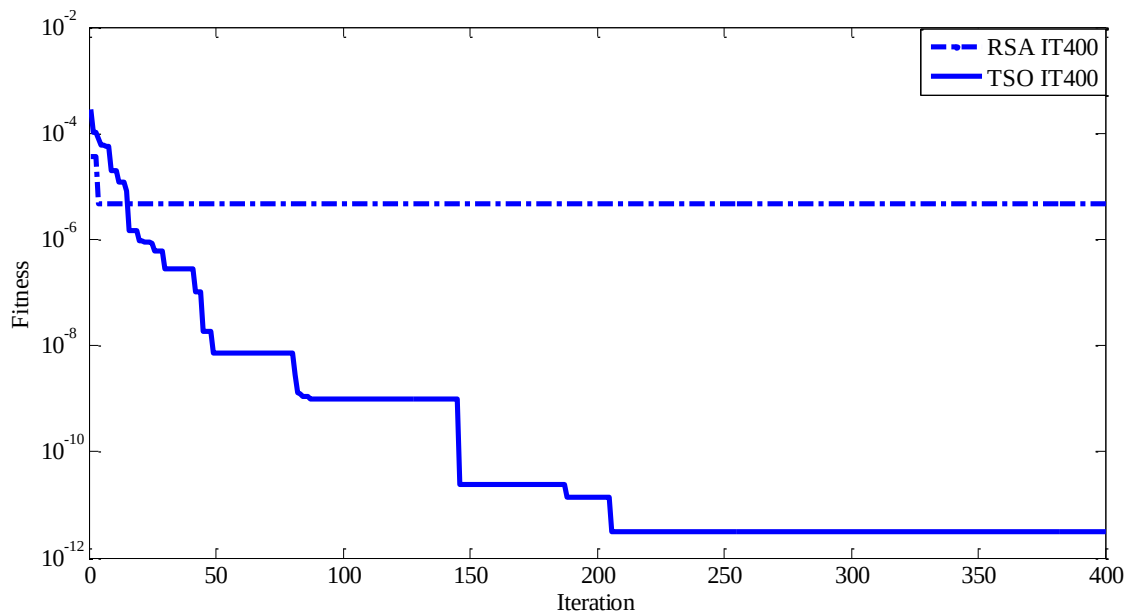


Figure V-7: Structure 2D 31 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 400 populations et 400 itérations.

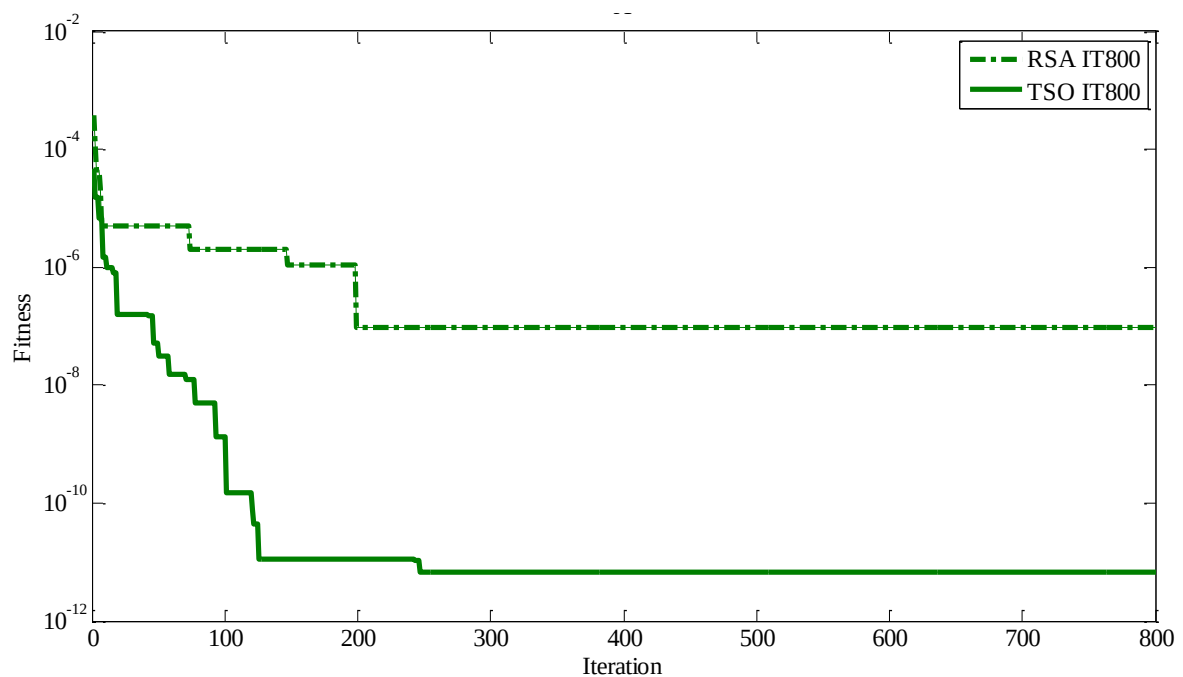


Figure V-8: Structure 2D 31 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 400 populations et 800 itérations.

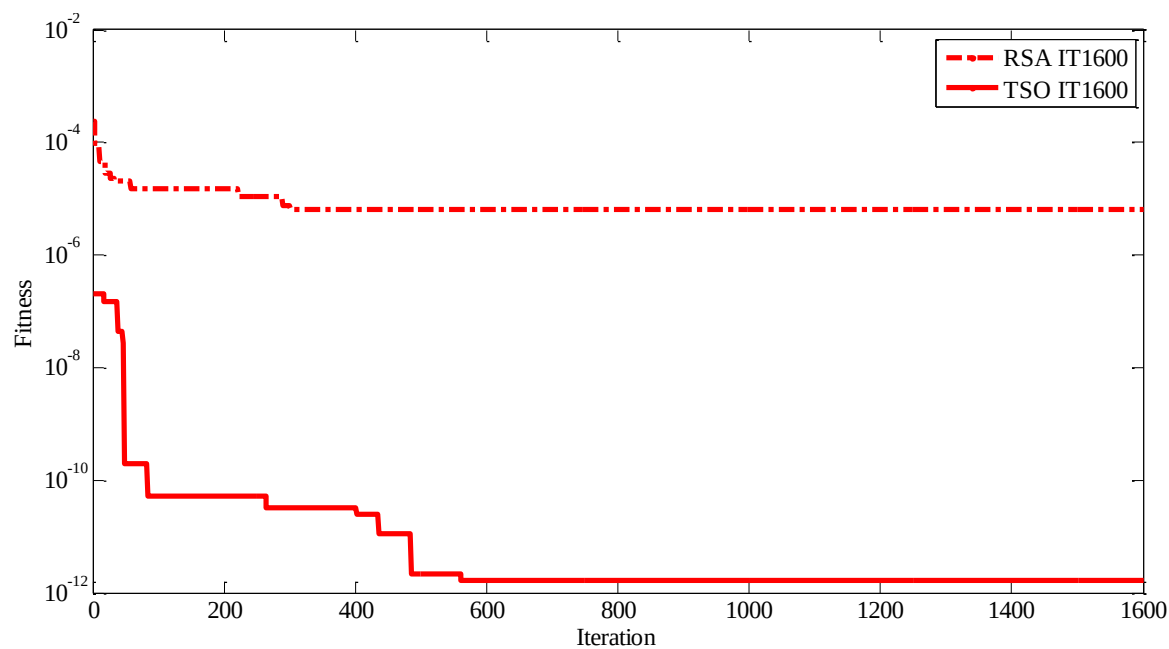


Figure V-9: Structure 2D 31 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 400 populations et 1600 itérations.

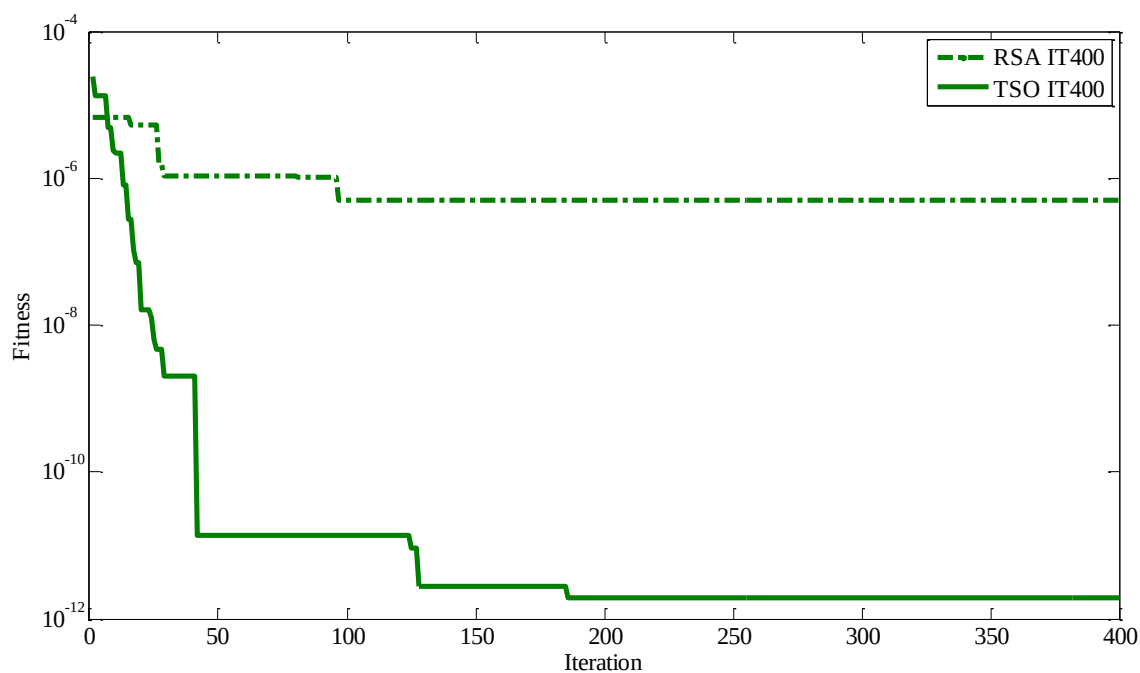


Figure V-10: Structure 2D 31 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 900 populations et 400 itérations.

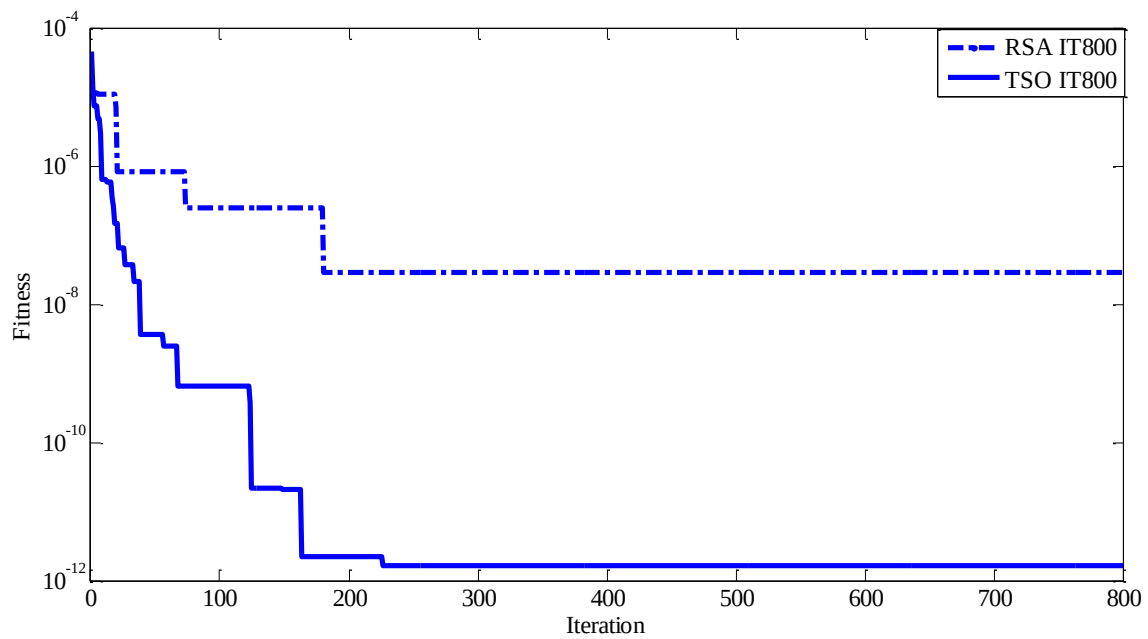


Figure V-11: Structure 2D 31 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 900 populations et 800 itérations.

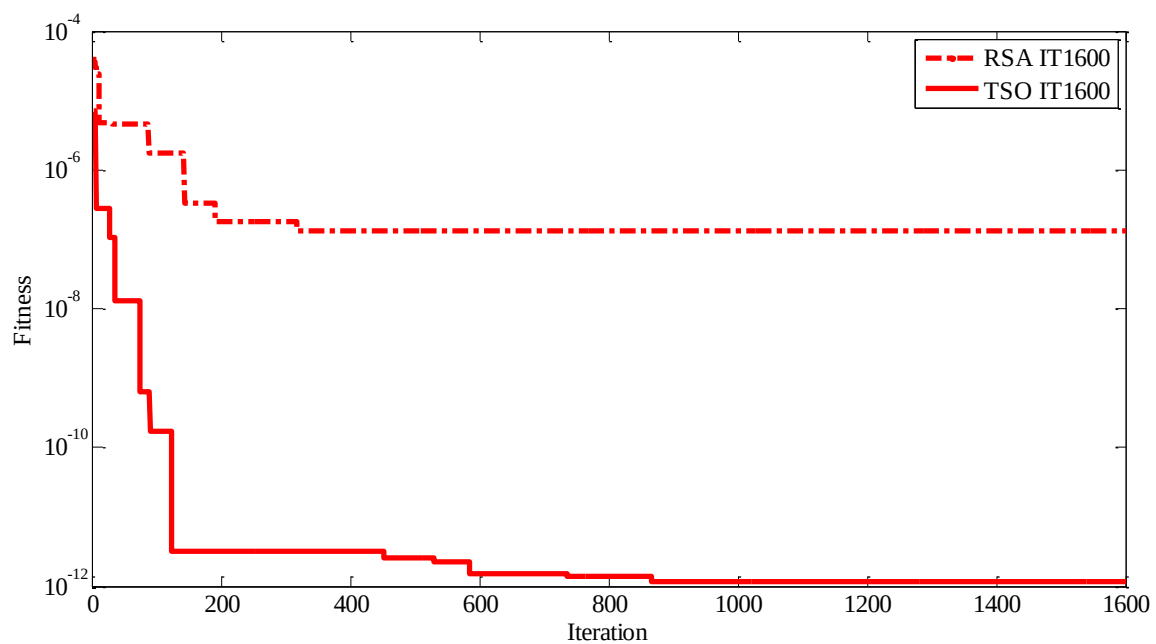


Figure V-12: Structure 2D 31 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 900 populations et 1600 itérations.

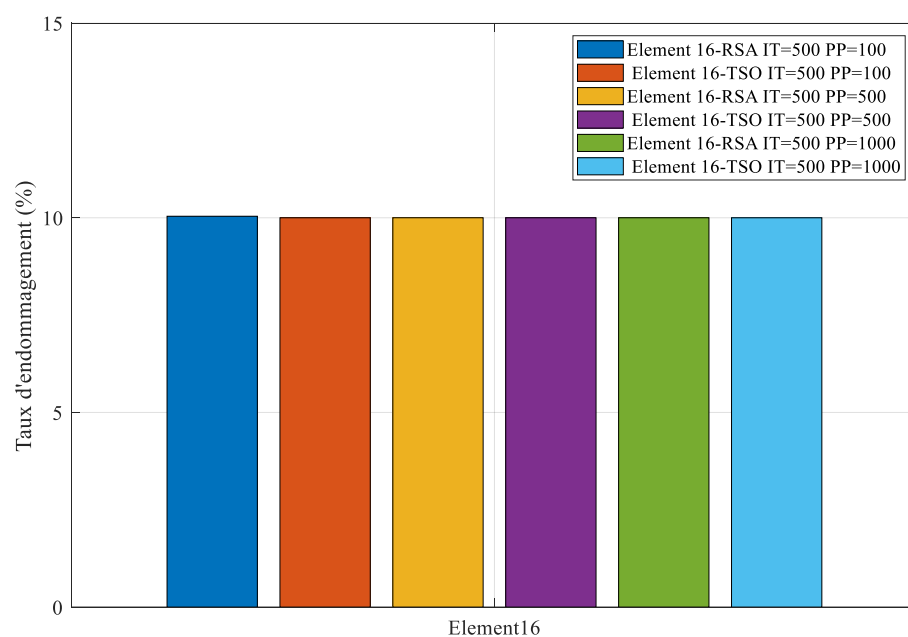


Figure V-13: Taux d'endommagement de l'élément 16 pour les itération fixées 500.

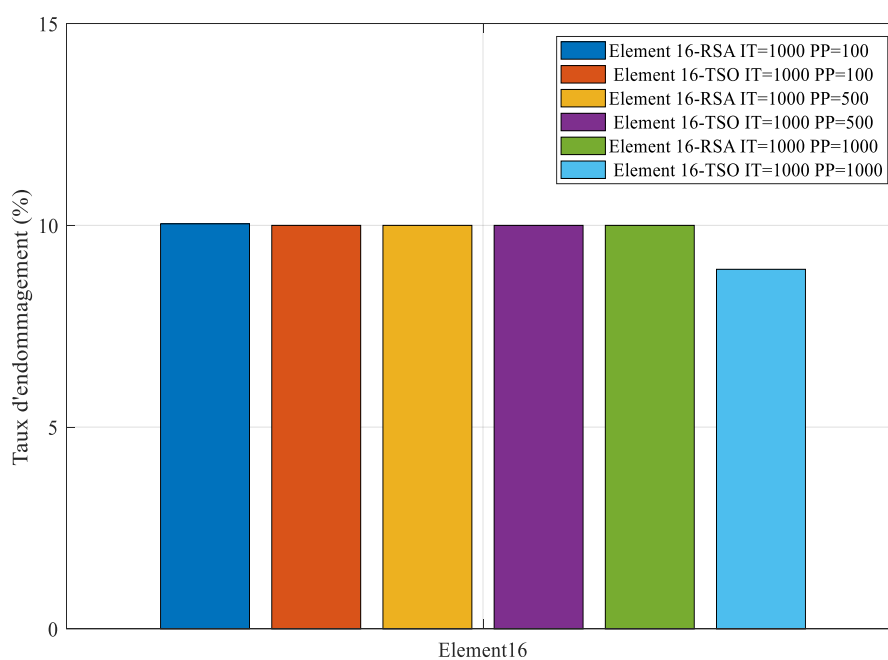


Figure V-14: Taux d'endommagement de l'élément 16 pour les itération fixées 1000.

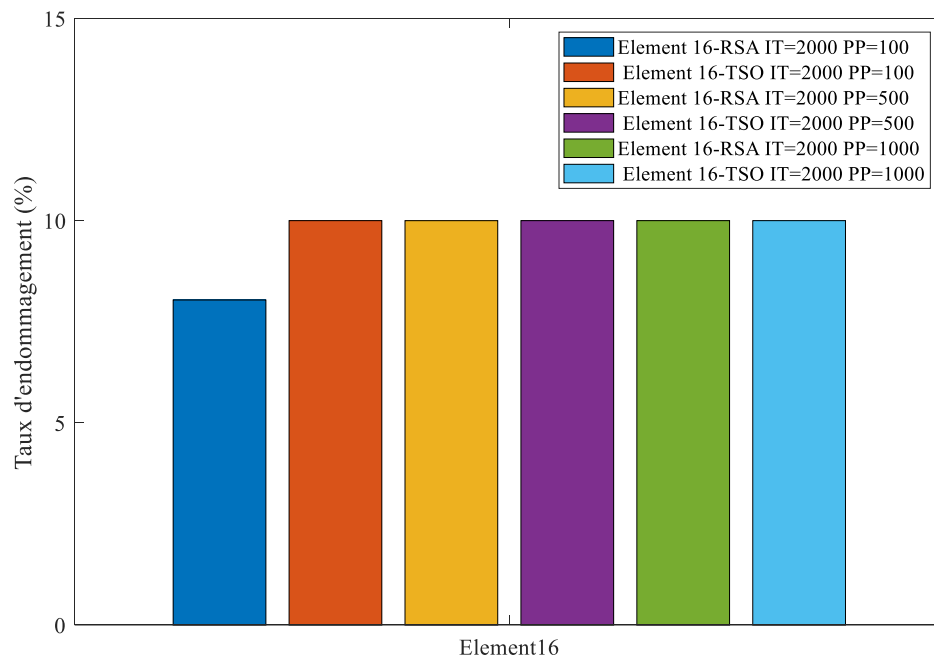


Figure V-15: Taux d'endommagement de l'élément 16 pour les itération fixées à 2000 .

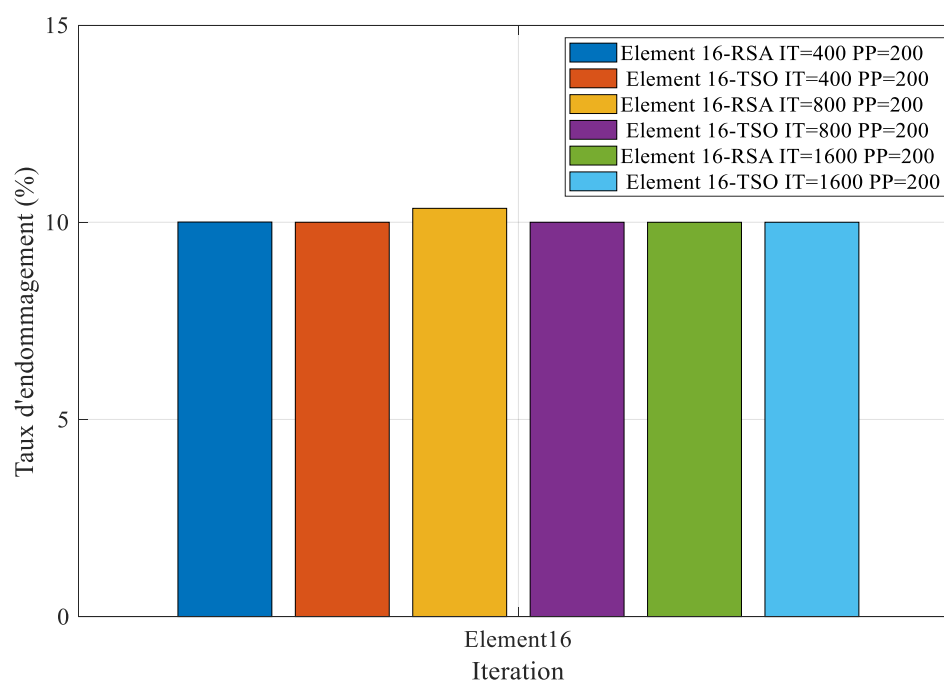


Figure V-16: Taux d'endommagement de l'élément 16 pour les population fixées à 200.

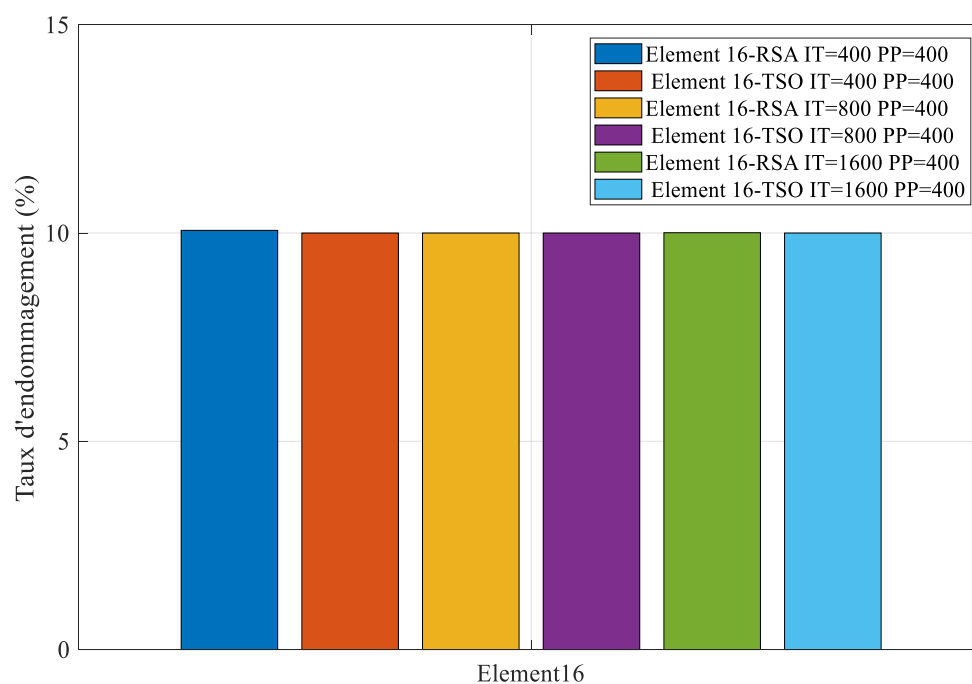


Figure V-17: Taux d'endommagement de l'élément 16 pour les population fixées à 400.

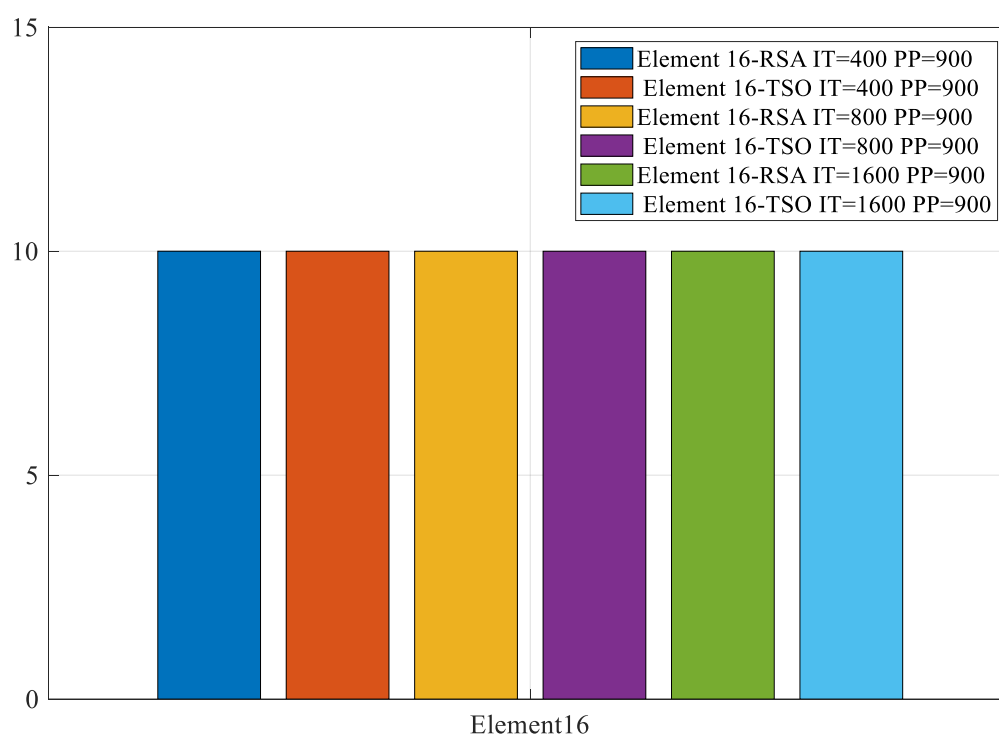


Figure V-18: Taux d'endommagement de l'élément 16 pour les population fixées à 900

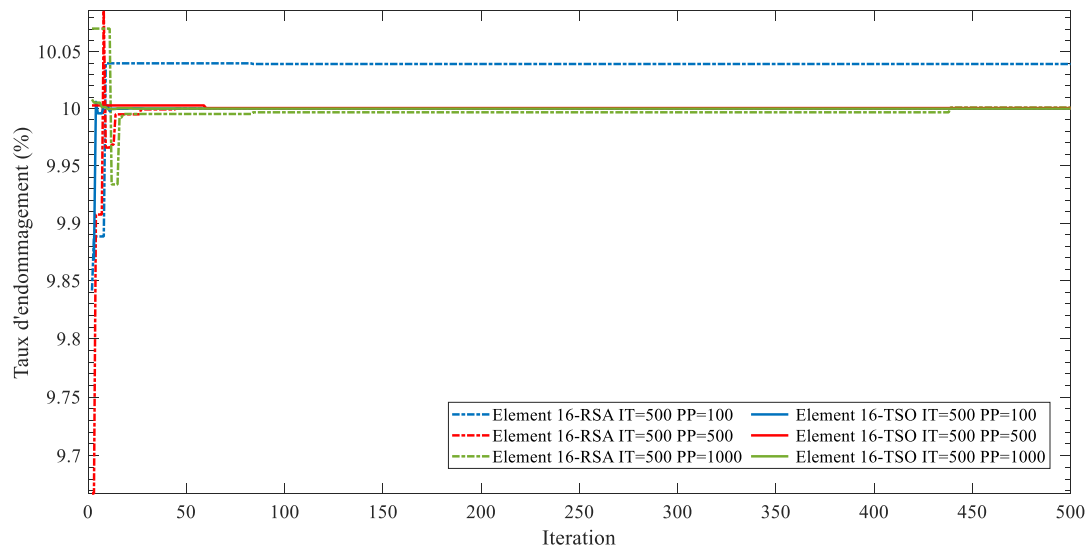


Figure V-19: Taux d'endommagement en fonction des itérations pour des Population de 100 500 et 1000 pour l'élément 16.

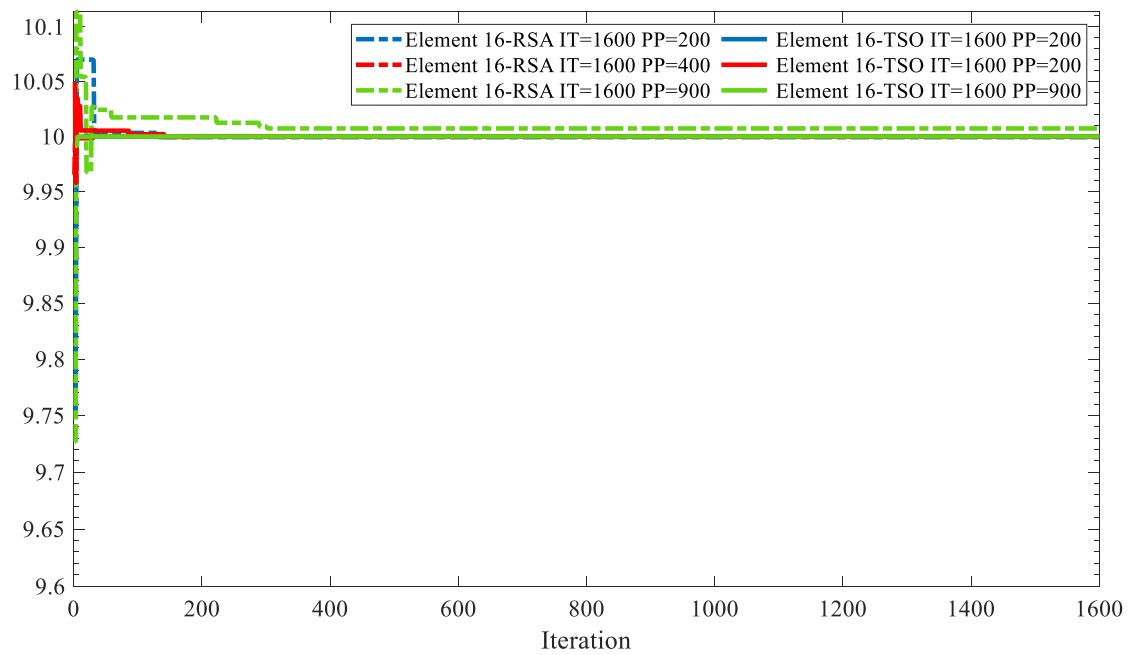


Figure V-20: Taux d'endommagement en fonction des itérations pour l'élément 16.

Temps Scénario 1 [s]						
populations	Itérations fixées à 500		Itérations fixées à 1000		Itérations fixées à 2000	
	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
100	825.3	829.8	1585,4	1579,7	3107,3	3035,8
500	3910,6	3644	8066,1	19211	15715	15466
1000	7921,6	7817,5	15572	15449	30837	30357

Tableau V-1: Temps de calcul pour le premier scénario d'endommagement.

Dans ce premier cas d'optimisation nous avons étudié le premier scénario avec nos deux algorithmes RSA et TSO, on constate que la méthode TSO est largement précise dans le calcul d'erreur cela est montré dans ça convergence nettement élevée par rapport à RSA, pour les résultats des taux d'endommagements on remarque TSO se stabilise rapidement et donne des résultats plus précis en comparant avec la méthode de RSA, pour le temps de calcul RSA a effectué l'optimisation avec une rapidité remarquable en comparant aux temps de TSO.

V.1.2 Deuxième scénario d'endommagement

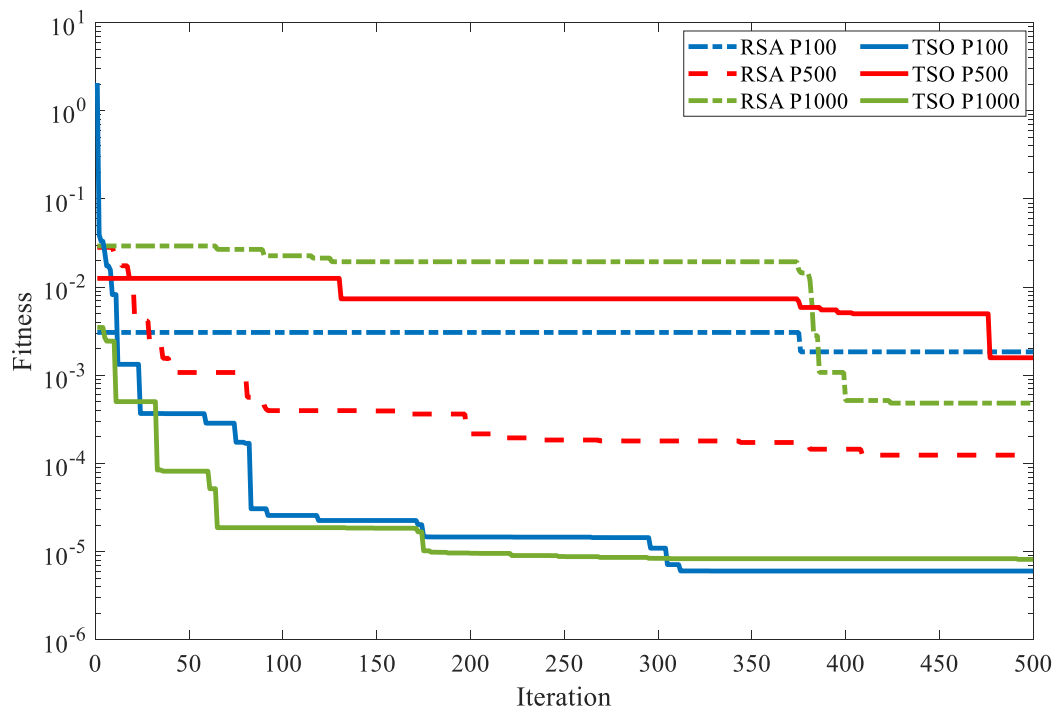


Figure V-21: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 500 itérations.

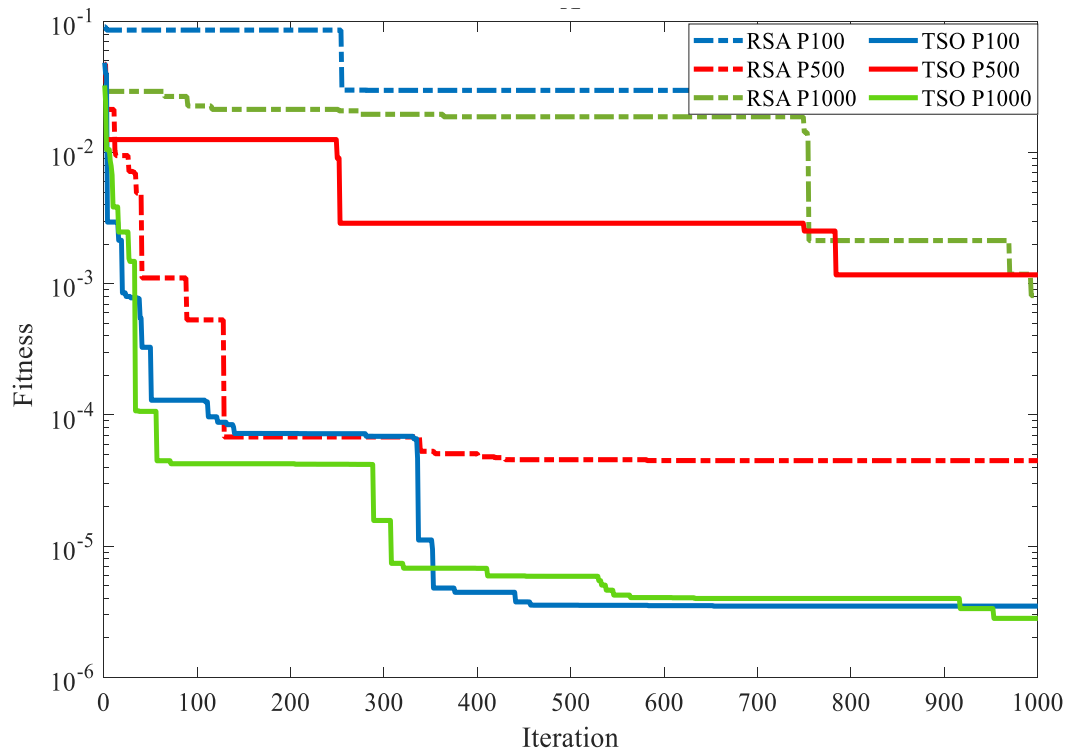


Figure V-22: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 1000 itérations.

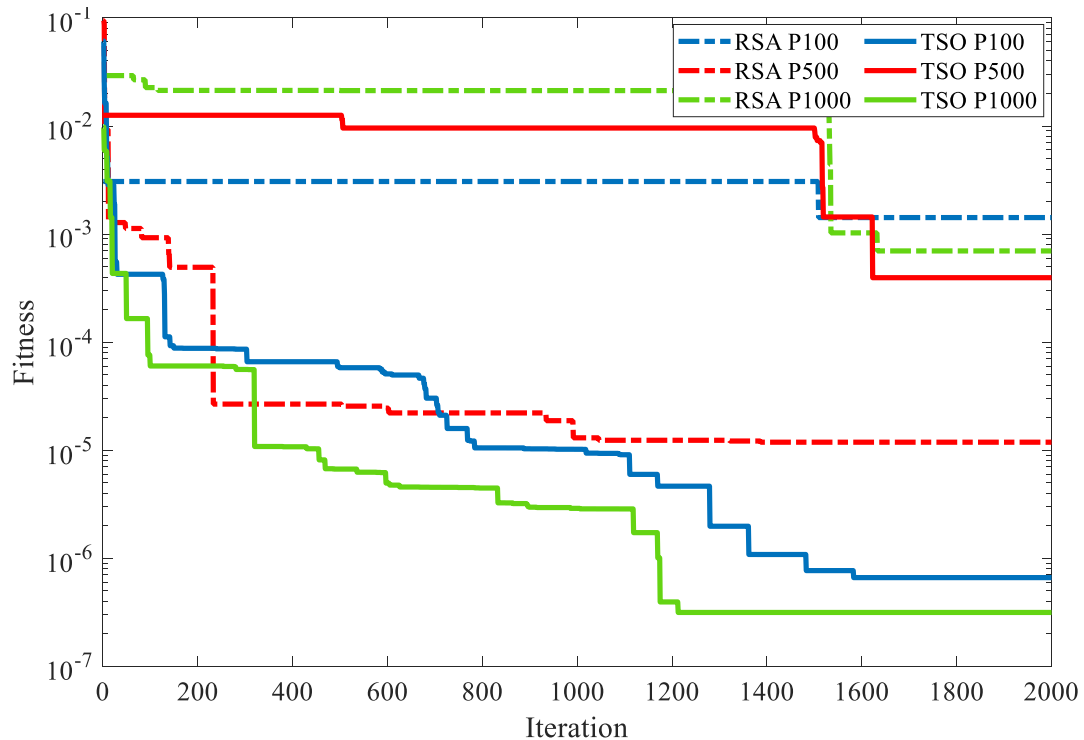


Figure V-23: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 2000 itérations.

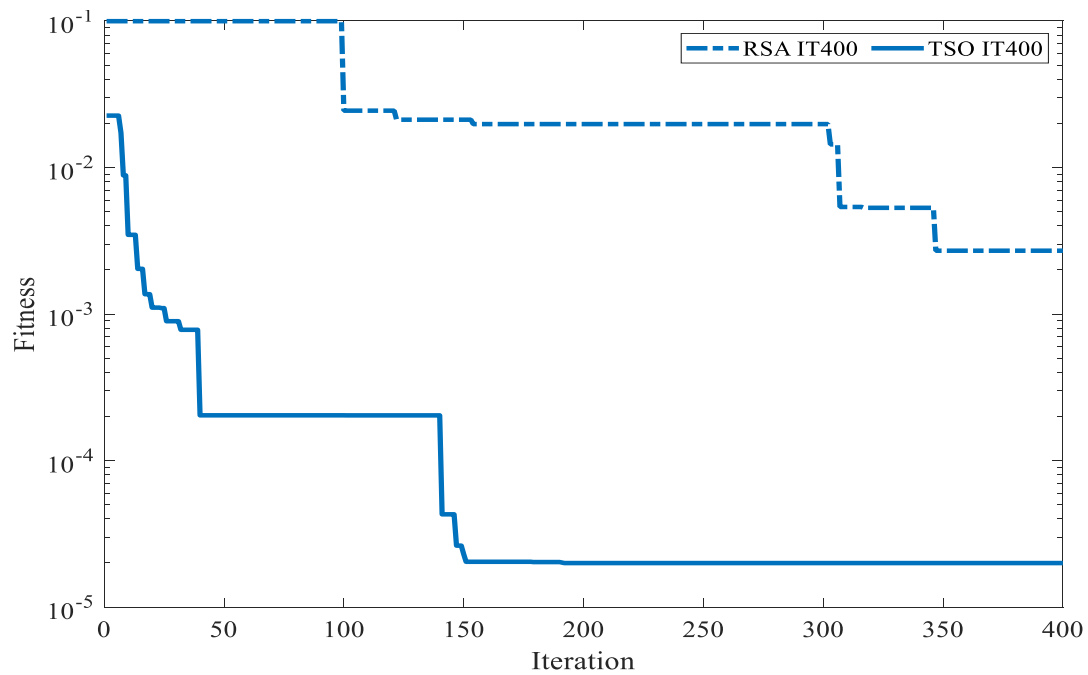


Figure V-24: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 200 populations et 400 itérations.

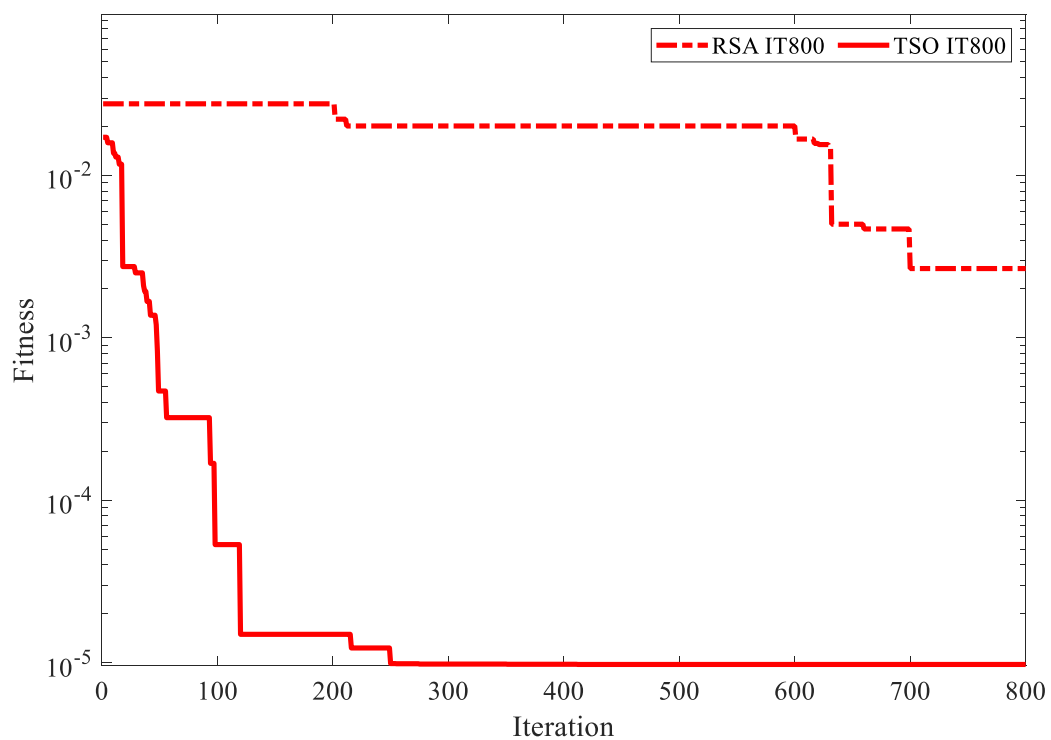


Figure V-25: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 200 populations et 800 itérations.

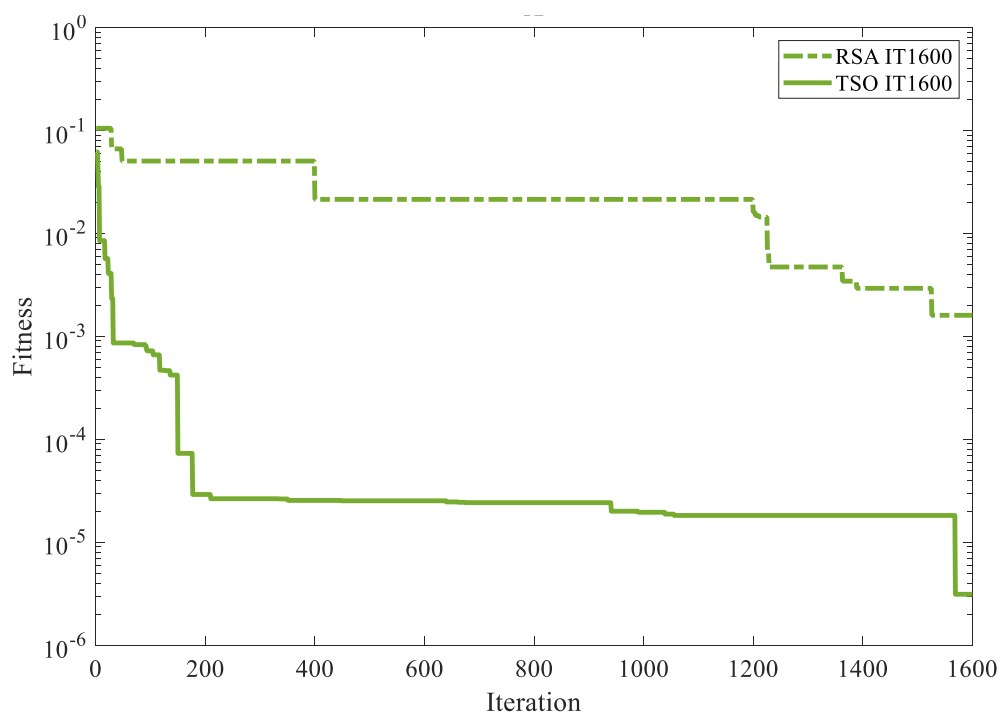


Figure V-26: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 200 populations et 1600 itérations.

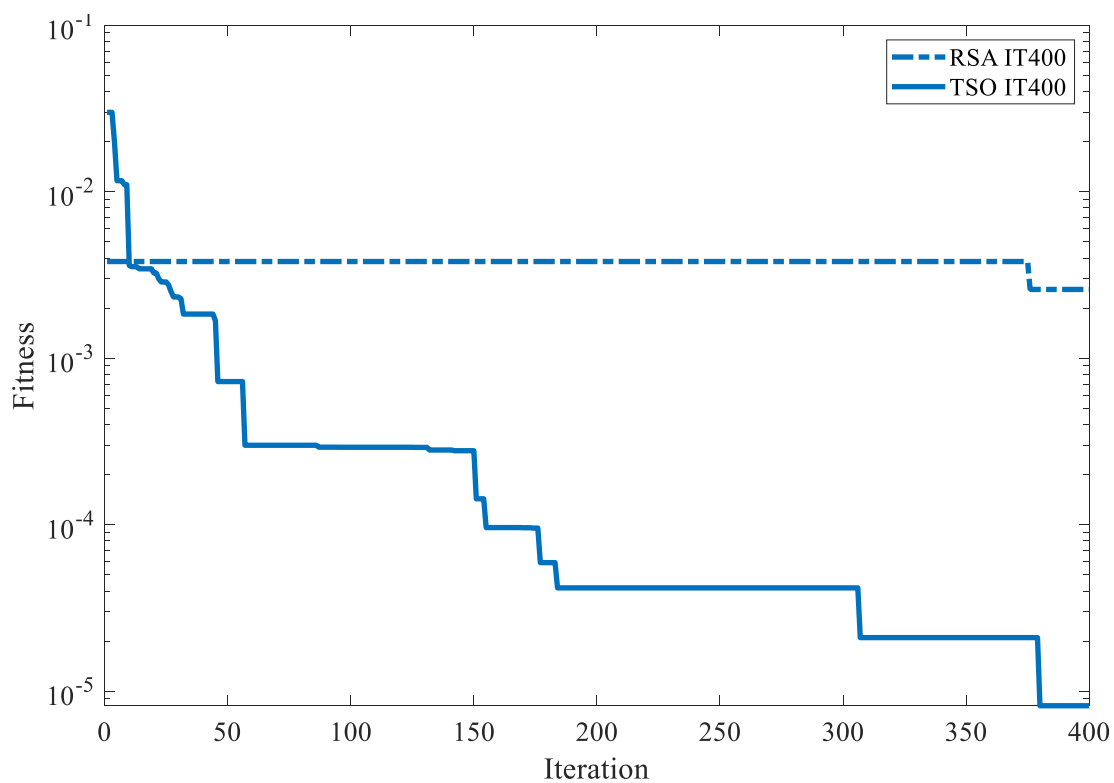


Figure V-27: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 400 populations et 400 itérations.

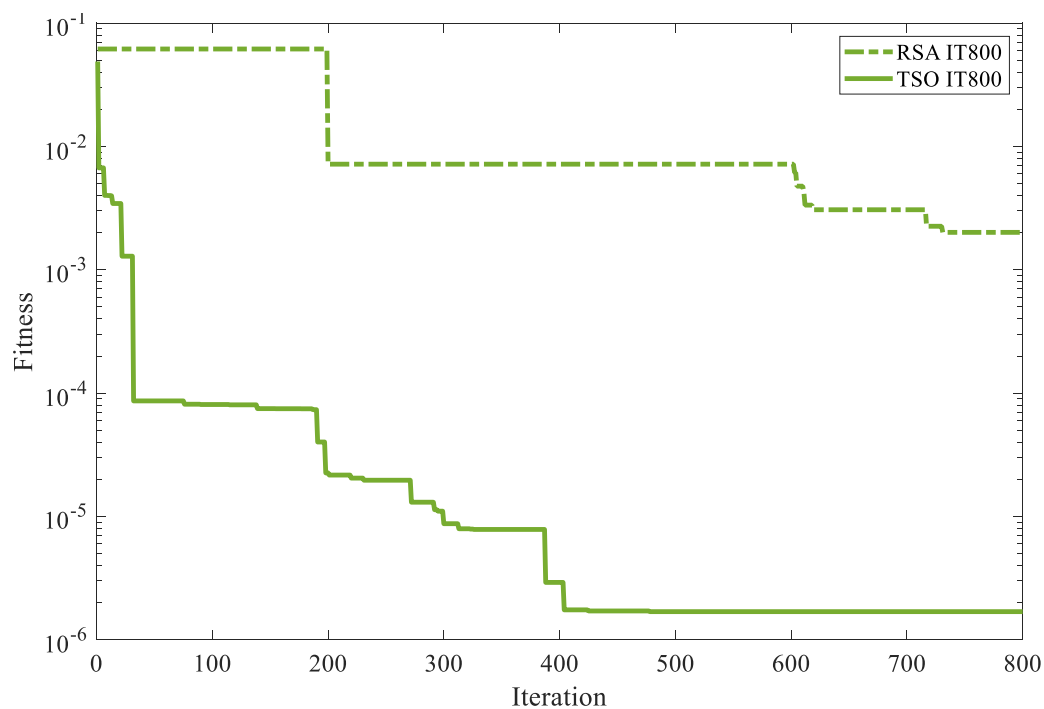


Figure V-28: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 400 populations et 800 itérations.

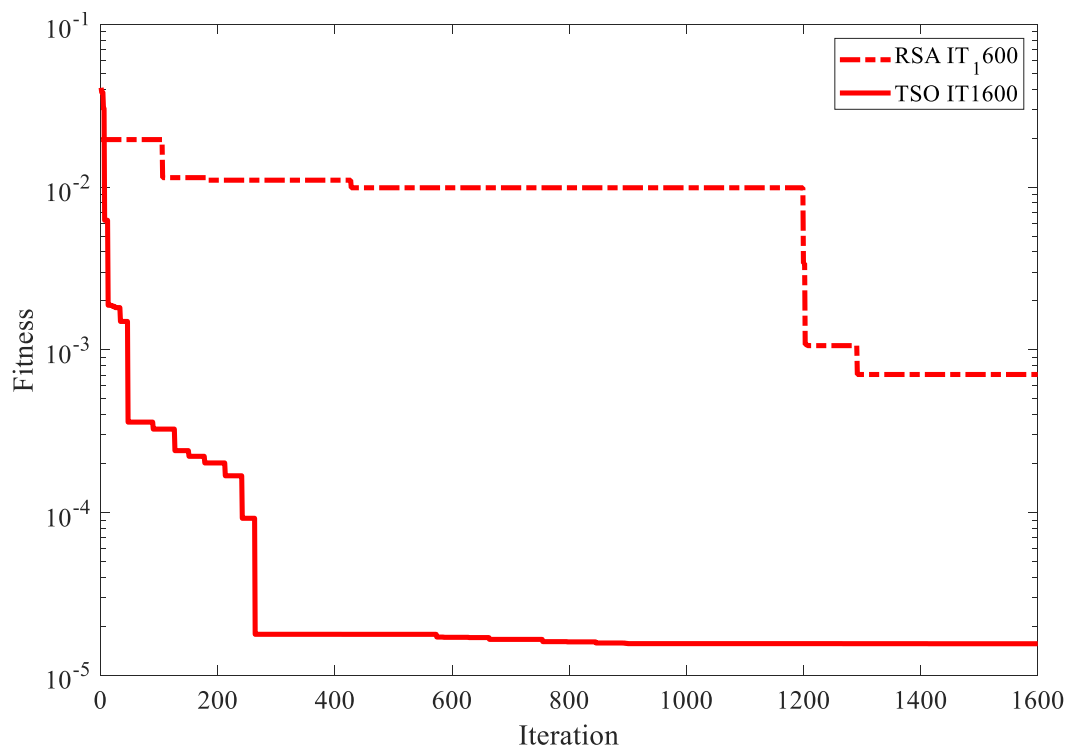


Figure V-29: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 400 populations et 1600 itérations.

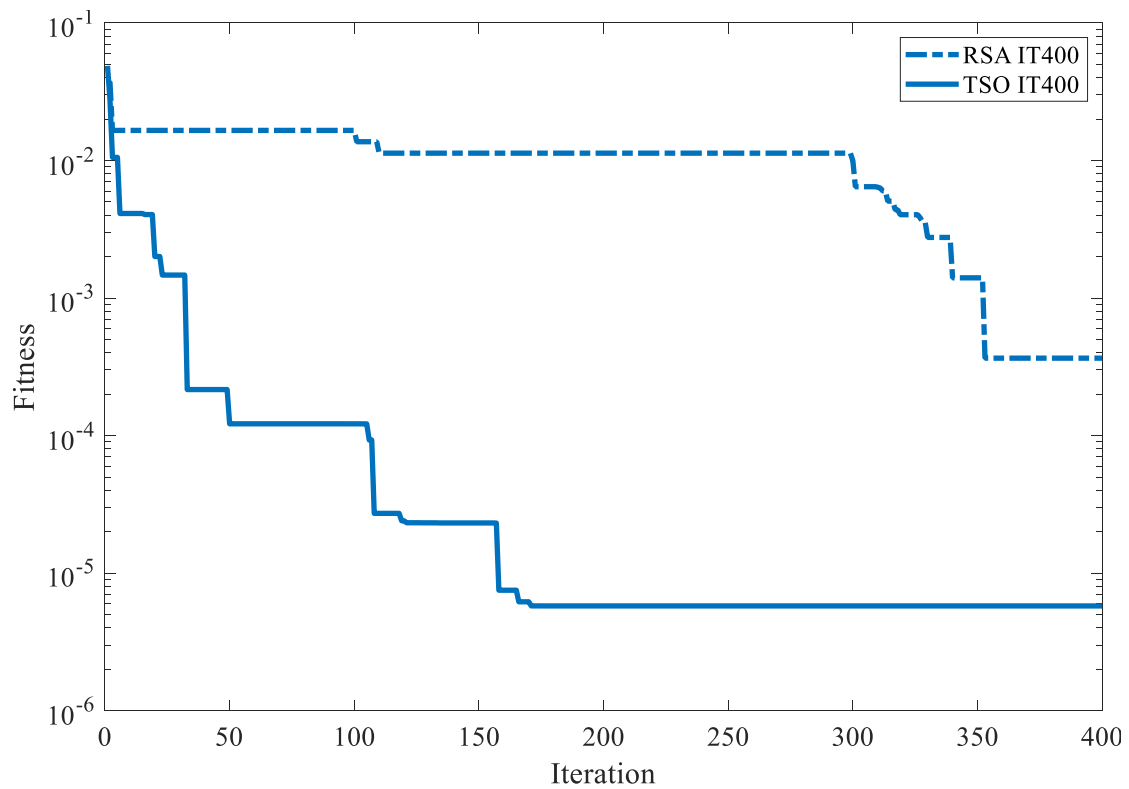


Figure V-30: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 900 populations et 400 itérations.

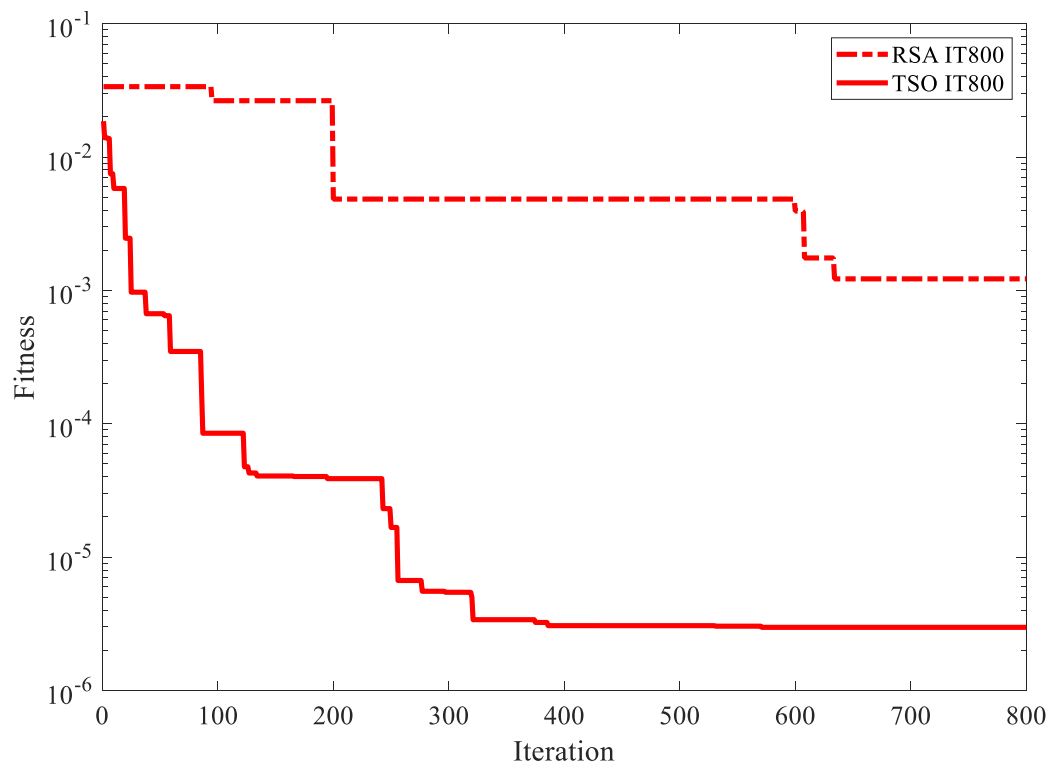


Figure V-31: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 900 populations et 800 itérations.

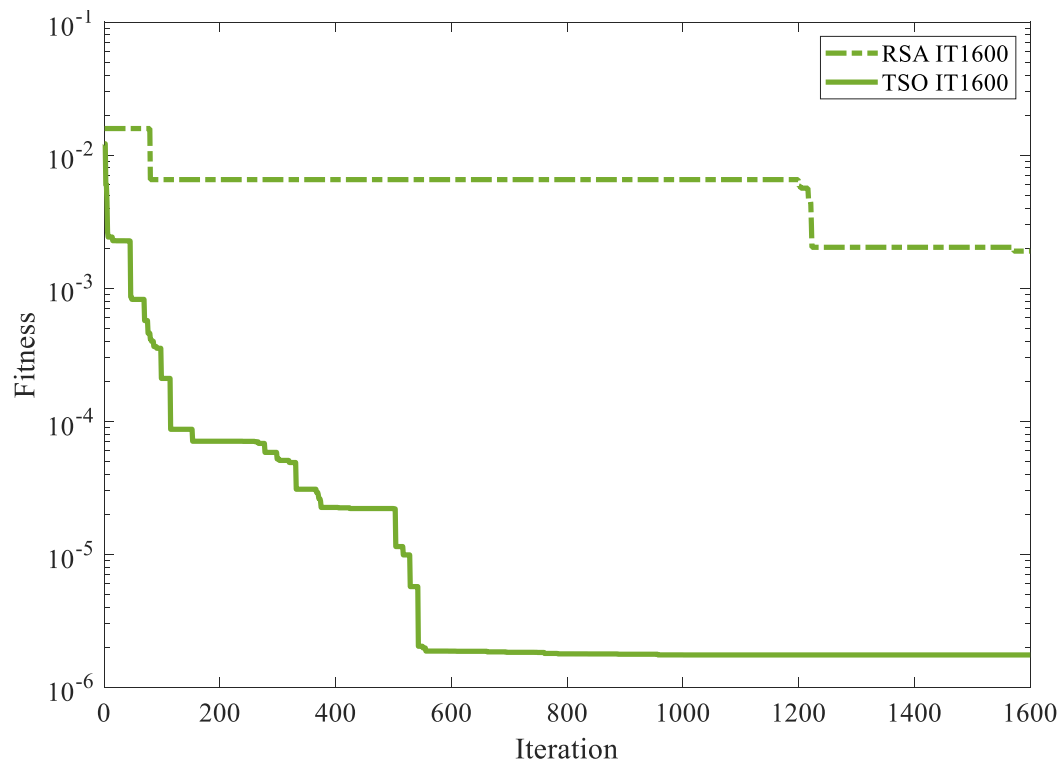


Figure V-32: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 900 populations et 1600 itérations.

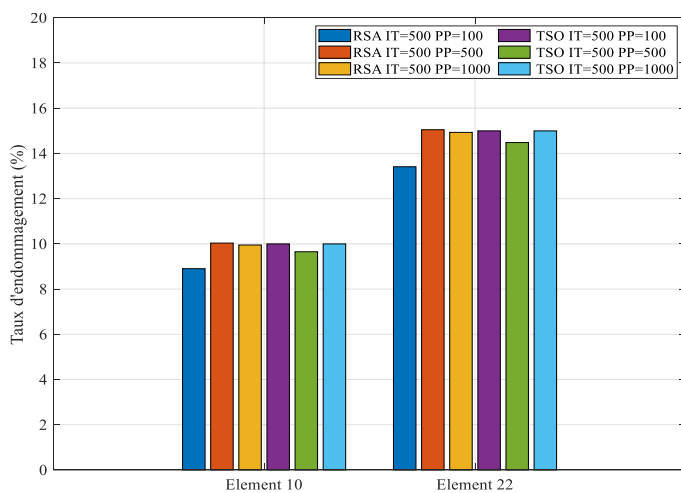


Figure V-33: : Taux d'endommagement pour les l'éléments 10 et 22 pour les population fixées à 500

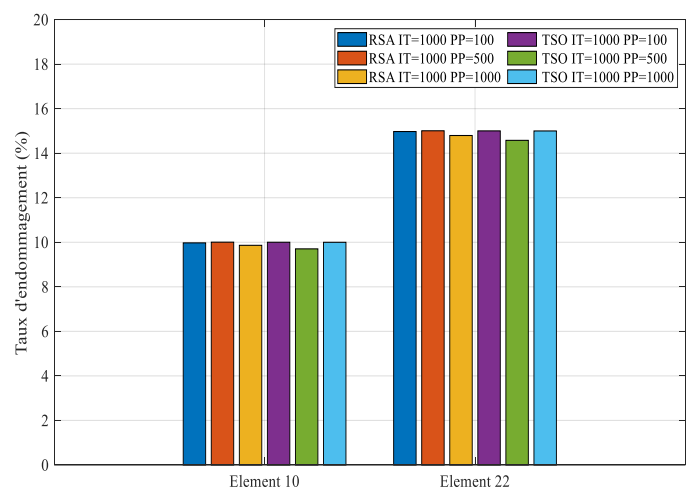


Figure V-34: Taux d'endommagement pour les éléments 10 et 22 pour les populations fixées à 1000

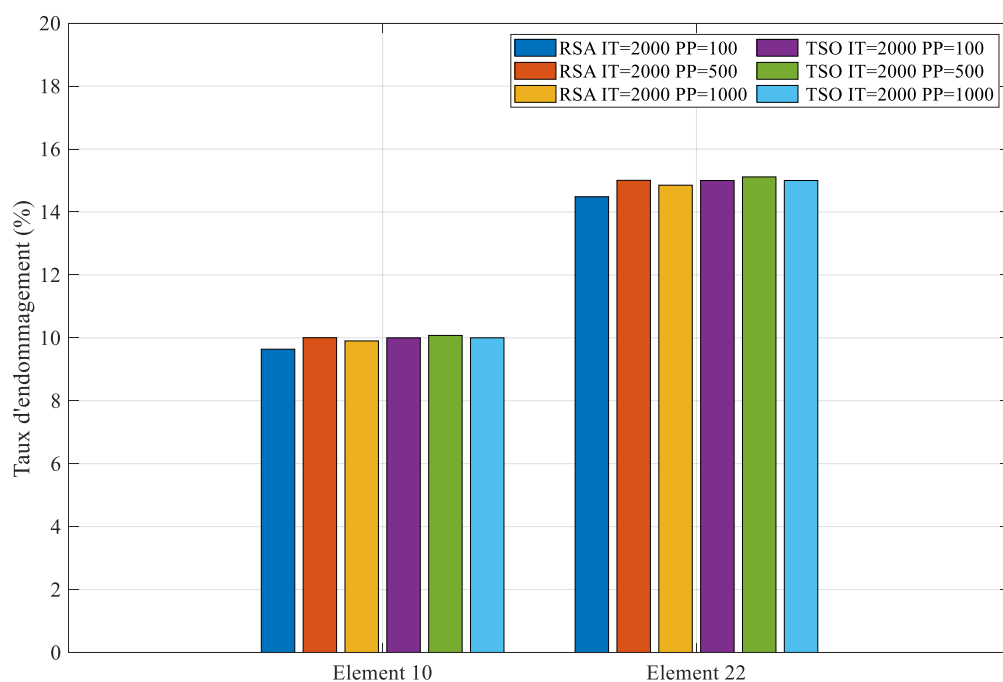


Figure V-35: Taux d'endommagement pour les éléments 10 et 22 pour les population fixées à 2000.

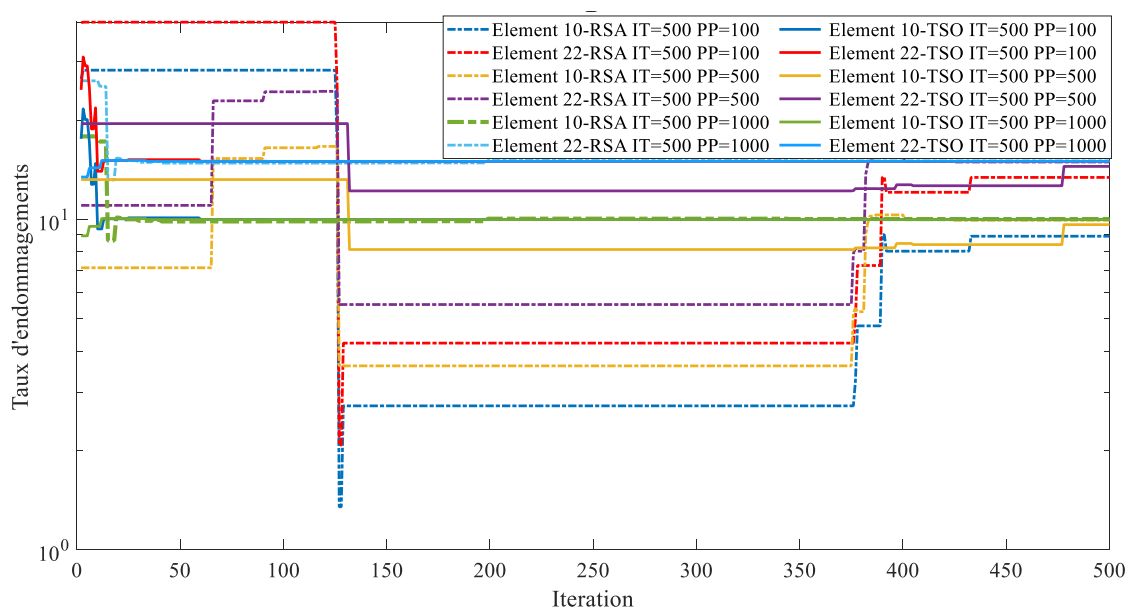


Figure V-36: Taux d'endommagement en fonction des itérations fixées à 500 et population variées de 100 à 1000 pour les éléments 10 et 22.

Temps Scénario 2 [s]						
populations	Itérations fixées à 500		Itérations fixées à 1000		Itérations fixées à 2000	
	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
100	757,2	761,5	974	971,1	3201,7	3161,2
500	3891,1	3726,8	4233,7	4554,4	15863	15989
1000	7908,1	7829,5	13953	14429,5	30357	23153

Tableau V-2: Temps de calcul pour le deuxième scénario de la structure 31 éléments 2D.

Dans ce deuxième scénario la méthode TSO marque une grande précision et une stabilité dans ce qui est la convergence et les taux d'endommagements, d'après les résultats RSA ce converge lentement et des perturbations dans les résultats de best au début de l'optimisation.

Pour le temps de calcul TSO est plus rapide dans la majorité des optimisations lancé dans ce scénario.

V.1.3 Troisième scénario

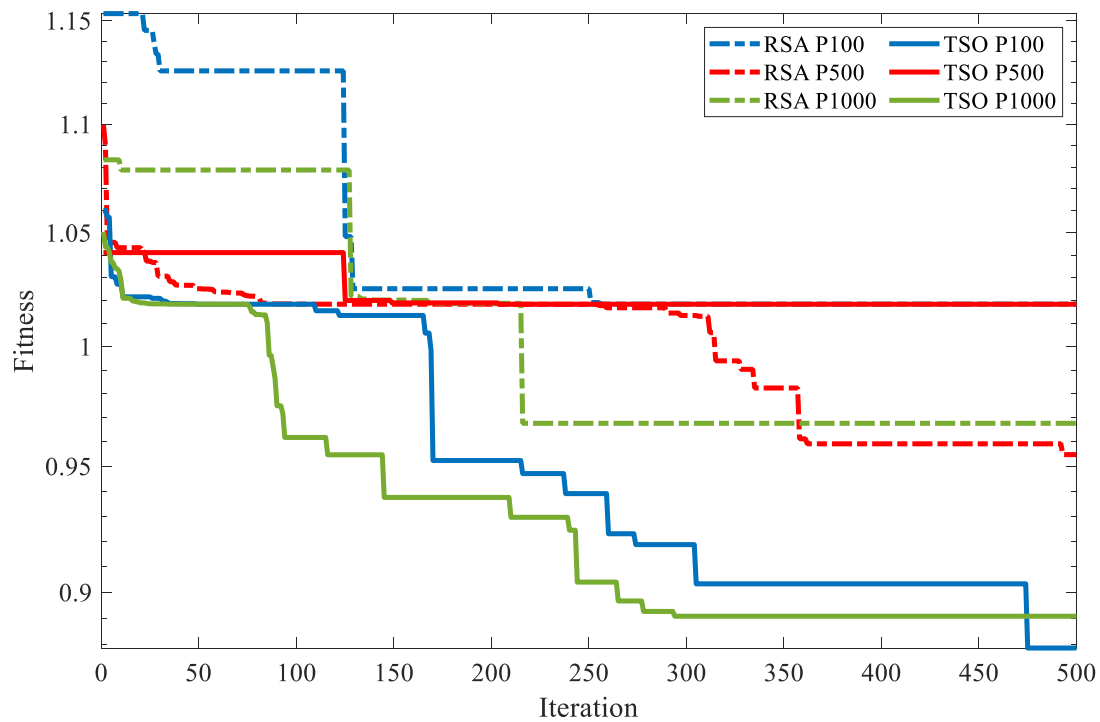


Figure V-37: Structure 2D 31 élément troisième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 500 itérations

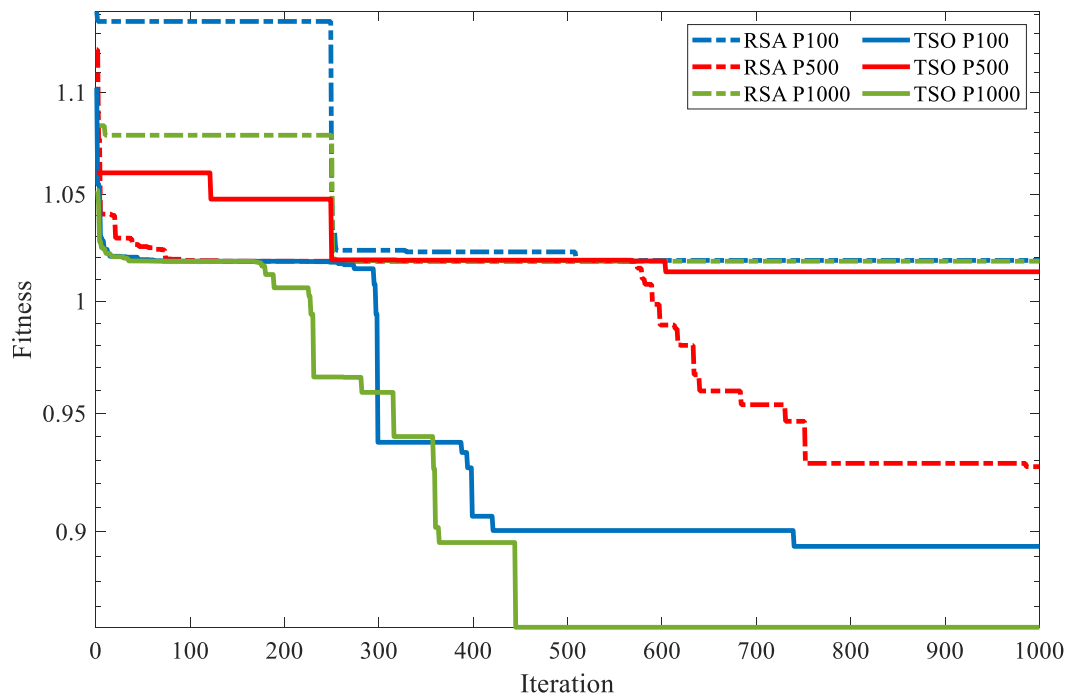


Figure V-38: Structure 2D 31 élément troisième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 1000 itérations

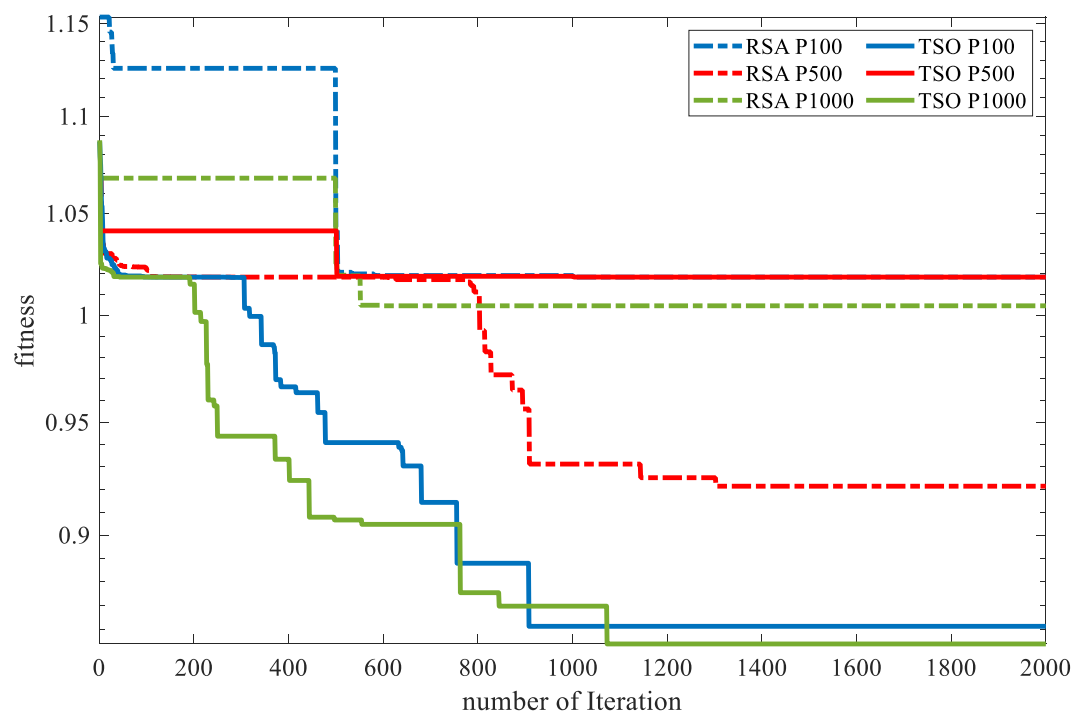


Figure V-39: Structure 2D 31 élément troisième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 2000 itérations

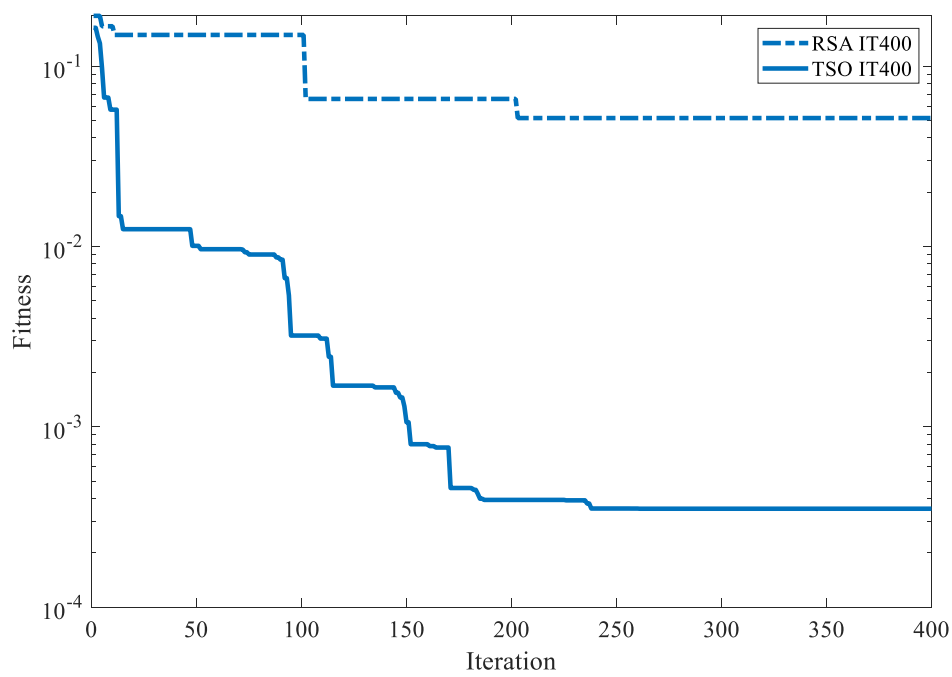


Figure V-40: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 200 populations et 400 itérations.

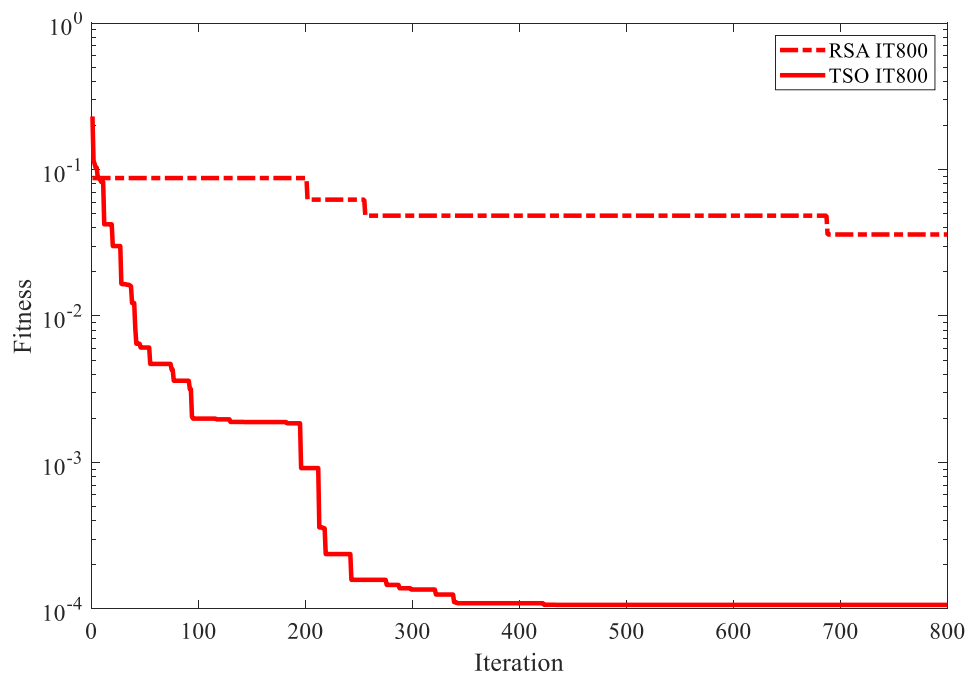


Figure V-41: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 200 populations et 800 itérations.

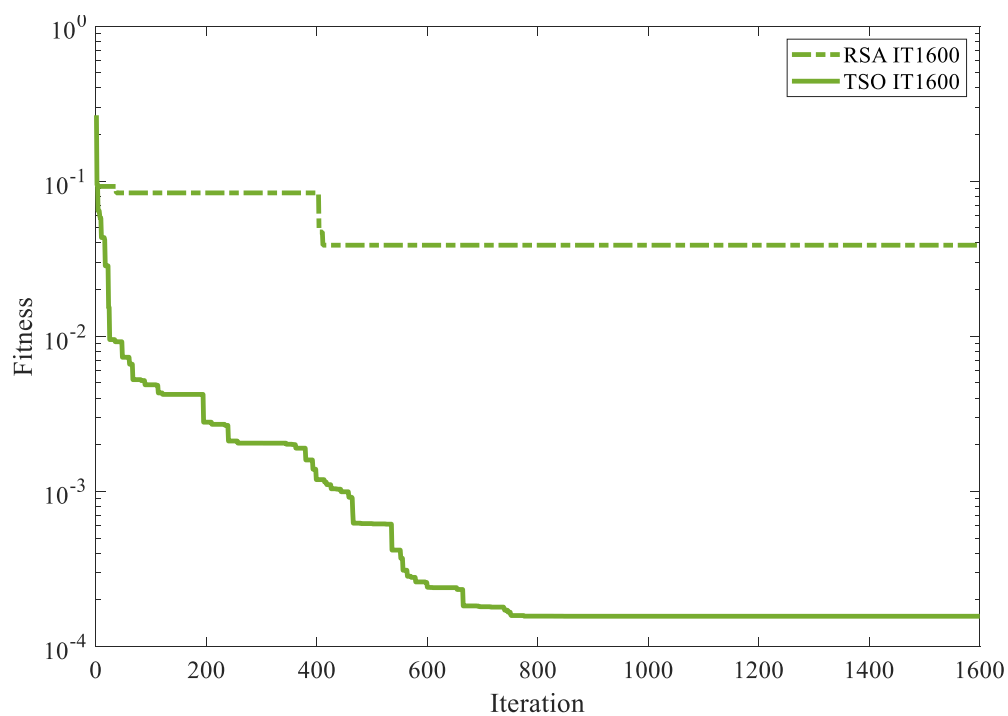


Figure V-42: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 200 populations et 1600 itérations.

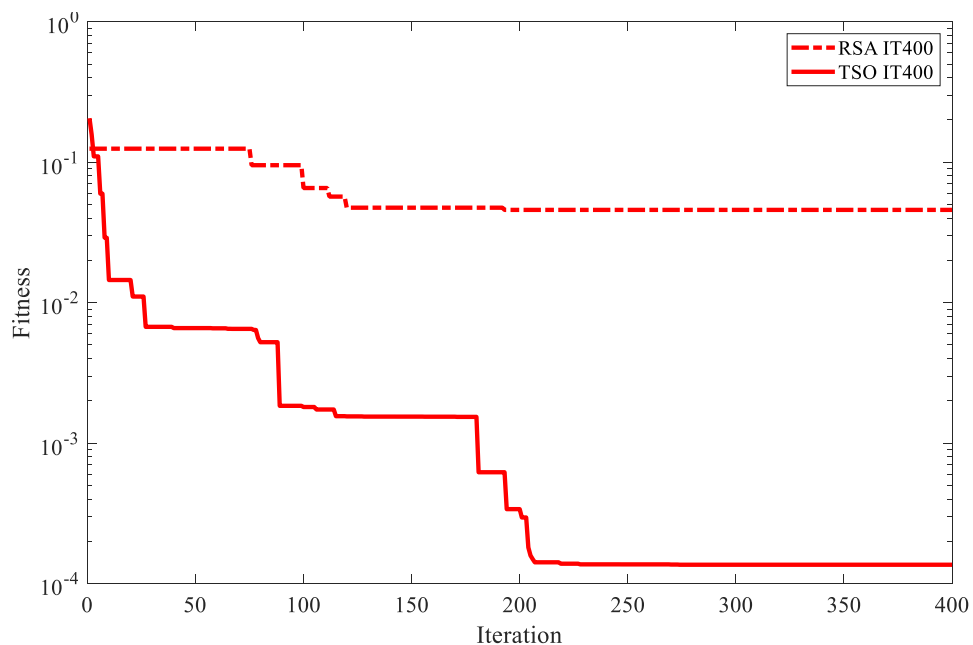


Figure V-43: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 400 populations et 400 itérations.

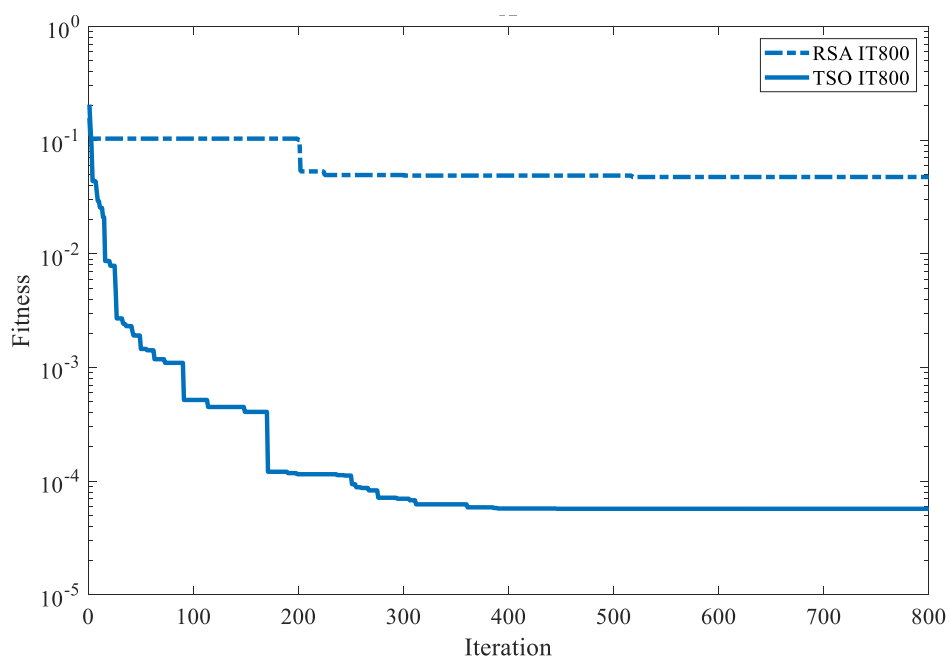


Figure V-44: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 400 populations et 800 itérations

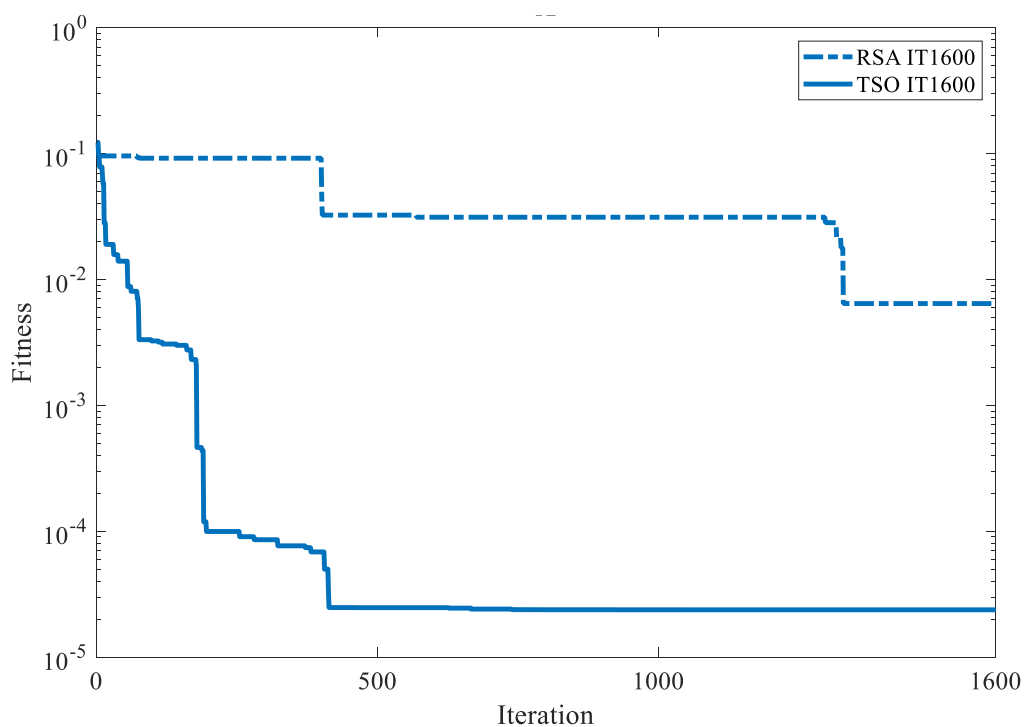


Figure V-45: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 400 populations et 1600 itérations

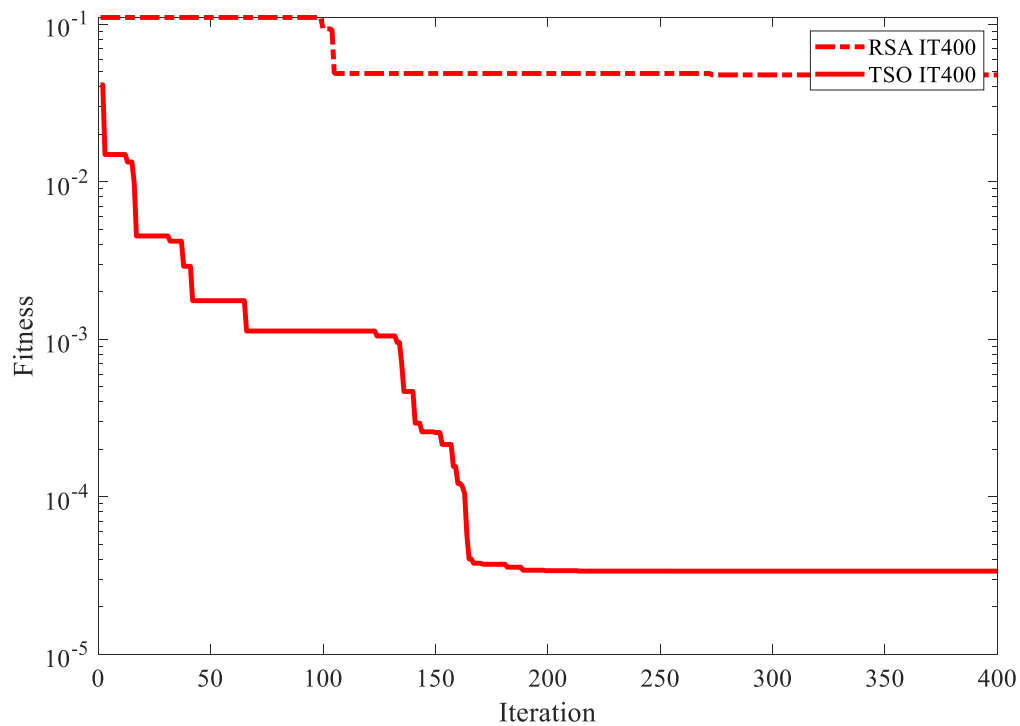


Figure V-46: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 900 populations et 400 itérations

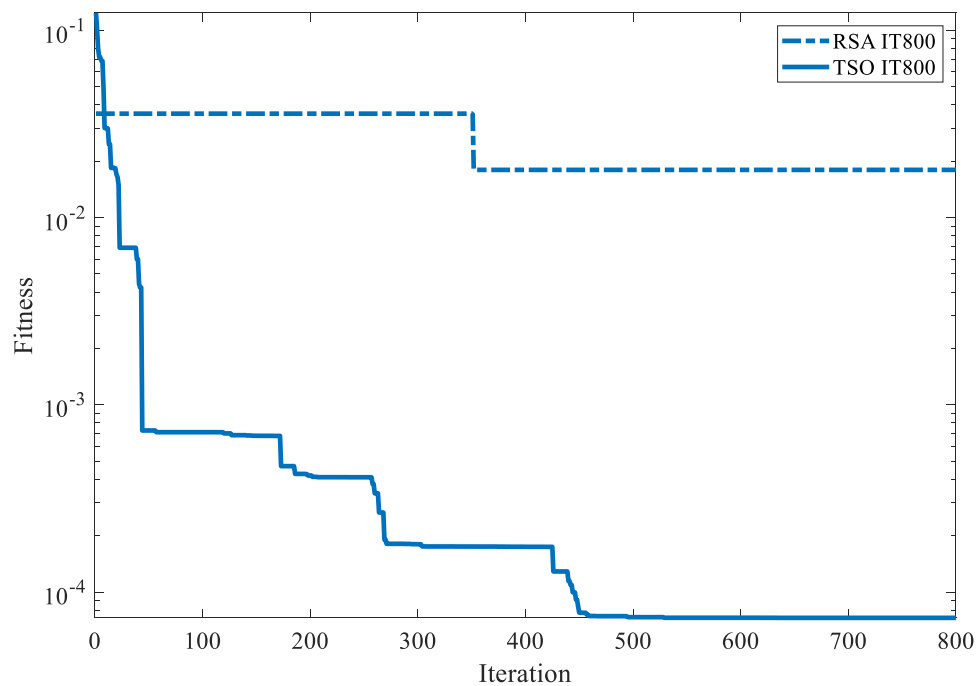


Figure V-47: : Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 900 populations et 800 itérations

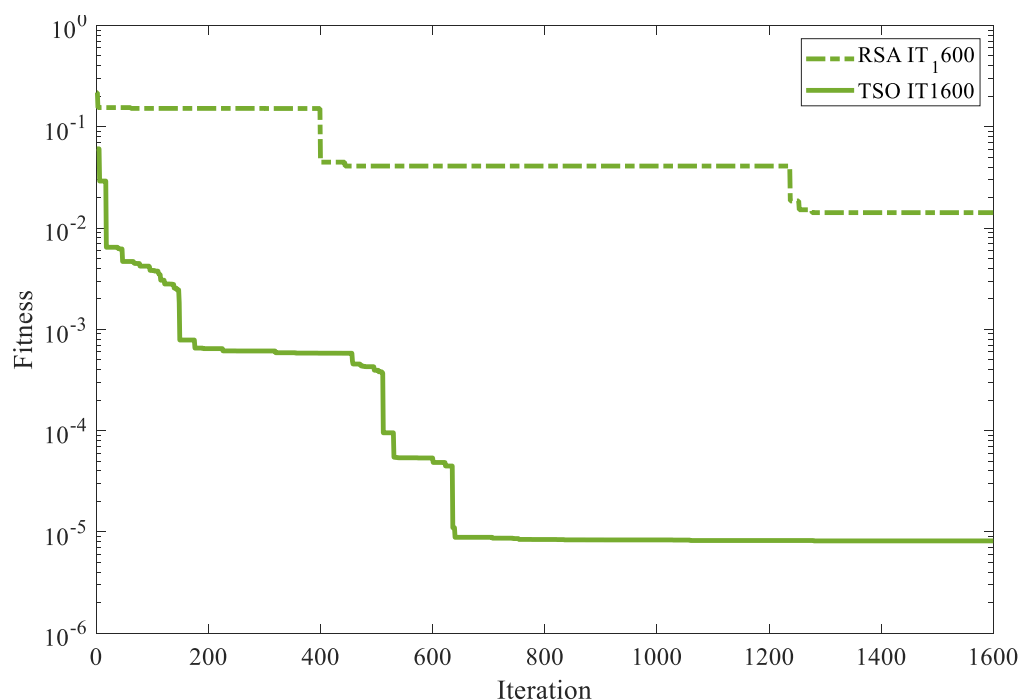


Figure V-48: Structure 2D 31 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 900 populations et 1600 itérations

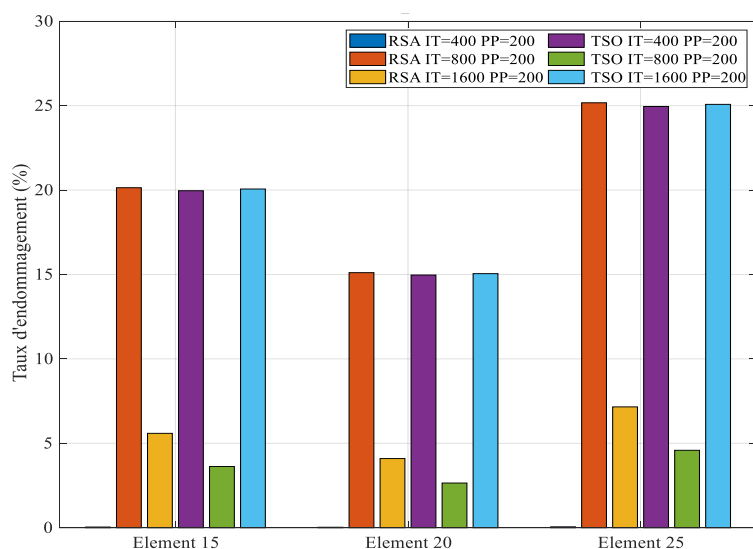


Figure V-49: Taux d'endommagement pour les éléments 15 , 20 et 25 pour les population fixées à 200 et itérations variées.

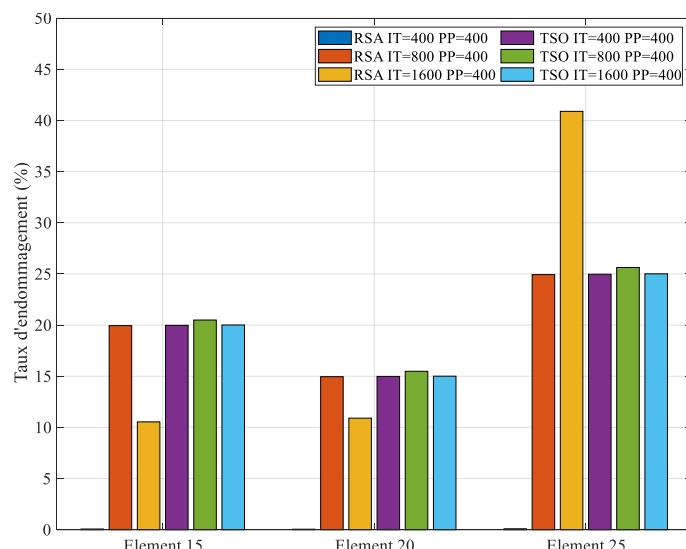


Figure V-50: Taux d'endommagement pour les éléments 15 , 20 et 25 pour les population fixées à 400 itérations variées.

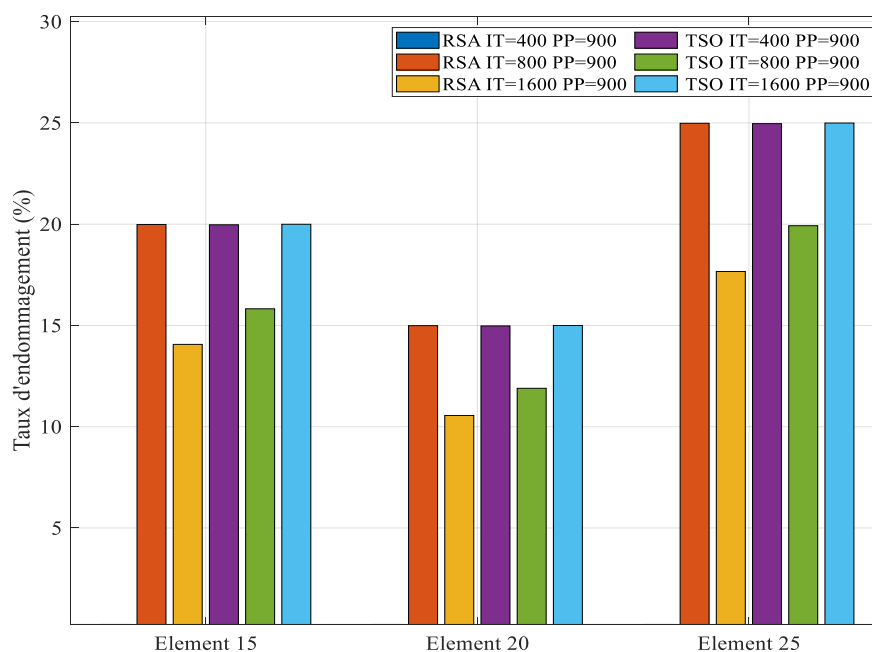


Figure V-51: Taux d'endommagement pour les éléments 15 , 20 et 25 pour les population fixées à 900 itérations variées.

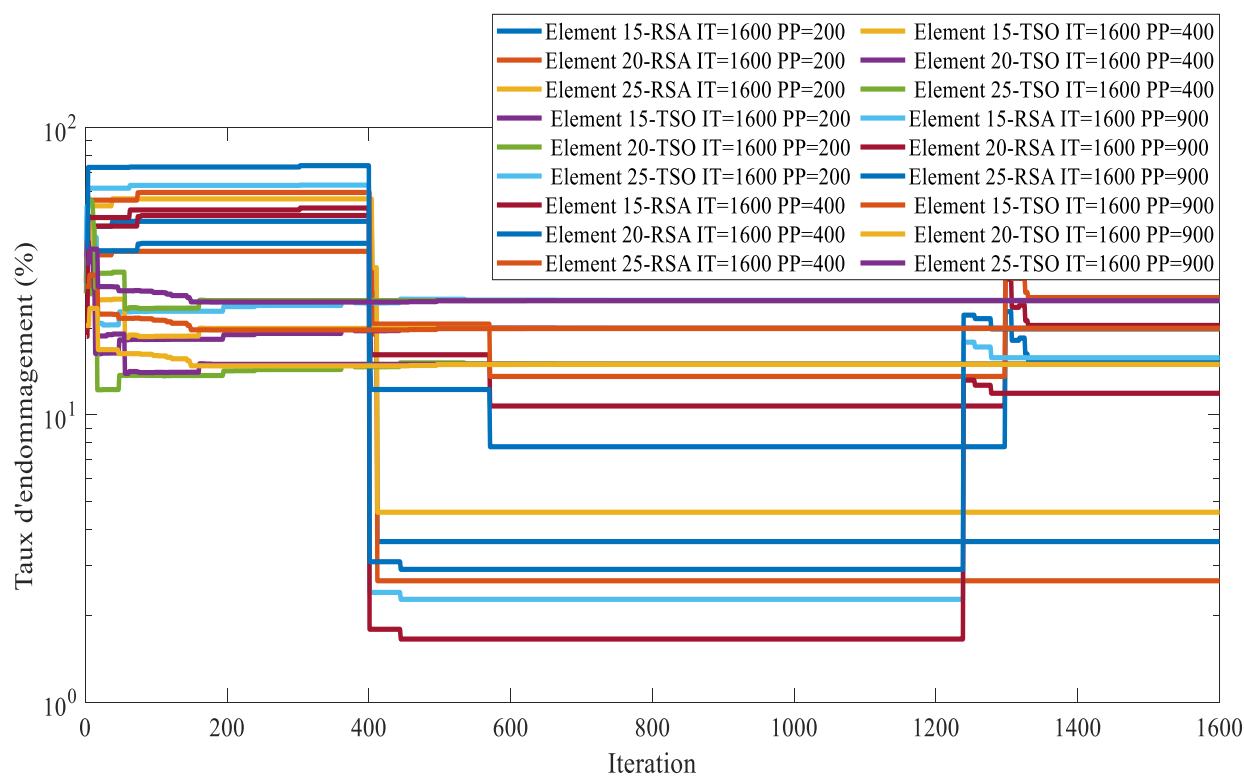


Figure V-52: Taux d'endommagement pour les éléments 15, 20 et 25 pour des population variées itérations fixées.

Temps Scénario 3 [s]						
populations	Itérations fixées à 500		Itérations fixées à 1000		Itérations fixées à 2000	
	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
100	810,83	776,7	901,9	923,2	3366,7	5785
500	3994,3	3849,7	7889,7	7168,2	15699	15250
1000	7999,7	6748,2	14678	14727	26314	28372

Tableau V-3: Temps de calcul pour le troisième scénario d'endommagement de la structure 31 éléments 2D.

Dans ce scénario une grande différence a été noté d'près les résultats observés on remarque une insuffisance dans le calcul pour la méthode RSA par contre TSO garde ça précision et ça convergence élevé.

Pour le temps de calcul dans les itérations fixées à 500 TSO est la plus rapide, par contre dans les itérations fixées à 1000 et 2000 RSA qui impose sa rapidité.

V.2 Structure 28 éléments 3D

V.2.1 Premier scénario

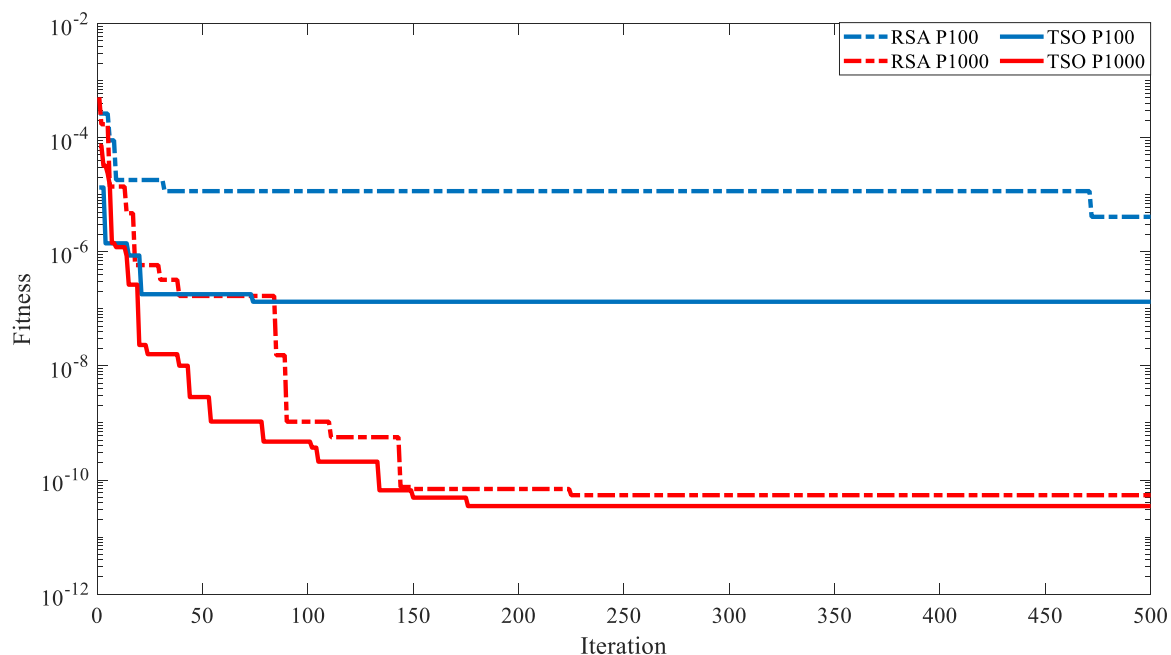


Figure V-53: Structure 3D 28 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 500 itérations.

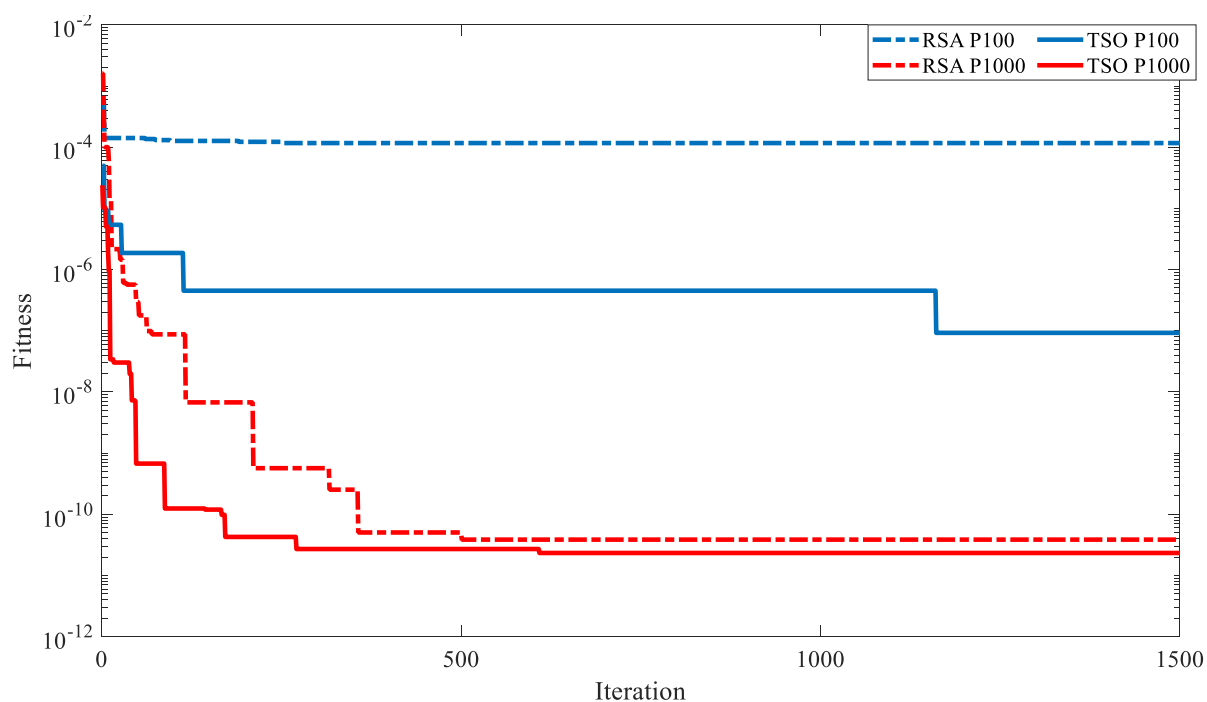


Figure V-54: Structure 3D 28 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 1500 itérations.

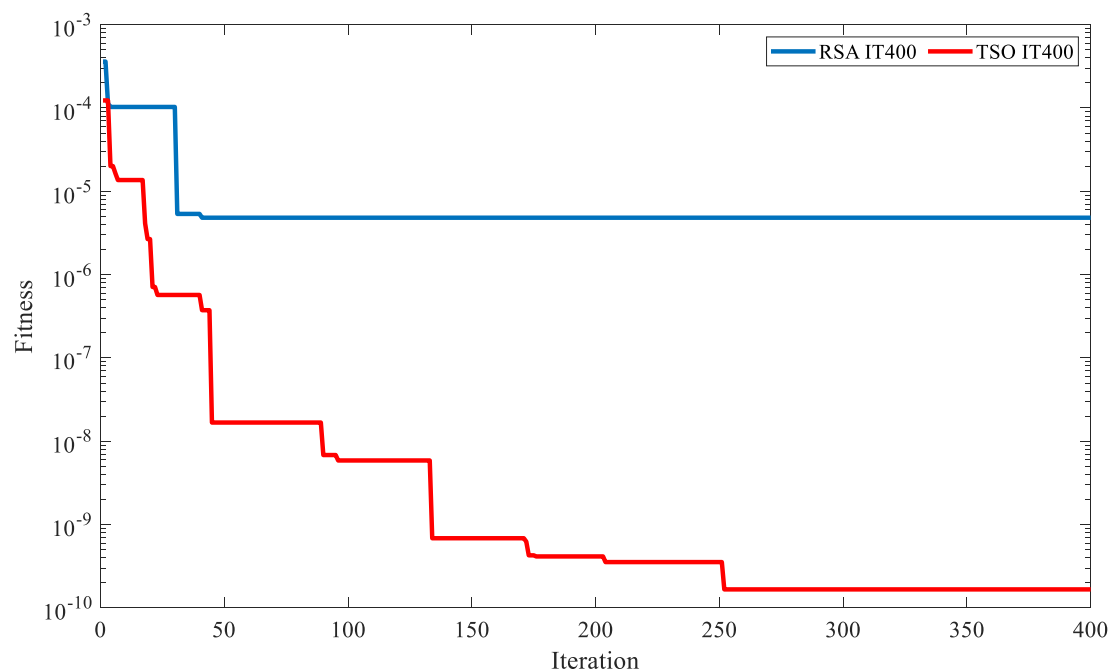


Figure V-55: Structure 3D 28 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction des populations fixées à 200 et itérations a 400 .

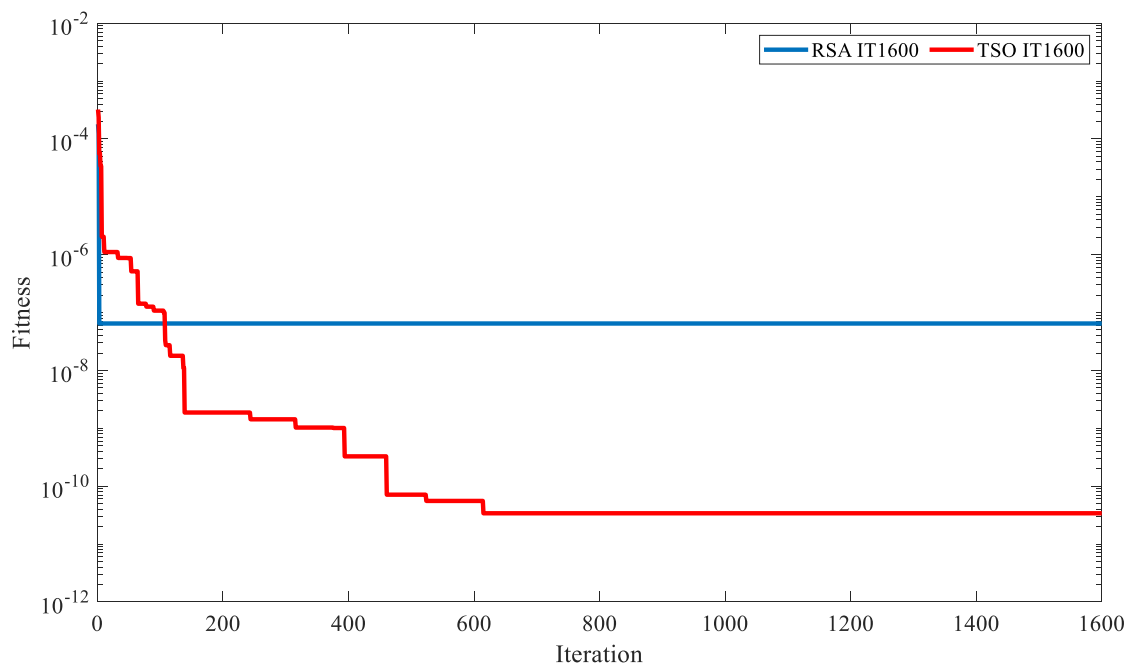


Figure V-56: Structure 3D 28 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction des populations fixées à 200 et itérations a 1600.

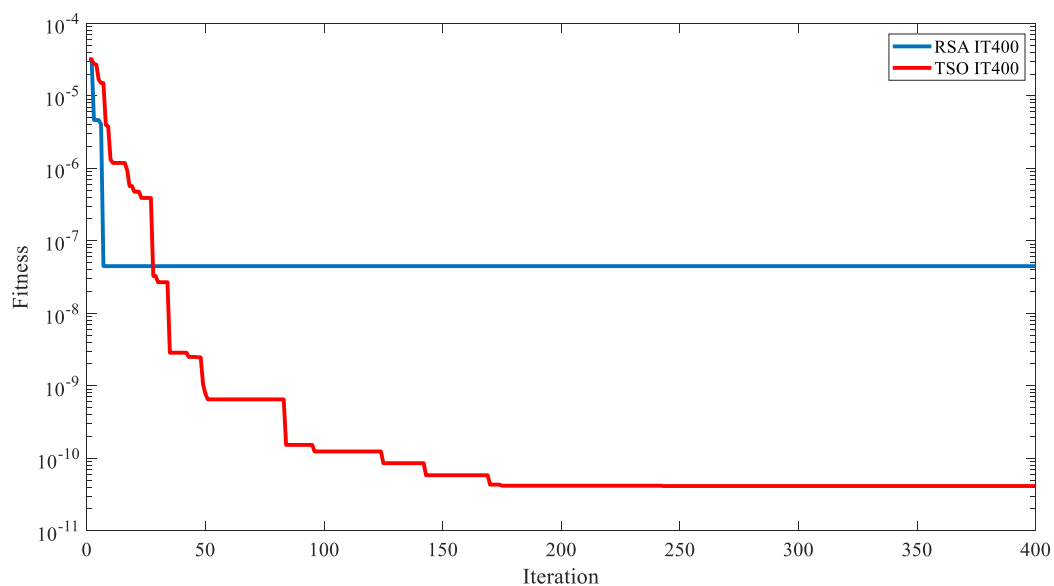


Figure V-57: Structure 3D 28 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction des populations fixées à 900 et itérations a 400 .

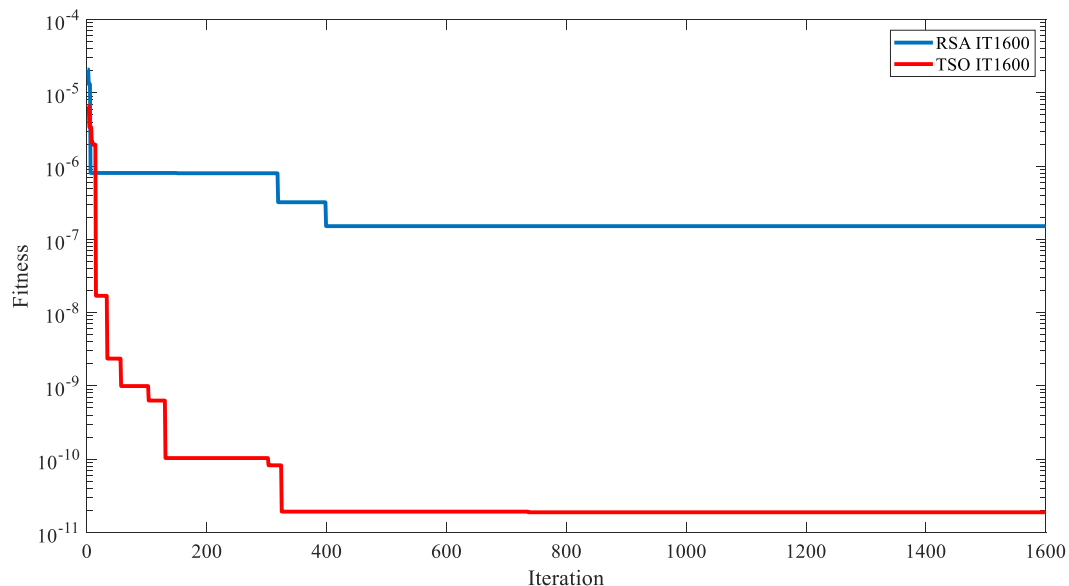


Figure V-58: Structure 3D 28 élément premiers scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction des populations fixées à 900 et itérations a 1600 .

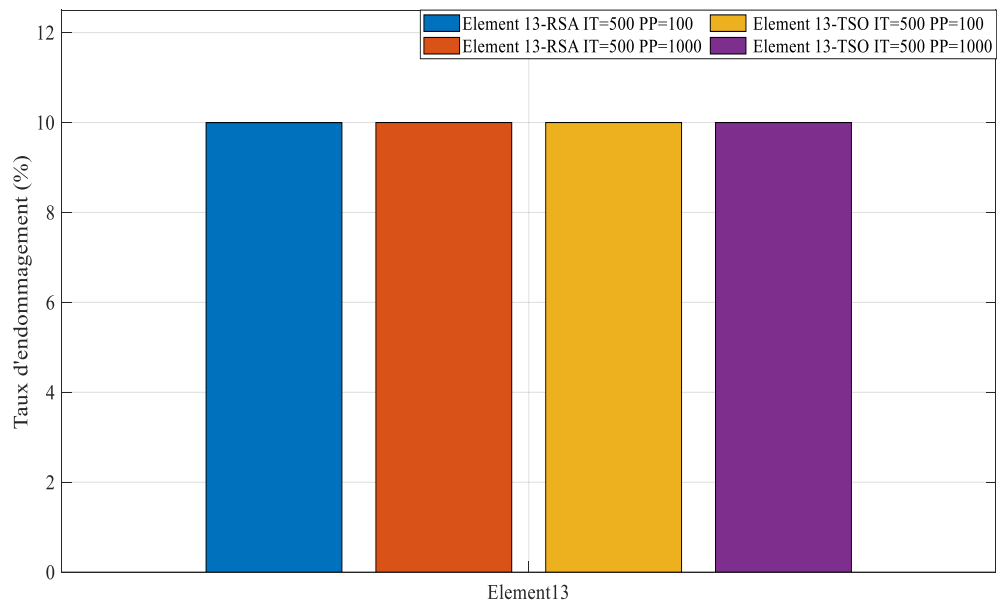


Figure V-59: Taux d'endommagement de l'élément 13 pour les itération fixées 500.

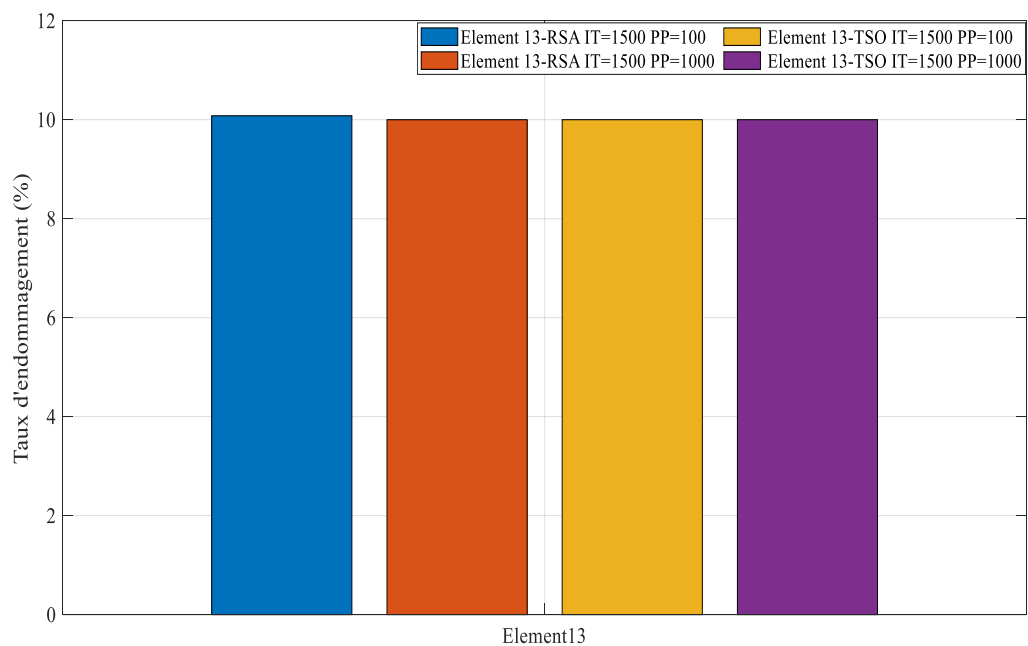


Figure V-60: Taux d'endommagement de l'élément 13 pour les itération fixées 1500.

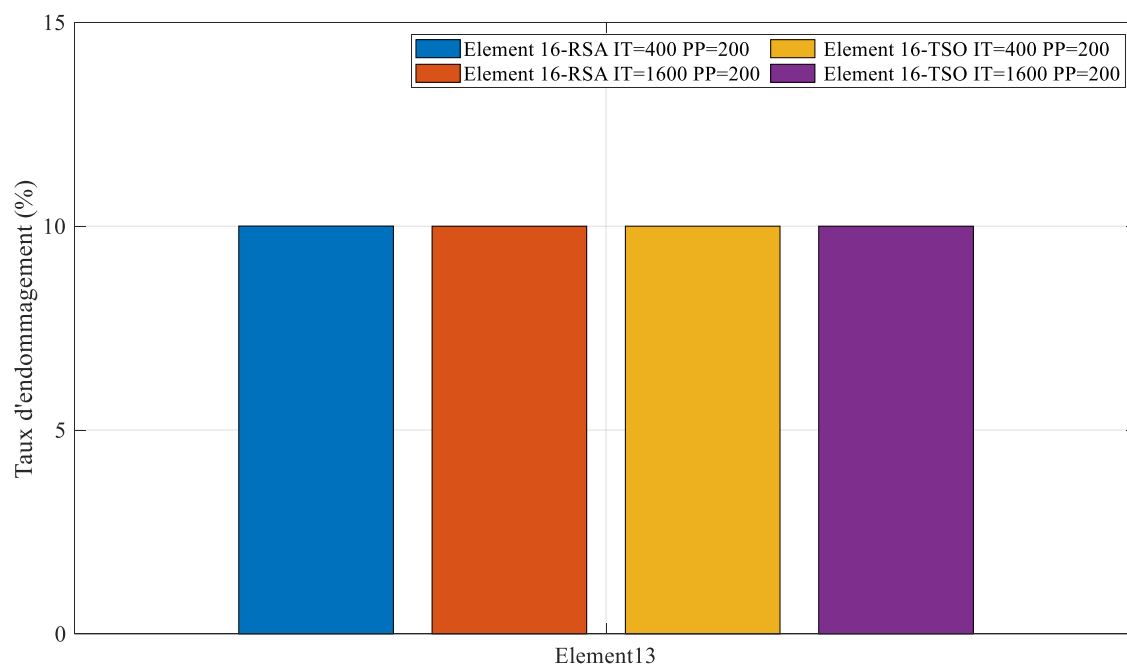


Figure V-61: Taux d'endommagement de l'élément 13 pour des populations fixées 200.

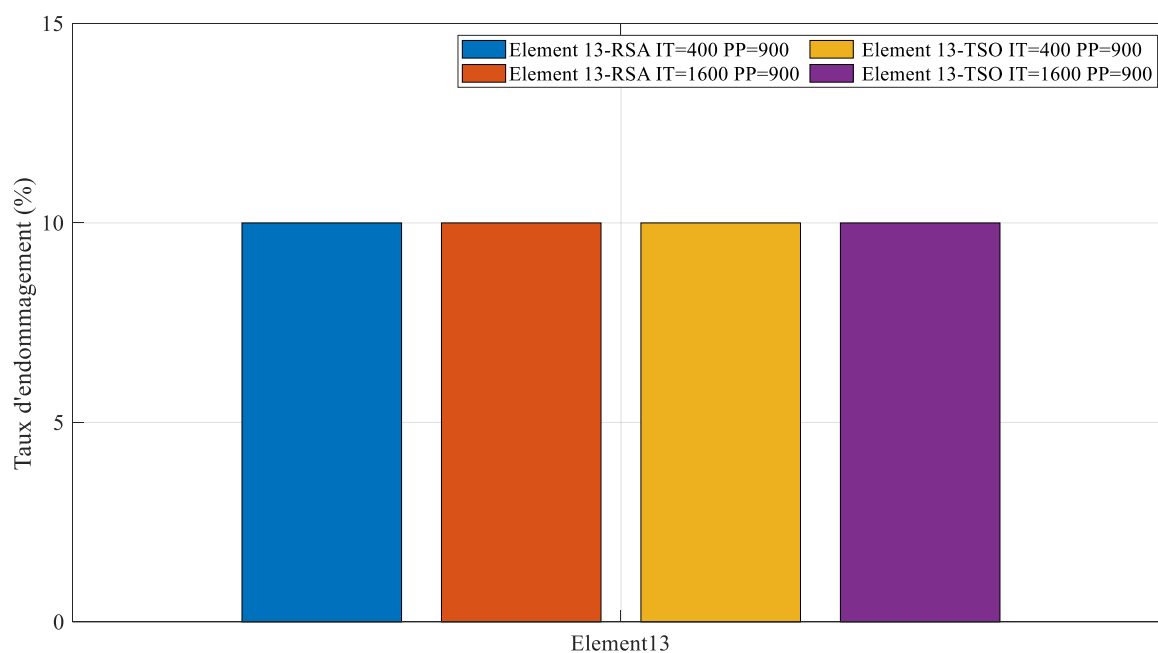


Figure V-62: Taux d'endommagement de l'élément 13 pour des populations fixées 900.

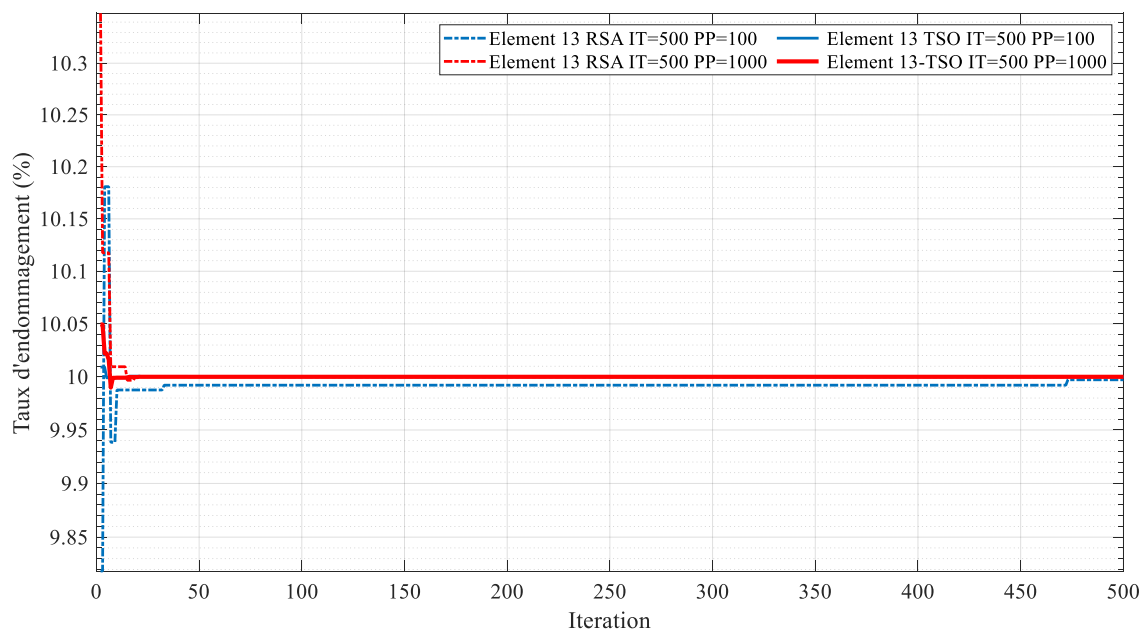


Figure V-63: Taux d'endommagement en fonction des itérations fixées à 500 et population variées de 100 à 1000 pour l'éléments 13.

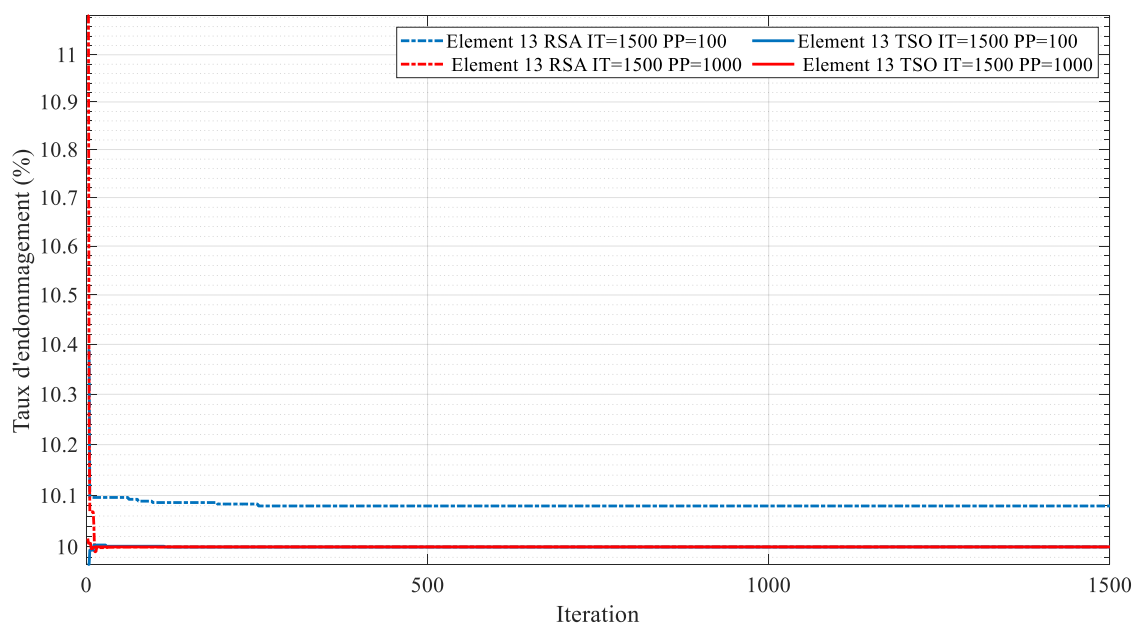


Figure V-64: Taux d'endommagement en fonction des itérations fixées à 1500 et population variées de 100 à 1000 pour l'éléments 13.

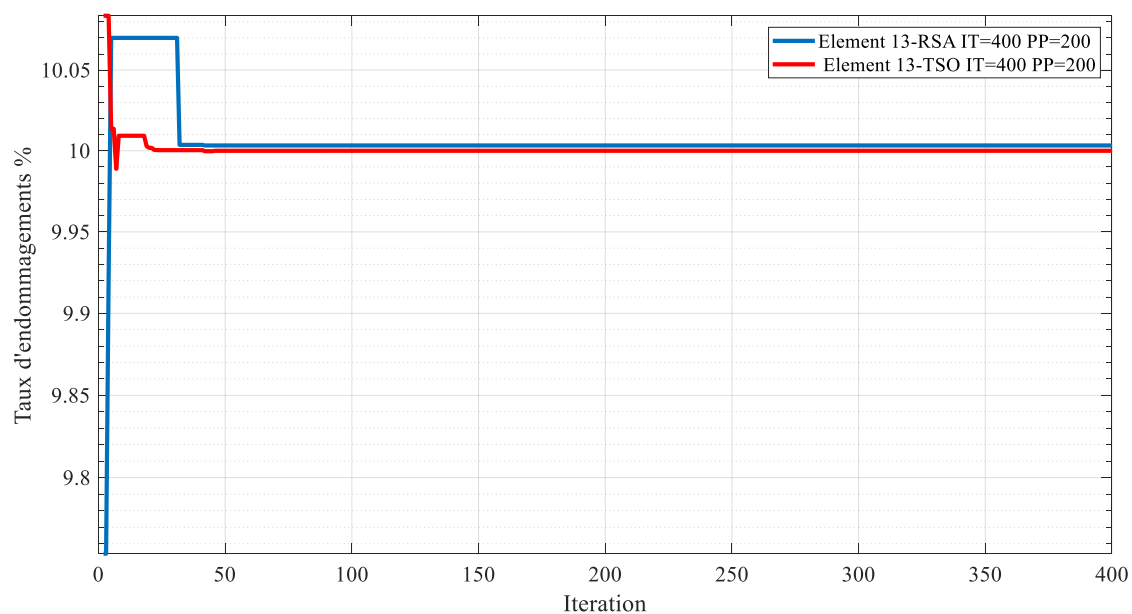


Figure V-65: Taux d'endommagement en fonction des populations fixées à 200 et 400 itérations pour l'éléments 13.

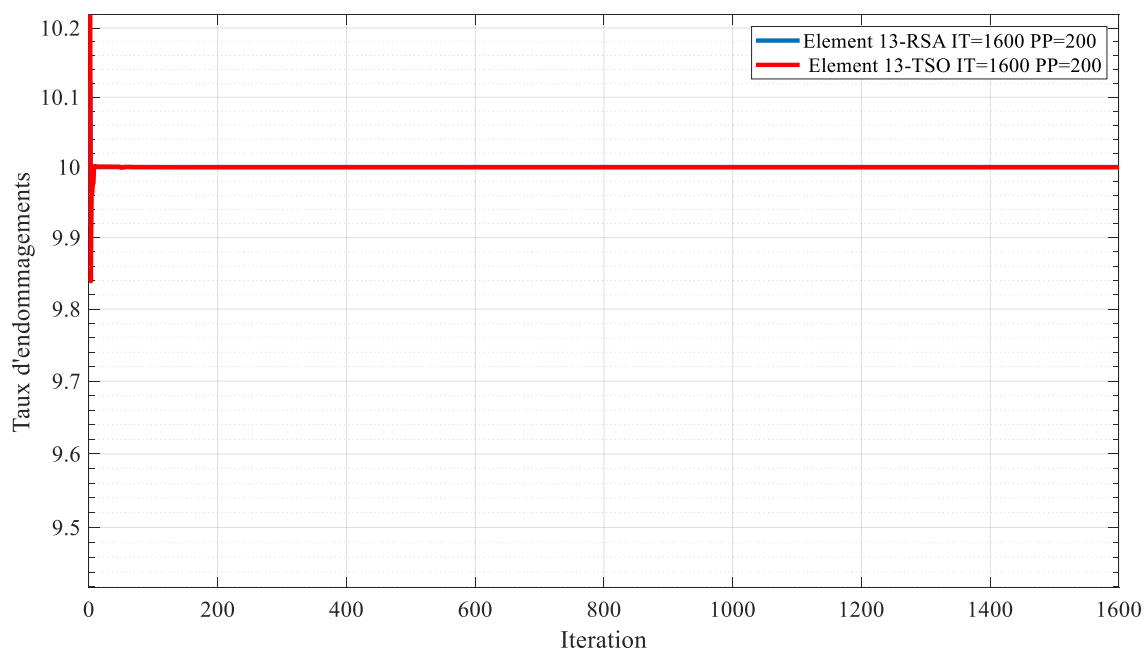


Figure V-66: Taux d'endommagement en fonction des populations fixées à 200 et 1600 itérations pour l'éléments 13.

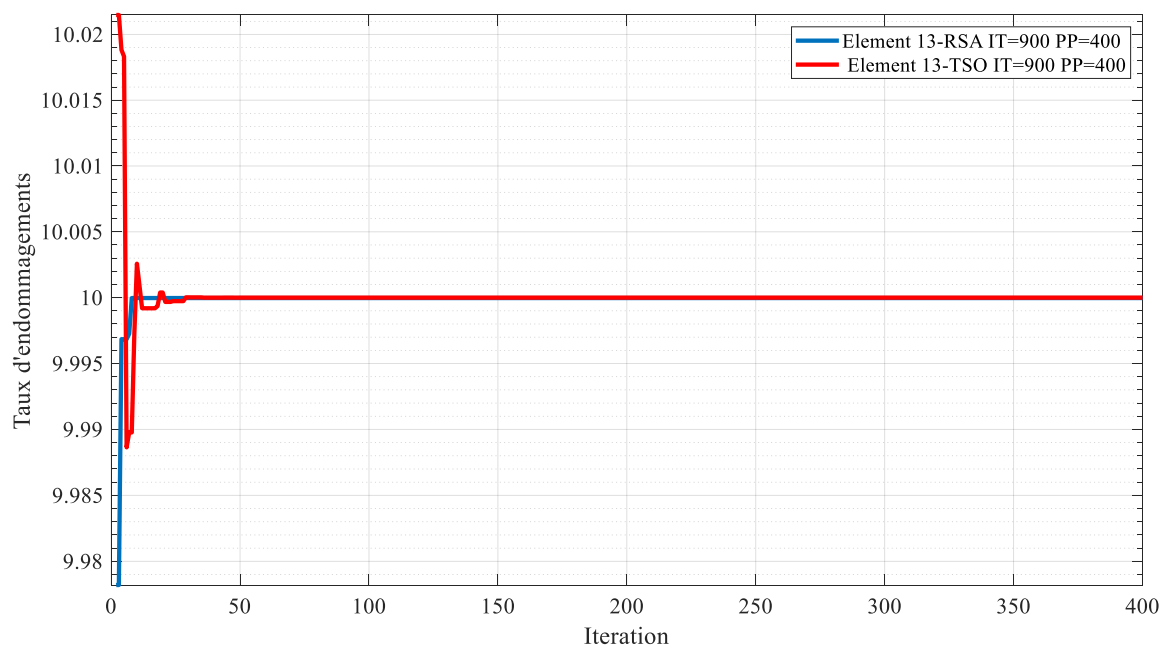


Figure V-67: Taux d'endommagement en fonction des populations fixées à 900 et 400 itérations pour l'éléments 13.

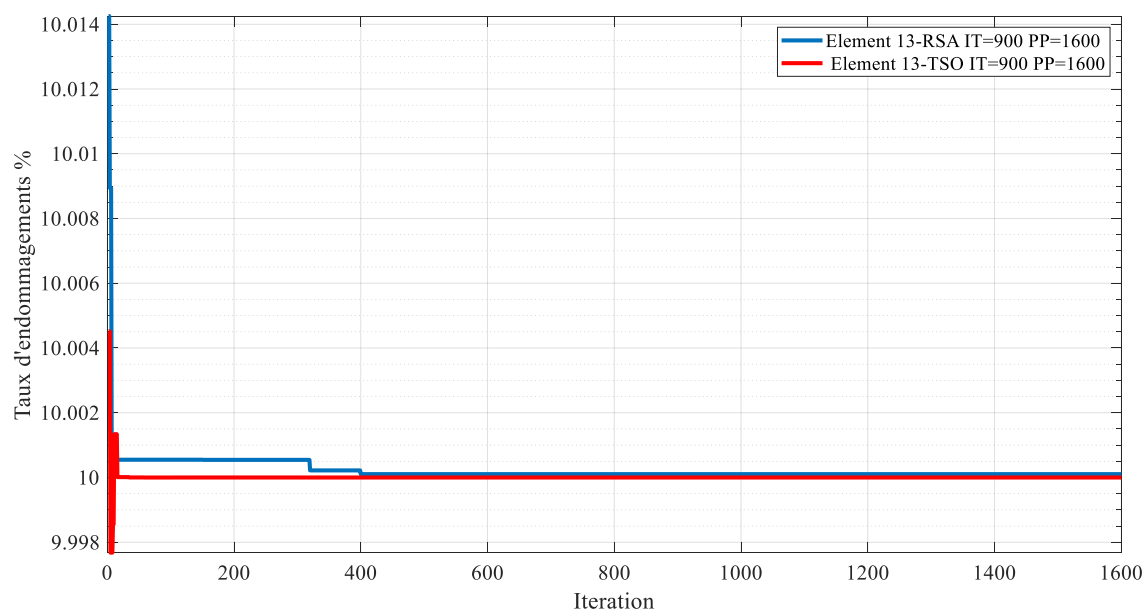


Figure V-68: Taux d'endommagement en fonction des populations fixées à 900 et 1600 itérations pour l'éléments 13.

Temps de calcul Scénario 1 [s]				
Populations	Itérations fixées à 500		Itérations fixées à 1500	
	RSA	TSO	RSA	TSO
100	705,87	685,51	2115,1	1916,1
1000	6992,8	6900,4	21359	20144

Tableau V-4: Temps de calcul pour le premier scénario de la structure 3D 28 éléments.

Dans cette structure 3D 28 éléments l'élément 13 est endommagé d'après les optimisations son taux est indiqué à 10%, l'optimisation de TSO est plus précise et ce converge nettement mieux en comparant à RSA.

Pour ce qui est le temps de calcul TSO est plus rapide dans toutes les optimisations de ce scénario.

V.2.2 Deuxième scénario

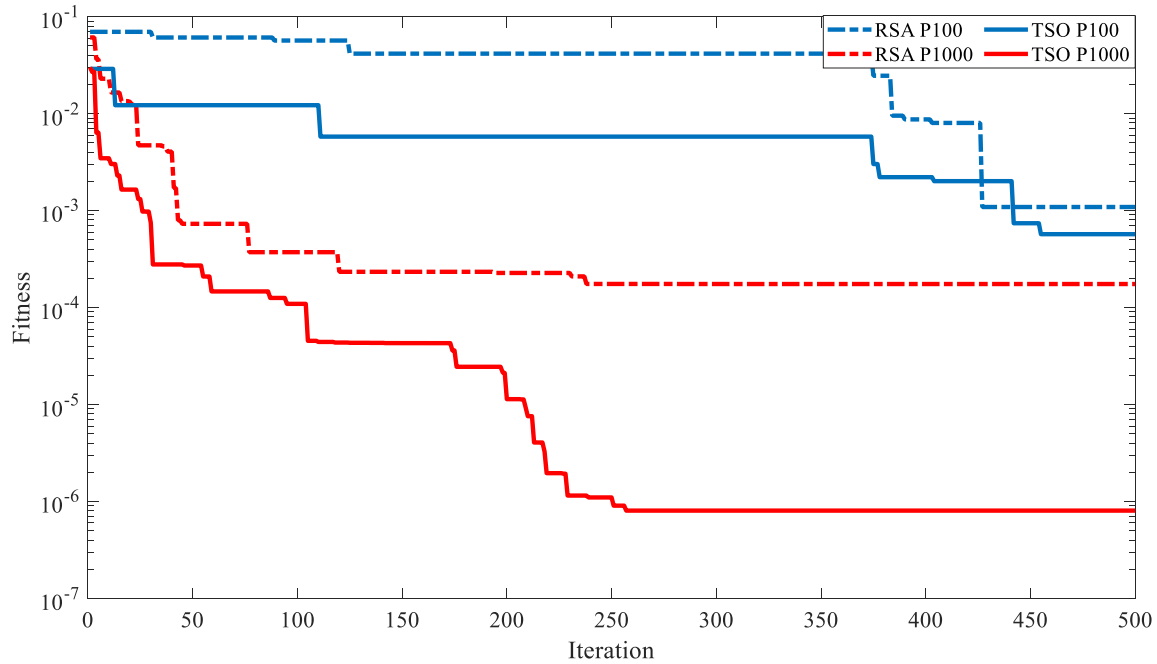


Figure V-69: Structure 3D 28 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 500 itérations.

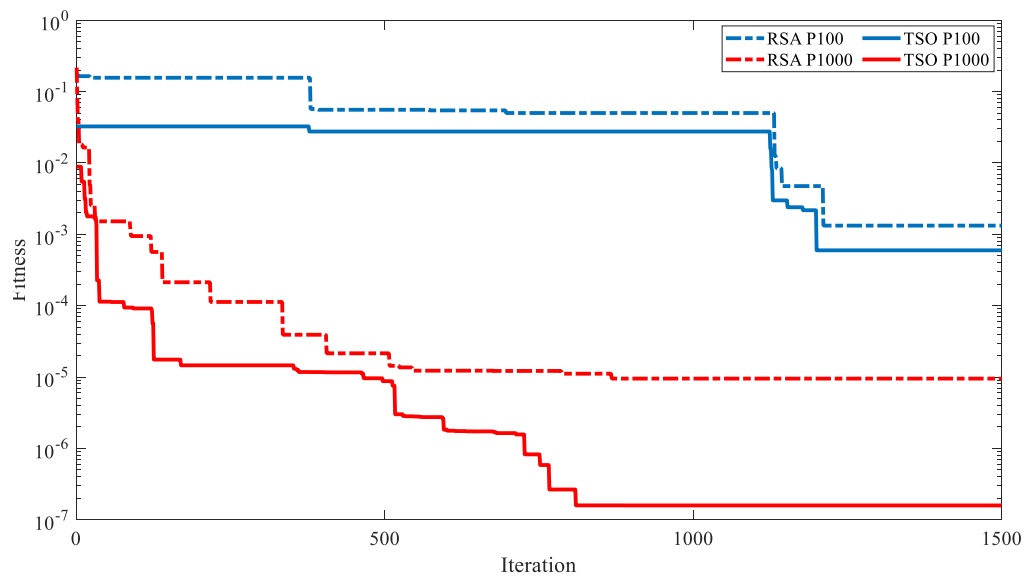


Figure V-70: Structure 3D 28 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction de 1500 itérations.

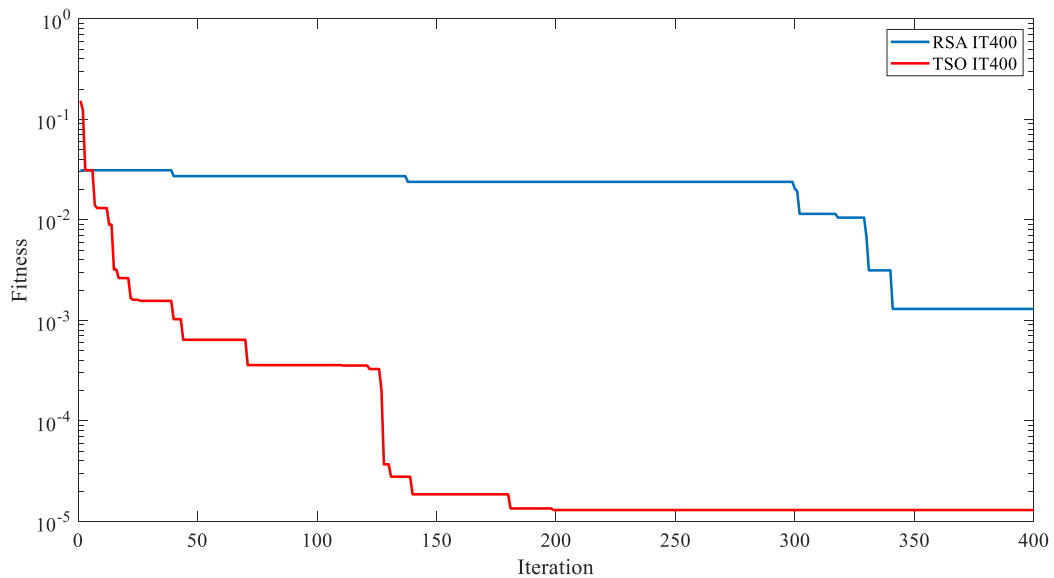


Figure V-71: Structure 3D 28 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction des populations fixées à 200 et itérations a 400.

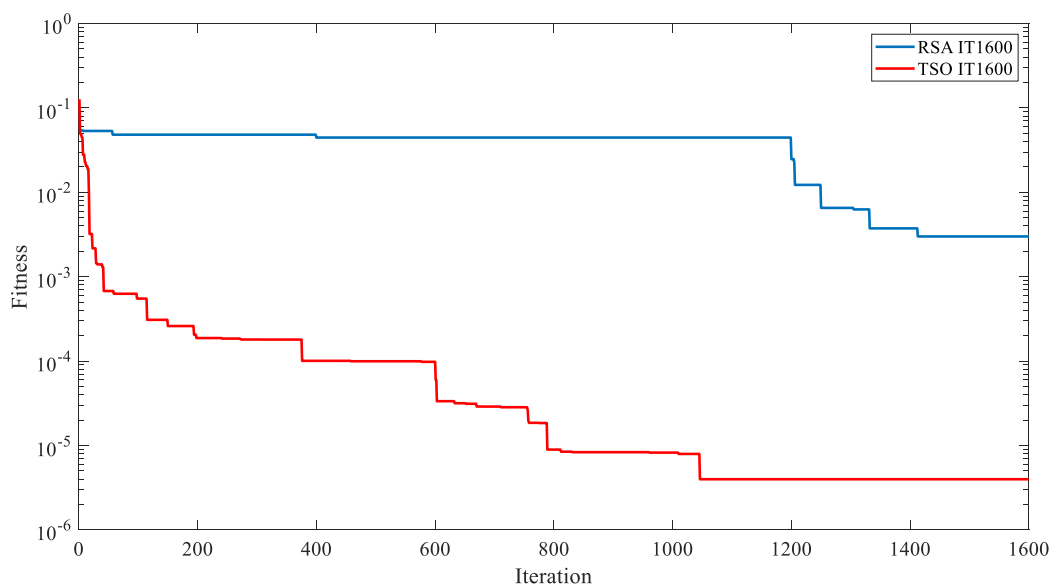


Figure V-72: : Structure 3D 28 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction des populations fixées à 200 et itérations a 1600.

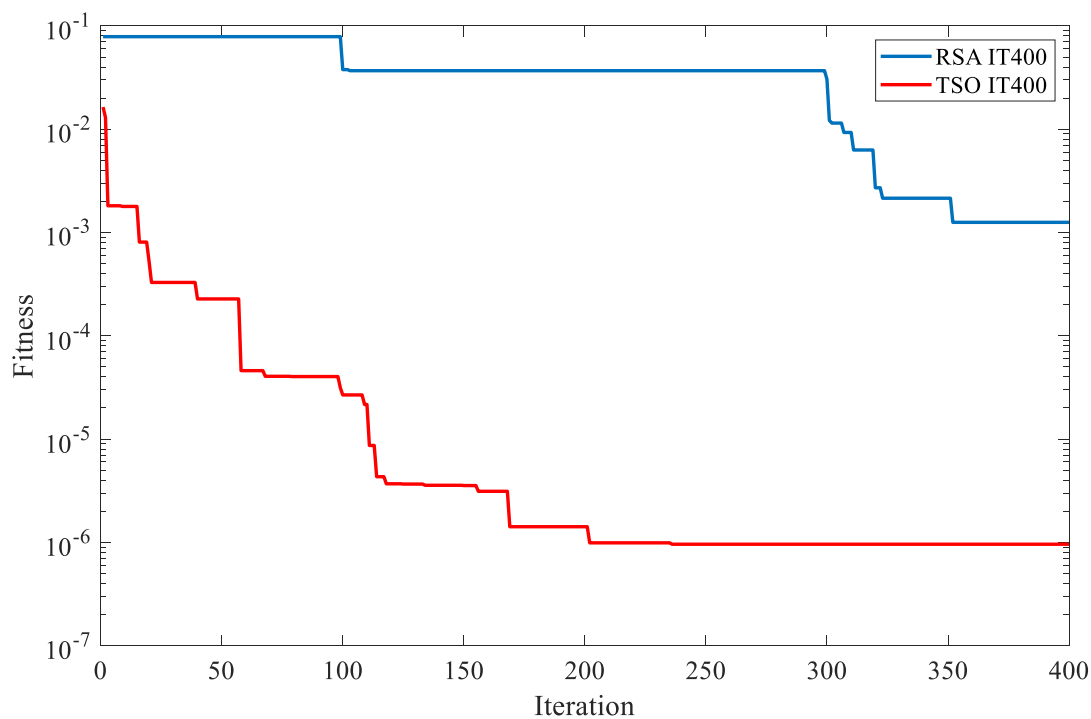


Figure V-73: Structure 3D 28 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction des populations fixées à 900 et itérations a 400.

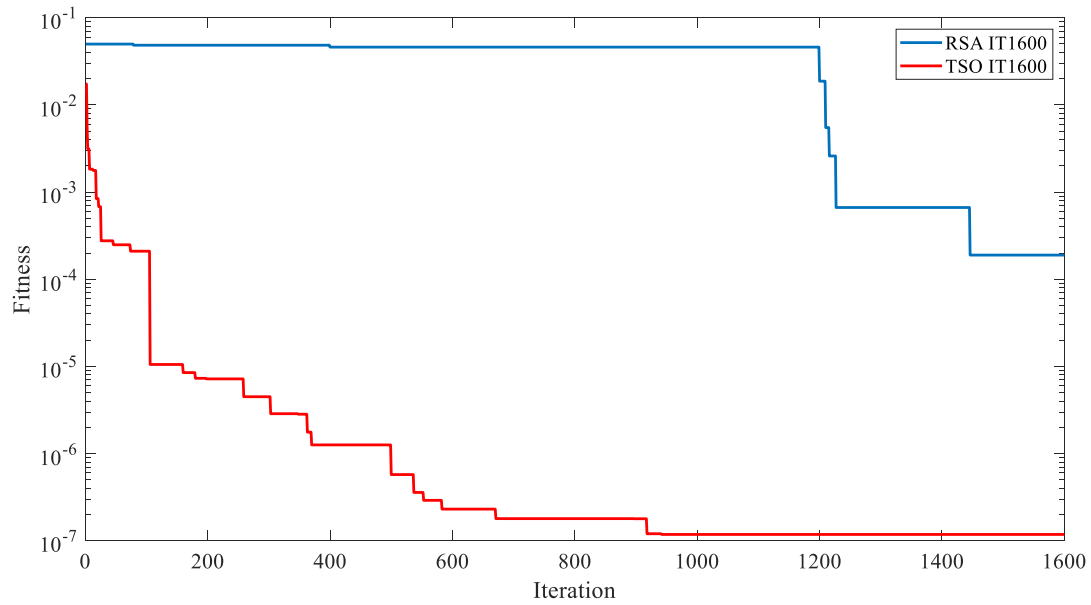


Figure V-74: Structure 3D 28 élément deuxième scénario convergence fitness pour les méthodes RSA et TSO en fonction des populations fixées à 900 et itérations a 1600.

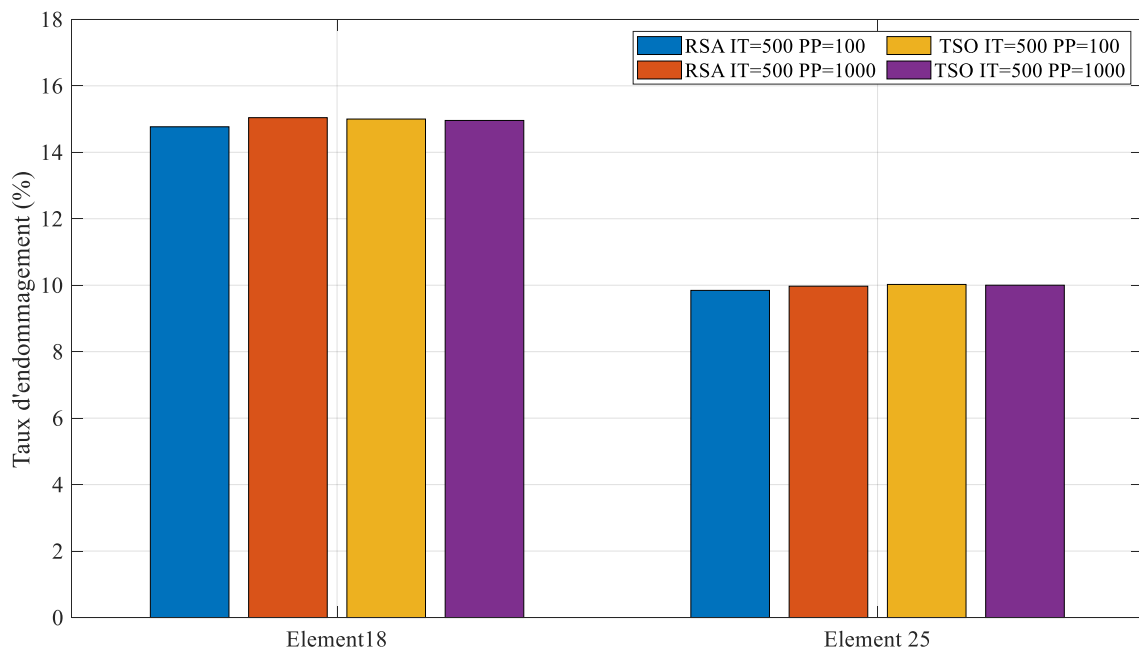


Figure V-75: Taux d'endommagement des élément 18 et 25 pour les itération fixées 500.

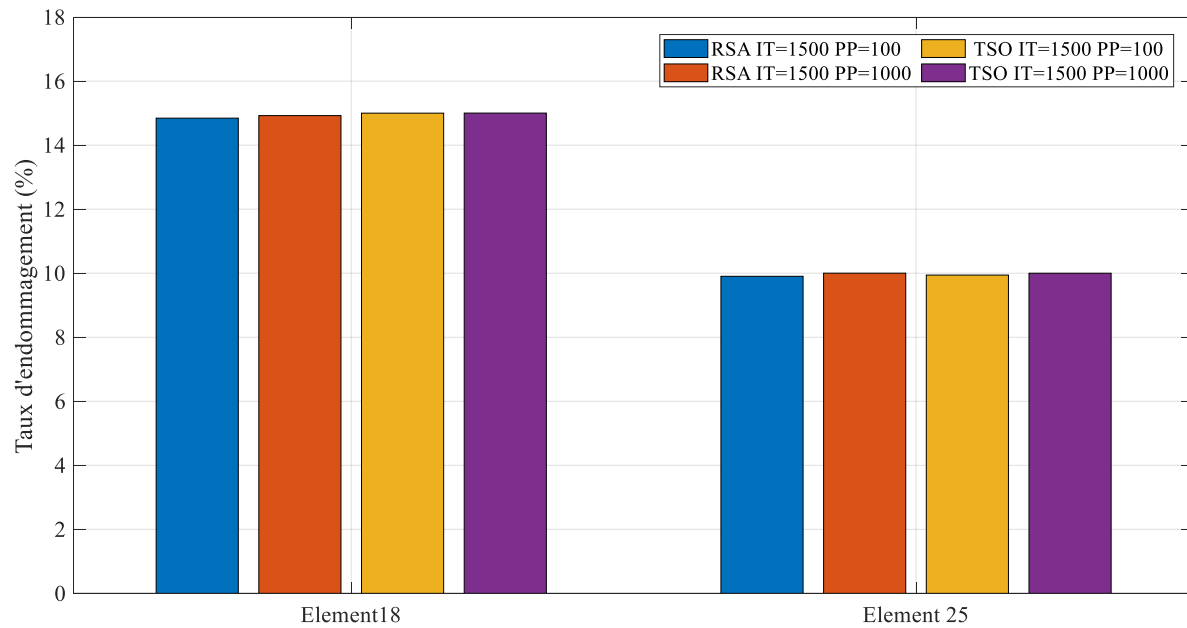


Figure V-76: Taux d'endommagement des élément 18 et 25 pour les itération fixées 1500.

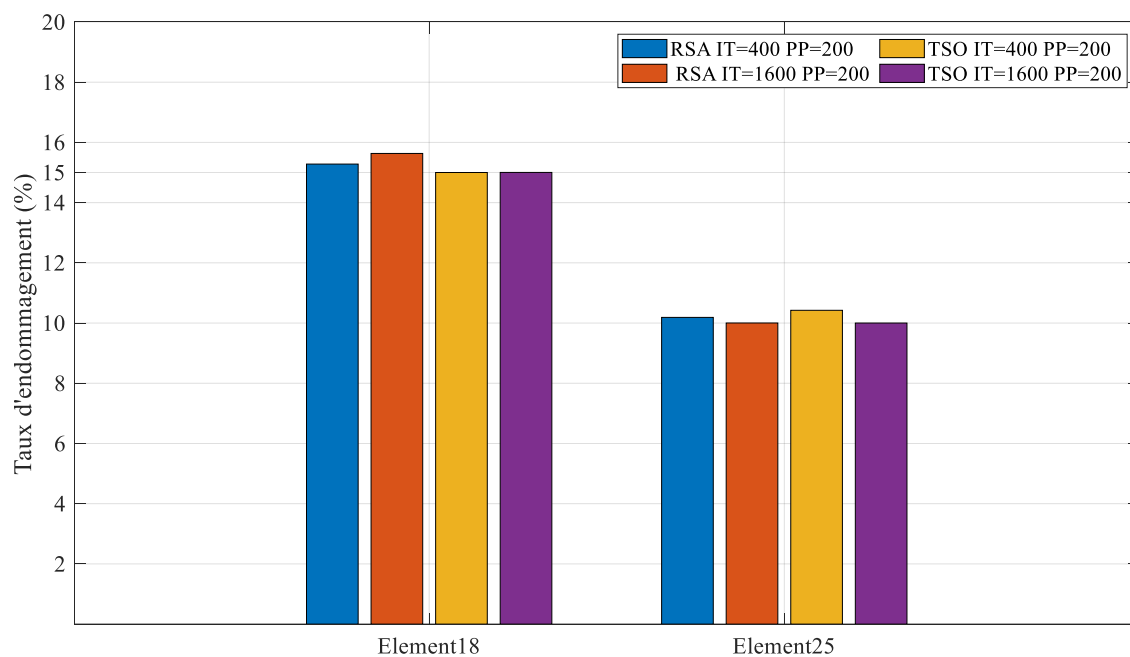


Figure V-77: Taux d'endommagement des élément 18 et 25 pour les population fixées à 200.

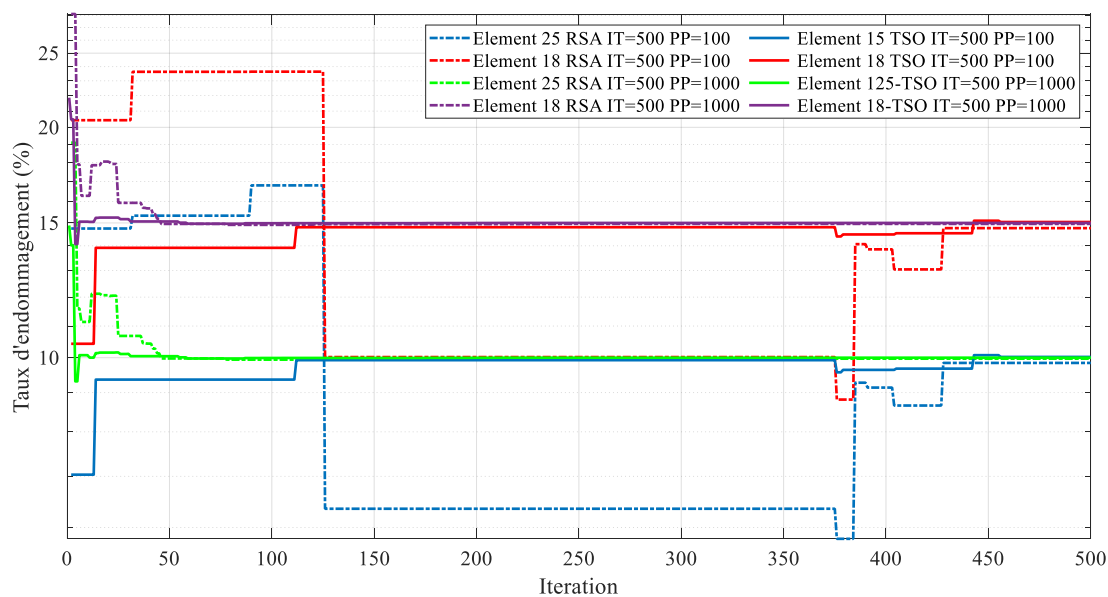


Figure V-78: Taux d'endommagement en fonction des itérations fixées à 500 et population variées de 100 à 1000 pour les éléments 18 et 25.

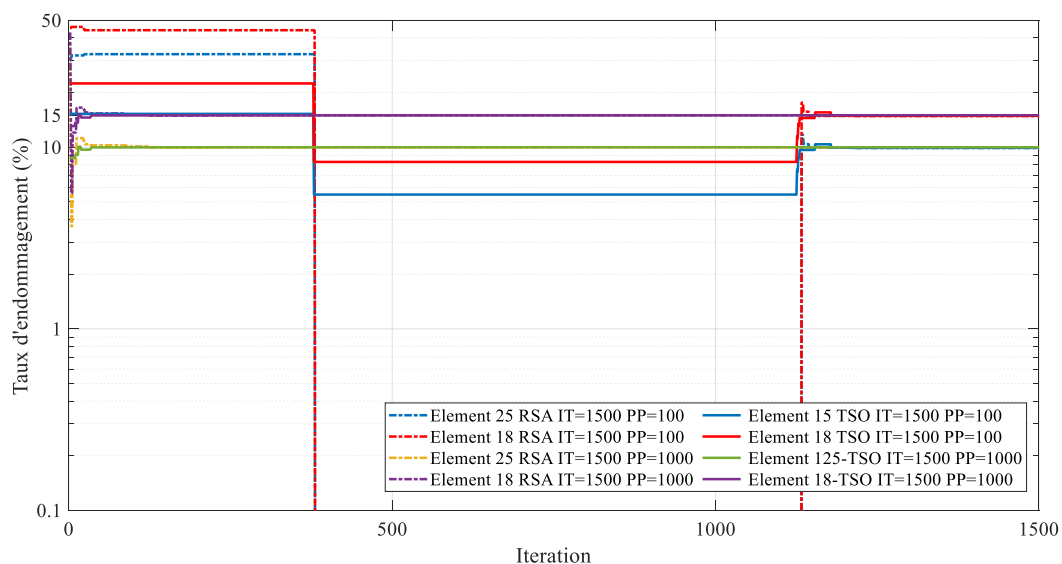


Figure V-79: Taux d'endommagement en fonction des itérations fixées à 1500 et population variées de 100 à 1000 pour les éléments 18 et 25.

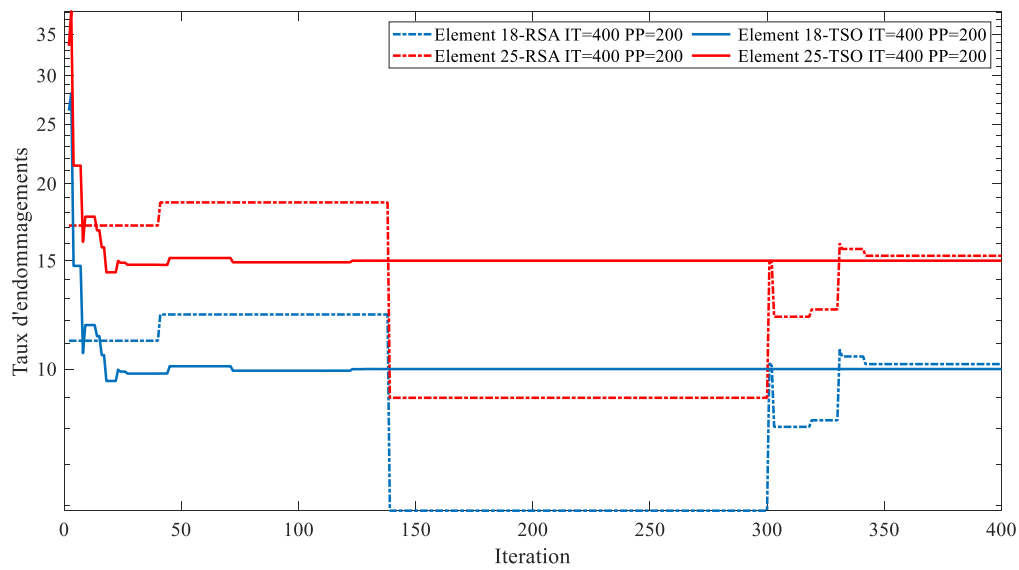


Figure V-80: Taux d'endommagement en fonction des population fixées à de 200 pour les éléments 18 et 25.

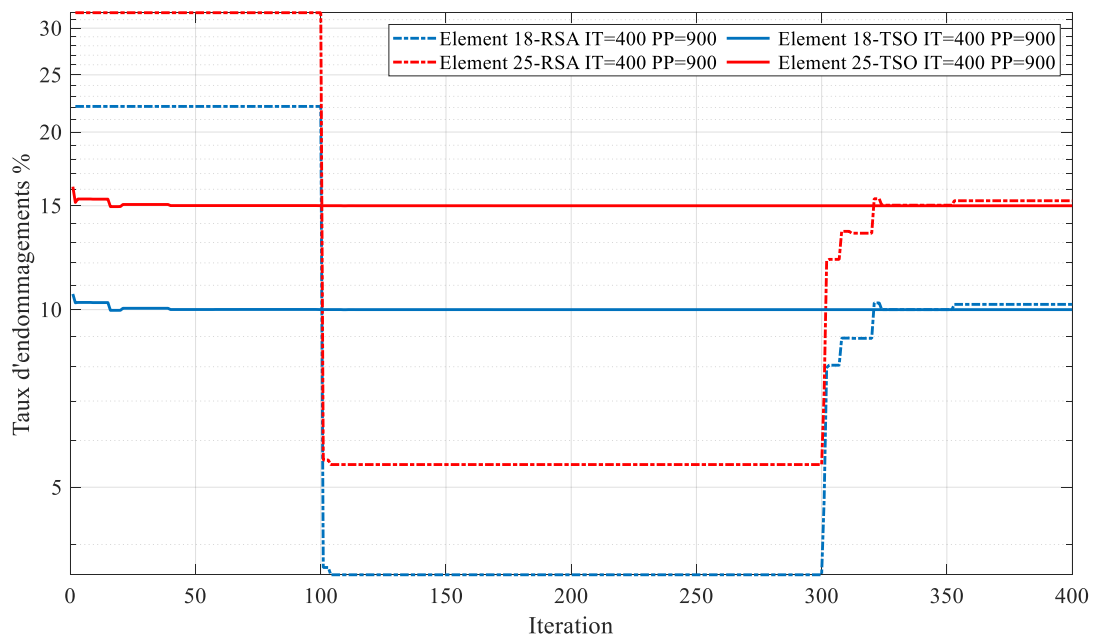


Figure V-81: Taux d'endommagement en fonction des population fixées à de 900 pour les éléments 18 et 25.

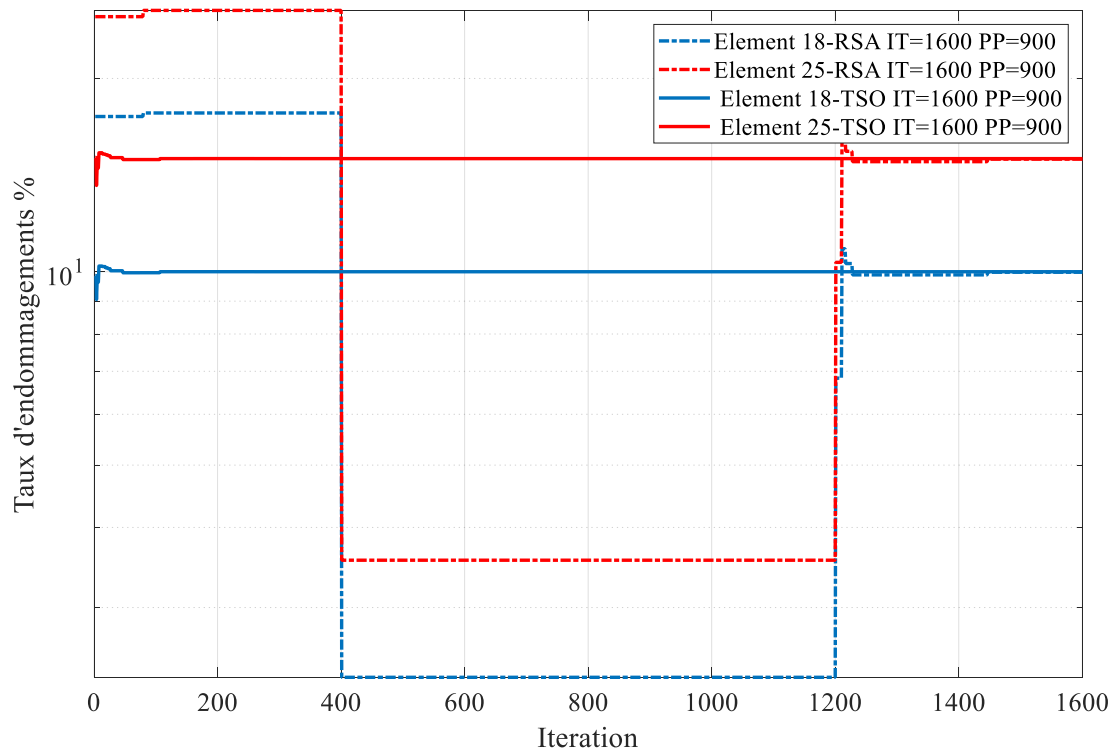


Figure V-82: Taux d'endommagement en fonction des population fixées à de 900 et 1600 itérations pour les éléments 18 et 25.

Temps de calcul Scénario 2 [s]				
Populations	Itérations fixées à 500		Itérations fixées à 1500	
	RSA	TSO	RSA	TSO
100	710,82	699,09	2122,1	2113,3
1000	7160,8	7000,4	21529	21073

Tableau V-5: Temps de calcul pour le deuxième scénario de la structure 3D 28 éléments .

Ce deuxième scénario est caractérisé par un endommagement de deux éléments 18 et 25 et d'après les optimisations lancées sur la structure les taux d'endommagements trouvés sont respectivement de 15% et 10%, TSO affirme une grande précision quel que soit dans les valeurs de best et la convergence. Dans ce cas aussi TSO est la plus rapide à effectuer les optimisations lancées à ce scénario.

VI.3 Temps de calcul pour les méthodes d'optimisations :

VI.3.1 Temps de calcul itérations fixées populations variées pour structure 31 éléments 2D :

Itérations fixées à 500						
populations	Temps Scénario 1 [s]		Temps Scénario 2 [s]		Temps Scénario 3 [s]	
	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
100	825,3	829,8	757,2	761,5	810,83	776,7
500	3910,6	3644	3891,1	3726,8	3994,3	3849,7
1000	7921,6	7817,5	7908,1	7829,5	7999,7	6748,2
Itérations fixées à 1000						
Populations	Temps Scénario 1 [s]		Temps Scénario 2 [s]		Temps Scénario 3 [s]	
	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
100	1585,4	1579,7	974	971,1	901,9	923,2
500	8066,1	19211	4233,7	4554,4	7889,7	7168,2
1000	15572	15449	13953	14429,5	14678	14727
Itérations fixées à 2000						
Populations	Temps Scénario 1 [s]		Temps Scénario 2 [s]		Temps Scénario 3 [s]	
	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
100	3107,3	3035,8	3201,7	3161,2	3366,7	5785
500	15715	15466	15863	15989	15699	15250
1000	30837	30357	30357	23153	26314	28372

Tableau V-6: Combinaison temps de calcul des optimisations RSA et TSO pour tous les scénario pour la structure 31 éléments 2D cas des itérations fixées 500, 100 et 2000.

VI.3.2 Temps de calcul populations fixées et itérations variées pour la structure 31 éléments 2D

Populations fixées à 200						
Itérations	Temps Scénario 1 [s]		Temps Scénario 2 [s]		Temps Scénario 3 [s]	
	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
400	1263,9	1302,7	965,1	847	978,6	910,8
800	2489,9	2481,7	2489,9	2283,1	2586,3	2453,2
1600	4645	4607,1	4130,7	4190,7	4284,1	4755,8
Populations fixées à 400						
Itérations	Temps Scénario 1 [s]		Temps Scénario 2 [s]		Temps Scénario 3 [s]	
	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
400	2397,5	2394,8	2038,5	2451,3	2149,5	2261,2
800	4679,5	4565,2	5011,3	4909	6112,2	5928,2
1600	9531,7	9319	10077	9288,8	12058	11487
Populations fixées à 900						
Itérations	Temps Scénario 1 [s]		Temps Scénario 2 [s]		Temps Scénario 3 [s]	
	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
400	5586,8	5550,4	4809,3	4929,3	5911,4	6225,3
800	10825	11176	10851	10649	12953	13864
1600	22462	22154	17314	20295	24589	24357

Tableau V-7: Combinaison temps de calcul des optimisations RSA et TSO pour tous les scénarios pour la structure 31 éléments 2D cas des populations fixées 200, 400 et 900.

Dans le tableau 6 et 7 on a présenté le temps de calcul en secondes des deux algorithmes pour RSA et TSO pour les trois scénarios d'endommagements. Les tableaux nous montrent d'abord que plus on augmente dans les populations et itérations plus le temps augmente (le temps de calcul est plus élevé).

Il montre également que l'algorithme TSO est plus rapide que l'algorithme RSA dans la majorité des optimisations. De plus, on constate que le temps de calcul pour les scénarios d'endommagement deux est trois fois plus de temps en comparant au premier.

VI.3.3 Temps de calcul itérations fixées populations variées pour structure 28 éléments 3D

Itérations fixées à 500				
Populations	Temps Scénario 1 [s]		Temps Scénario 2 [s]	
	RSA	TSO	RSA	TSO
100	705,87	685,51	710,82	699,09
1000	6992,8	6900,4	7160,8	7000,4
Itérations fixées à 1500				
Populations	Temps Scénario 1 [s]		Temps Scénario 2 [s]	
	RSA	TSO	RSA	TSO
100	2115,1	1916,1	2122,1	2113,3
1000	21359	20144	21529	21073

Tableau V-8: Combinaison temps de calcul des optimisations RSA et TSO pour tous les scénario pour la structure 28 éléments 3D cas des itérations fixées 500 et 1500.

VI.3.4 Temps de calcul itérations fixées populations variées pour structure 28 éléments 3D

Populations fixées à 200				
Itérations	Temps Scénario 1 [s]		Temps Scénario 2 [s]	
	RSA	TSO	RSA	TSO
400	1163,9	1151	1120,6	1087,1
1600	4676,6	4596,6	4461,1	4567,5
Populations fixées à 900				
Itérations	Temps Scénario 1 [s]		Temps Scénario 2 [s]	
	RSA	TSO	RSA	TSO
400	5202,1	5154,7	5159,4	4948,9
1600	19612	19135	20456	20637

Tableau V-9: Combinaison temps de calcul des optimisations RSA et TSO pour tous les scénario pour la structure 28 éléments 3D cas des populations fixées 200 et 900.

Pour ces tableaux 8 et 9 les temps de calcul pour les deux scénario d'endommagements pour des itérations fixées à 500 et 1500 puis des populations fixées à 200 et 900.

On remarque que TSO gade ça rapidité dans de nombreuse optimisations d'après les temps chronométrés par MATHLAB.

VI.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats d'optimisations pour la quantification de la gravité des endommagements de nos deux structures 2D et 3D, par les méthodes RSA et TSO, les simulations nous ont permis d'évaluer les valeurs de la fonction Best qui représente le taux d'endommagement en pourcentage, et Fitness, la vitesse de convergence (l'erreur).

Nous avons montré la fiabilité et l'efficacité de la méthode TSO dans ce qui est l'indication et la quantification de nos scénarios d'endommagements, par contre la méthode RSA a marqué une insuffisance dans la précision et une incapacité dans la quantification du troisième scénario, de même pour sa vitesse de convergence qui est plus faible à celle de TSO. De plus, de cette étude, on a pu établir une comparaison dans le temps d'exécution de ces deux algorithmes, qui consiste à indiquer sur la fluidité et la rapidité de TSO dans la majorité des cas optimisé.

Pour conclure et en tenant compte de nos résultats trouvés, on peut affirmer objectivement que l'algorithme d'optimisation TSO est une méthode de résolutions de la fonction objective, et s'avère être plus approprié dans le domaine de l'étude numérique affilier aux domaines techniques.

Conclusion générale :

Le travail de notre recherche se résulte à la quantification et à la localisation des endommagements, en se basent sur le concept de la modélisation des éléments finies et la dynamique des structures dans le cadre vibratoire, en optant sur l'étude non destructifs par la méthode de l'index de flexibilité.

Pour toute étude d'un système mécanique la méthode des éléments finie s'avère une étape indispensable car tout système doit être discrétiser en éléments afin d'établir le facteur de rigidité, s'ajoutant à ça la dynamique des structures est une science permettant connaître l'état vibratoire d'une structure et donc l'établissement des facteurs complémentaires telle que les matrices de masses.

Par la suite après l'élaboration d'une base de données pour les différents composants des structures, cela nous a permis d'étudier nos deux cas où on a pu extraire les paramètres modaux comme fréquences naturelle vecteur propre et pulsation propre, de suite après avoir affilier des scénarios d'endommagements, une inspection pour son comportement été établie en vue d'aboutir à un calcul d'erreur.

La méthode de l'index de flexibilité nous a détecté les éléments altérés en donnant des figures indiquent une localisation d'endommagements sous forme de pics, obtenues par un vecteur indicateur ce composant de la flexibilité de chaque élément.

Afin de quantifier ces altérations structurelles ont été épaulées par des algorithmes d'optimisation, des programmes dont leurs modèles mathématiques diffèrent, mais le but reste uniforme.

L'interprétation des résultats a bien différencié le mode opératoire de nos deux algorithmes, Les résultats nous ont montré qu'en terme de temps de calcul la méthode « TSO » est plus efficace que la méthode « RSA ». Le temps de calcul plus long pour un nombre d'itérations et populations élevées, ainsi que pour des scénarios d'endommagement multiples.

La performance et précision dans les calculs est assurée par la méthode « TSO » dont ce qui est ça vitesse de convergence élevées et les taux d'endommagements déduits avec une fine précision par contre « RSA » nous a montré une incapacité d'opérer dans les endommagements multiples supérieure à deux, comme le cas dans notre structure 2D durant le 3ème scénario.

L'utilisation de plusieurs modes de vibrations, et des différents cas des populations et itérations donne des taux d'endommagement précis, et des vitesses de convergence assez rapide. Et pour plus de précisions encore il est suggéré d'utiliser un nombre de n itération fixé à un grand chiffre et une population variée avec de très grands nombres.

Pour conclure, l'étude des structures et mécanismes pourrait s'affirmer comme initiation pour chaque conception, d'après notre recherche on a pu prouver l'affirmation des essais vibratoire non destructifs pour l'élaboration de l'état de santé structurelle et afin de prédire les insuffisances et les défaillances et pour but d'éclairer sur leur cycle de vie.

Références :

1. Derriso MM, O.S.D.M., *Military aircraft*. In: *Encyclopedia of structural*. Wiley Blackwell., 2009.
2. A., R., *Review of guided wave structural health monitoring*. *Shock Vibr Dig*. 2007.
3. Griffith, A.A., *The phenomenon of rupture and flow in solids*. Philosophical Transactions of the Royal Society London, 1920.: p. 163–198.
4. PETIT, h.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, 4 Avril 2014: p. 14-20.
5. Rytter, A., *Vibration based inspection of civil engineering structures*. PhD thesis. University of Aalborg, Denmark, 1993.
6. Saadat, S.A., Buckner, G, D, and Noori, M, N, *Structural system identification and damage detection using the intelligent parameter varying technique: an experimental study*. 2007: p. 3,231-243.
7. Saadat, S.A., Buckner, G, D, and Noori, M, N. , *Structural system identification and damage detection using the intelligent parameter varying technique: an experimental study*. structural health monitoring, 6, 2007. 6: p. (3,231-243).
8. Fox, R. and M. Kapoor, *Rates of change of eigenvalues and eigenvectors*. AIAA journal, 1968. 6(12): p. 2426-2429.
9. M. Christian Crémona (LCPC), M.R.L.C.L., M. Yves Gautier (CETE Sud-Ouest),, *Investigations et évaluations dynamiques des ponts*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées DISTC-Diffusion des éditions, Février 2009.
10. M. Abdel Wahab, a.G.D.R., *Damage detection in bridges using modal curvatures: application to a real damage scenario*. Journal of Sound and Vibration. 17.
11. X. Z. Chen, H.P.Z.a.C.Y.C., *Structural damage identification using test static data based on grey system theory*. , Journal of Zhejiang University SCIENCE 6A 2005.
12. X. Wang, N.H., H. Fukunaga and Z. H. Yao., *Structural damage identification using static test data and changes in frequencies*, . Engineering Structures, 2010.
13. F. Bakhtiari-Nejad, A.R.a.A.E., A, *structural damage detection method using static noisy data*. Engineering Structures, 2005.
14. Xu B, W.Z., Chen G and Yokoyama K., *Direct identification of structural parameters from dynamic responses with neural networks*. Eng Appl Artif Intell 2004.
15. Xu B, W.Z., Yokoyama K, Harada T and Chen G. A, *soft post-earthquake damage identification methodology using vibration time series*. Smart Mater Struct 2005.
16. Sieniawska R, Ś.P., Żukowski S, *Identification of the structure parameters applying a moving load*. . Journal of Soundand Vibration . 2009.
17. Zhu XQ, L.S., *Damage detection in simply supported concrete bridge structure under moving vehicular loads*. . Journal of Vibration and Acoustics 2006.
18. Yang, C., et al., *Applications of different criteria in structural damage identification based on natural frequency and static displacement*. Science China Technological Sciences, 2016. 59(11): p. 1746-1758.
19. Wang X J, Y.C., Wang L, et al, *Membership-set identification method for structural damage based on measured natural frequencies and static displacements*. . Struct Health Monitor., 2013.
20. Meirovitch, L., *Elements of Vibration Analysis, Second Edition*. McGraw-Hill Publishing Company, 1986.
21. Gudmundson, P., *"Eigenfrequency changes of structures due to cracks, notches or other geometrical changes"*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1982.
22. Kannappan, L., *Damage Detection in Structures using Natural Frequency Measurements*. School of Aerospace, Civil and Mechanical Engineering University of New South Wales, 2008.

Référence bibliographique

23. Gilbert-Rainer Gillich, N.N.N.M., Ion Cornel Mituletu, *Problem of Detecting Damage Through Natural Frequency Changes*. Department of Mechanical Engineering, University “Eftimie Murgu” of Resita P-ta Traian Vuia, , 07/04/2018.
24. FRIGUI, M.F.O., *Contribution au développement d'un système de surveillance des structures en génie civil*. Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP), 13 juillet 2018.
25. Messina, I.A., Jones and E,J Williams, *Damage detection and localisation using natural frequency changes*. Proceedings of Conference on Identification in Engineering Systems, Swansea, U.K.
26. C, R.F., KM Cone, *Vibration testing of the I-40 bridge before and after the introduction of damage*. Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference
27. P, C., R,D Adams, *The location of defects in structures from measurements of natural frequencies*. Journal of Strain Analysis.
28. A, B.a.E., J Nagy, *Improvement of a large analytical model using test data*. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal of Sound and Vibration.
29. G, L., A Ramanotrnja, *Optimal sensors deployment: applications to model updating problems*. Proceedings of Conference on Identification in Engineering Systems, Swansea, U.K.
30. E, J.W., A, Messina, *Damage detection and localisation using natural frequency sensitivity*. Proceedings of Conference on Identification in Engineering Systems, Swansea, U.K.
31. S. Doebling, C.F., M. Prime, and D, Shevits, *Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics*. A literature review, Los Alamos National Laboratory, USA.
32. Rotem, J.L.a.A., *Determination of reinforcement unbonding of composites by a vibration technique*. Journal of Composite Materials.
33. Abdelhak, O., *SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS DES MACHINES TOURNANTES DANS LE DOMAINE TEMPS-FRÉQUENCES UTILISANT LES RÉSEAUX DE NEURONES ET LA LOGIQUE FLOUE*. UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL, JUILLET 2014.
34. S. Qian, D.C., *Joint Time-Frequency Analysis*. Prentice Hall.
35. Saldaña, L.C., *ON TIME-FREQUENCY ANALYSIS FOR STRUCTURAL DAMAGE DETECTION*. UNIVERSITY OF PUERTO RICO MAYAGÜEZ CAMPUS, 2008.
36. Oh, C.K., and Sohn, H., *Unsupervised support vector machine based principal component analysis for structural health monitoring*. ” ICCES, 2008.
37. Farrar, C.R., and Worden, K, *Structural health monitoring: A machine learning perspective*, . John Wiley & Sons, Chichester, U.K, 2013.
38. Gui, G., Pan, H., Lin, Z., Li, Y., and Yuan, Z., “*Data-driven support vector machine with optimization techniques for structural health monitoring and damage detection*. ”KSCE J. Civ. Eng., 21(2), 523–534., (2017).
39. Bin, G.F., Gao, J. J., Li, X. J., , *Early fault diagnosis of rotating machinery based on wavelet packets—Empirical mode decomposition feature extraction and neural network*. Mech. Syst. Signal Process, 2012.
40. Yang, J., Lei, Y., Lin, S., and Huang, N, *Hilbert-Huang based approach for structural damage detection*. J. Eng. Mech, 2004.
41. Kim, H., and Melhem, H., *Damage detection of structures by wavelet analysis*. Eng. Struct, 2004.
42. Oudin, H., *Méthode des éléments finis 2008*: p. 75. 2008: p. 75.
43. G. R. Liu, S.S.Q., *The finite element method*, Butterworth-Heinemann. Oxford, England,, 2003: p. 67-71.
44. S.W. Doebling, e.a., *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in their Vibration Characteristics: A Literature Review*. Los Alamos National Lab NM (United States), 1996.
45. Zou, L.T., G.P. Steven, *Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures*. a review, J. Sound Vib, 2000.
46. Wang, L., *New damage localization indicator based on curvature for single-span beams*. Struct. Eng. Mech, 2014: p. 1037–1046.

Référence bibliographique

47. Rytter, *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures*. Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1993.
48. K. Pandey, M.B., *Damage detection in structures using changes in flexibility*. J. Sound Vib, 1994. **1**: p. 3–17.
49. Capozucca, *Static and dynamic response of damaged RC beams strengthened with NSM CFRP rods*. Compos. Struct, 2009. **3**: p. 237–248.
50. Tiachacht, A.B., S. Khatir, M. Abdel Wahab, A. Behtani, R. Capozucca, *Damage assessment in structures using combination of a modified Cornwell indicator and genetic algorithm*. Eng. Struct, 2018: p. 421–430
51. Jian-Fu Lin, J.W., Li-Xin Wang, Siu-seong Law., *Structural Damage Diagnosis-Oriented Impulse Response Function Estimation under Seismic Excitations*. Center of Safety Monitoring of Engineering Structures, Shenzhen Academy of Disaster Prevention and Reduction, China Earthquake Administration, Shenzhen, 9 December 2019.
52. Maity, S.C.M.A.Y.D.K.M.D., *A comparative study on crack identification of structures from the changes in natural frequencies using GA and PSO*. Engineering Computations. **31**.
53. H.M. Gomes, N.R.S., Silva, *Some comparisons for damage detection on structures using genetic algorithms and modal sensitivity method*, . Appl. Math. Model. , 2007. **32** p. 2216–2232,
54. Parloo, P.G., M.V. Overmeire,, *Damage assessment using mode shape sensitivities*. Mech. Syst. Signal Process., 2008. **17**: p. 499–518.
55. K. Pandey, M.B., M.M. Samman, *Damage detection from changes in curvature mode shapes*. J. Sound Vib, 1991: p. 321–332.
56. Salawu, S., *Detection of structural damage through changes in frequency: a review*. Eng. Struct, 1997. **19 (9)**: p. 718–723.
57. H. Ding, M.H., Z.R. Lu,, *Structural damage detection using artificial bee colony algorithm with hybrid search strategy*, . Swarm Evol. Comput., 2016. **28**: p. 1-13.
58. Zou, L.T., G.P. Steven, *Vibration-based model-dependent damage (de-lamination) identification and health monitoring for composite structures: a review*. J. Sound Vib, 2000: p. 357–378.
59. Horst, R., & Tuy, H, *Global optimization: Deterministic approaches*. . Springer Science & Business Media., 2013. **34**.
60. Abualigah, L., *Group search optimizer: a nature-inspired meta-heuristic optimization algorithm with its results, variants, and applications*,,. Neural Computing and Applications, 2020: p. 1–24.
61. Abualigah, L., & Diabat, A, *A comprehensive survey of the Grasshopper optimization algorithm: results, variants, and applications*. . Neural Computing and Applications, , 2020: p. 1–24.
62. Luenberger, D.G., Ye, Y., et al, *Linear and nonlinear programming*, . Springer., 1984. **2**.
63. Gardiner, C.W., et al., *Handbook of stochastic methods*. Berlin: springer, 1985. **3**.
64. Abualigah, L., Shehab, M., Alshinwan, M., & Alabool, H, *Salp swarm algorithm: a comprehensive survey*. Neural Computing and Applications, 2019: p. 1–21.
65. Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Abd Elaziz, M., & Gandomi, A. H, *The arithmetic optimization algorithm*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021. **Article 113609**.: p. 376.
66. Laith Abualigah a, b., , Mohamed Abd Elaziz c, Putra Sumari b, Zong Woo Geem d, Amir H. Gandomi e, *Reptile Search Algorithm (RSA): A nature-inspired meta-heuristic optimizer*. Elsevier, 24 October 202.
67. G. Wu, *Across neighborhood search for numerical optimization*. Information Sciences, 2016. **329**: p. 597–618.
68. G. Wu, W.P., P. N. Suganthan, and R. Mallipeddi, *A variable reduction strategy for evolutionary algorithms handling equality constraints*. Applied Soft Computing, 2015. **37**: p. 774–786.

Référence bibliographique

- 69. H.-G. Beyer and H.-P. Schwefel, *Evolution strategies – a comprehensive introduction,* " *Natural Computing*. 2002. **1**: p. 3–52.
- 70. J. Kennedy and R. Eberhart, *Particle swarm optimization*. in Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks - Conference Proceedings, Shenzhen, China, August 1995.
- 71. Caro, M.D.a.G.D., *Ant colony optimization: a new meta-heuristic*. in Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, Washington, DC, USA, July 1999.
- 72. Lei Xie , T.H., 1 Huan Zhou ,1 Zhuo-Ran Zhang,2 Bo Han,3 and Andi Tang 1, *Tuna Swarm Optimization: A Novel Swarm-Based Metaheuristic Algorithm for Global Optimization*. Hindawi Computational Intelligence and Neuroscience, 20 October 2021.

VI Annexes

Valeurs best pour la structure 2D 31 éléments

Itération fixées à 500						
Population	100		500		1000	
Itérations	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
1	0,0000%	0,000000000%	0,000000%	0,0000000000%	0,00000000%	0,000000000%
50	10,0398%	9,99990456%	9,995250%	10,0000066552%	10,00273926%	10,000004097%
100	10,0392%	10,00006751%	9,996714%	10,0000001341%	10,00042998%	9,999999973%
150	10,0392%	9,99999953%	9,996714%	10,0000000794%	10,00042998%	9,999999973%
200	10,0392%	9,99999953%	9,996714%	10,0000000069%	10,00042998%	10,000000001%
250	10,0392%	9,99999953%	9,996714%	9,9999999984%	10,00042998%	9,999999999%
300	10,0392%	9,99999975%	9,996714%	9,9999999984%	10,00042998%	10,000000000%
350	10,0392%	9,99999975%	9,996714%	9,9999999984%	10,00042998%	10,000000000%
400	10,0392%	9,99999975%	9,996714%	9,9999999984%	10,00042998%	10,000000000%
450	10,0392%	9,99999975%	10,000939%	9,9999999984%	10,00042998%	10,000000000%
500	10,0392%	9,99999975%	10,000939%	9,9999999984%	10,00042998%	10,000000000%

Tableau VI-1: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments premier scénario itération fixé à 500 et population variée.

Itération fixées à 1000						
Populations	100		500		1000	
Itérations	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
1	0,00000000%	0,00000000%	0,0000000000%	0,000000000%	0,0000000%	0,000000%
100	10,03918845%	9,99999990%	9,99671375124%	10,000004445%	9,9998905%	10,000001%
200	10,03918845%	9,99999991%	9,99967327933%	9,999999937%	9,9998905%	10,000000%
300	10,03918845%	9,99999991%	9,99967327933%	10,000000036%	9,9998905%	10,000000%
400	10,03918845%	9,99999997%	9,99967327933%	9,999999996%	9,9998905%	10,000000%
500	10,03918845%	9,99999997%	9,99967327933%	10,000000000%	9,9998905%	10,000000%
600	10,03918845%	9,99999997%	9,99967327933%	10,000000000%	9,9998905%	10,000000%
700	10,03918845%	9,99999997%	9,99967327933%	10,000000001%	9,9998905%	10,000000%
800	10,03918845%	9,99999997%	10,00000612670%	10,000000001%	9,9998905%	10,000000%
1000	10,03918845%	9,99999997%	10,00000612670%	10,000000001%	9,9998905%	10,000000%

Tableau VI-2: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments premier scénario itération fixé à 1000 et populations variée.

Annexes

Itération fixées à 2000						
Population	100		500		1000	
itérations	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
200	10,0392%	10,0000%	9,9997%	10,0000%	9,9999%	10,0000%
400	10,0375%	10,0000%	9,9997%	10,0000%	9,9999%	10,0000%
600	10,0375%	10,0000%	9,9997%	10,0000%	9,9999%	10,0000%
800	10,0375%	10,0000%	9,9997%	10,0000%	9,9999%	10,0000%
1000	10,0375%	10,0000%	9,9997%	10,0000%	9,9999%	10,0000%
1200	10,0375%	10,0000%	9,9997%	10,0000%	9,9999%	10,0000%
1400	10,0375%	10,0000%	9,9997%	10,0000%	9,9999%	10,0000%
1600	10,0375%	10,0000%	9,9997%	10,0000%	9,9999%	10,0000%
1700	10,0375%	10,0000%	9,9997%	10,0000%	9,9999%	10,0000%
1800	10,0375%	10,0000%	9,9997%	10,0000%	9,9999%	10,0000%
2000	10,0375%	10,0000%	9,9997%	10,0000%	9,9999%	10,0000%

Tableau VI-3: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments premier scénario itération fixé à 2000 et population variée.

Population fixées à 200								
Itérations	400		800			1600		
	RSA	TSO	Itérations	RSA	TSO	Itérations	RSA	TSO
1	0,0000%	0,0000%	1	0,0000%	0,0000%	1	0,0000%	9,9654%
40	10,0056%	9,99968%	80	10,5420%	10,0000%	160	9,9994%	10,0000%
80	10,0056%	10,00001%	160	10,5420%	10,0000%	320	9,9994%	10,0000%
120	10,0056%	10,00000%	240	10,5420%	10,0000%	480	9,9994%	10,0000%
160	10,0056%	10,00000%	320	10,5420%	10,0000%	640	9,9994%	10,0000%
200	10,0056%	10,00000%	400	9,6098%	10,0000%	800	9,9994%	10,0000%
240	10,0056%	10,00000%	480	9,6098%	10,0000%	960	9,9994%	10,0000%
280	10,0056%	10,00000%	560	9,6098%	10,0000%	1120	9,9994%	10,0000%
320	10,0056%	10,00000%	640	10,3532%	10,0000%	1280	9,9994%	10,0000%
360	10,0056%	10,00000%	720	10,3532%	10,0000%	1440	9,9994%	10,0000%
400	10,0056%	10,00000%	800	10,3532%	10,0000%	1600	9,9994%	10,0000%

Tableau VI-4: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments premier scénario population fixé à 200 et itération variée.

Annexes

Population fixées à 400								
itérations	400		800			1600		
	RSA	TSO	itérations	RSA	TSO	itérations	RSA	TSO
1	0,0000%	0,0000%	1	0,0000%	0,0000%	1	0,0000%	0,0000%
40	10,0649%	10,0000%	80	10,0024%	10,0000%	160	10,0173%	10,0000%
80	10,0649%	10,0000%	160	9,9987%	10,0000%	320	10,0073%	10,0000%
120	10,0640%	10,0000%	240	9,9999%	10,0000%	480	10,0073%	10,0000%
160	10,0640%	10,0000%	320	9,9999%	10,0000%	640	10,0073%	10,0000%
200	10,0640%	10,0000%	400	9,9999%	10,0000%	800	10,0073%	10,0000%
240	10,0640%	10,0000%	480	9,9999%	10,0000%	960	10,0073%	10,0000%
280	10,0640%	10,0000%	560	9,9999%	10,0000%	1120	10,0073%	10,0000%
320	10,0640%	10,0000%	640	9,9999%	10,0000%	1280	10,0073%	10,0000%
360	10,0640%	10,0000%	720	9,9999%	10,0000%	1440	10,0073%	10,0000%
400	10,0640%	10,0000%	800	9,9999%	10,0000%	1600	10,0073%	10,0000%

Tableau VI-5: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments premier scénario population fixé à 400 et itération variée.

Population fixées à 900								
Itérations	400		800			1600		
	RSA	TSO	Itérations	RSA	TSO	Itérations	RSA	TSO
1	0,00000%	0,000%	1	0,00000%	0,0000%	1	0,00000%	0,0000%
40	9,99878%	10,000%	80	10,00028%	10,0000%	160	9,99962%	10,00000%
80	9,99878%	10,000%	160	10,00028%	10,0000%	320	9,99985%	10,00000%
120	10,00057%	10,000%	240	9,99997%	10,0000%	480	9,99985%	10,0000%
160	10,00057%	10,000%	320	9,99997%	10,0000%	640	9,99985%	10,0000%
200	10,00057%	10,000%	400	9,99997%	10,0000%	800	9,99985%	10,0000%
240	10,00057%	10,000%	480	9,99997%	10,0000%	960	9,99985%	10,0000%
280	10,00057%	10,000%	560	9,99997%	10,0000%	1120	9,99985%	10,0000%
320	10,00057%	10,000%	640	9,99997%	10,0000%	1280	9,99985%	10,0000%
360	10,00057%	10,000%	720	9,99997%	10,0000%	1440	9,99985%	10,0000%
400	10,00057%	10,000%	800	9,99997%	10,0000%	1600	9,99985%	10,0000%

Tableau VI-6: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments premier scénario population fixé à 900 et itération variée.

Annexes

Itérations fixées à 500												
100					500				1000			
Itérations	RSA		TSO		RSA		TSO		RSA		TSO	
1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	8,9253%	13,4455%
50	28,3055%	39,5542%	9,8660%	14,8157%	7,1445%	11,0353%	10,1186%	15,1719%	13,2083%	19,5072%	9,9946%	14,9913%
100	28,3055%	39,5542%	9,8722%	14,8150%	16,4873%	24,3470%	9,9952%	14,9933%	13,2083%	19,5072%	9,9940%	14,9912%
150	2,7296%	4,2267%	9,8787%	14,8227%	3,6065%	5,5302%	9,9952%	14,9933%	8,1134%	12,2061%	9,9941%	14,9915%
200	2,7296%	4,2267%	10,0581%	15,0856%	3,6065%	5,5302%	9,9953%	14,9931%	8,1134%	12,2061%	9,9969%	14,9955%
250	2,7296%	4,2267%	10,0582%	15,0849%	3,6065%	5,5302%	9,9953%	14,9932%	8,1134%	12,2061%	9,9972%	14,9959%
300	2,7296%	4,2267%	10,0558%	15,0814%	3,6065%	5,5302%	9,9982%	14,9975%	8,1134%	12,2061%	9,9973%	14,9961%
350	2,7296%	4,2267%	10,0345%	15,0487%	3,6065%	5,5302%	9,9982%	14,9974%	8,1134%	12,2061%	9,9974%	14,9962%
400	8,0195%	12,0889%	10,0343%	15,0487%	10,3278%	15,4713%	9,9982%	14,9974%	8,4635%	12,7411%	9,9974%	14,9962%
450	8,9014%	13,4095%	10,0341%	15,0488%	9,9491%	14,9308%	9,9982%	14,9974%	8,3963%	12,6534%	9,9974%	14,9962%
500	8,9014%	13,4095%	10,0341%	15,0488%	9,9491%	14,9308%	9,9982%	14,9974%	9,6496%	14,4795%	9,9974%	14,9963%

Tableau VI-7: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments deuxième scénario itération fixé à 500 et population variée.

Annexes

Itérations fixées à 1000												
Population	100				500				1000			
Itérations	RSA		TSO		RSA		TSO		RSA		TSO	
1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,00000%	0,00000%	0,0000000%	0,0000000%
100	29,5687%	41,5047%	10,0631%	15,0909%	16,4873%	24,3470%	9,9607%	14,9434%	13,20830%	19,50715%	10,0136541%	15,0197722%
200	29,5687%	41,5047%	10,0625%	15,0911%	16,6438%	24,4266%	9,9768%	14,9662%	13,20830%	19,50715%	10,0136541%	15,0197722%
300	11,3771%	17,0736%	10,0601%	15,0868%	3,7512%	5,7652%	9,9778%	14,9678%	9,48367%	14,22569%	9,9978873%	14,9970820%
400	11,3771%	17,0736%	10,0050%	15,0072%	4,1612%	6,3916%	10,0014%	15,0021%	9,48367%	14,22569%	9,9978165%	14,9968349%
500	11,3771%	17,0736%	10,0046%	15,0067%	4,1612%	6,3916%	10,0011%	15,0017%	9,48367%	14,22569%	9,9980982%	14,9972399%
600	11,3771%	17,0736%	10,0046%	15,0067%	4,1612%	6,3916%	10,0011%	15,0016%	9,48367%	14,22569%	9,9987058%	14,9981284%
700	11,3771%	17,0736%	10,0046%	15,0067%	4,1612%	6,3916%	10,0011%	15,0016%	9,48367%	14,22569%	9,9987125%	14,9981305%
800	9,5379%	14,3293%	10,0046%	15,0067%	9,3081%	13,9936%	10,0011%	15,0016%	9,70365%	14,57690%	9,9987125%	14,9981305%
900	9,9729%	14,9731%	10,0046%	15,0067%	9,3081%	13,9936%	10,0011%	15,0016%	9,70365%	14,57690%	9,9987125%	14,9981305%
1000	9,9729%	14,9731%	10,0046%	15,0067%	9,8634%	14,7946%	10,0011%	15,0016%	9,70365%	14,57690%	9,9991002%	14,9986984%

Tableau VI-8: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments deuxième scénario itération fixé à 1000 et population variée.

Annexes

Itération fixées à 2000												
Populations	100				500				1000			
Itérations	RSA		TSO		RSA		TSO		RSA		TSO	
1	0,00000%	0,00000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
200	9,71318%	14,55390%	9,8497%	14,7835%	16,6438%	24,4266%	9,9728%	14,9603%	13,2083%	19,5072%	9,9806%	14,9719%
400	9,71318%	14,55390%	10,0069%	15,0098%	16,6438%	24,4266%	9,9788%	14,9692%	13,2083%	19,5072%	9,9967%	14,9953%
600	9,71318%	14,55390%	10,0071%	15,0104%	3,0359%	4,6701%	9,9840%	14,9768%	7,1163%	10,7471%	9,9985%	14,9977%
800	9,71318%	14,55390%	10,0071%	15,0103%	3,0359%	4,6701%	9,9966%	14,9951%	7,1163%	10,7471%	9,9986%	14,9979%
1000	9,71318%	14,55390%	10,0039%	15,0056%	3,0359%	4,6701%	9,9967%	14,9952%	7,1163%	10,7471%	9,9991%	14,9987%
1200	9,71318%	14,55390%	10,0039%	15,0056%	3,0359%	4,6701%	9,9986%	14,9980%	7,1163%	10,7471%	9,9999%	14,9999%
1400	9,71318%	14,55390%	10,0038%	15,0055%	3,0359%	4,6701%	9,9998%	14,9997%	7,1163%	10,7471%	9,9999%	14,9999%
1600	9,63830%	14,48332%	10,0038%	15,0055%	10,0312%	15,0559%	9,9998%	14,9997%	9,7473%	14,6452%	9,9999%	14,9999%
1800	9,63830%	14,48332%	10,0038%	15,0055%	9,9015%	14,8505%	9,9998%	14,9997%	10,0762%	15,1139%	9,9999%	14,9999%
2000	9,63830%	14,48332%	10,0038%	15,0055%	9,9015%	14,8505%	9,9998%	14,9997%	10,0762%	15,1139%	9,9999%	14,9999%

Tableau VI-9: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments deuxième scénario itération fixé à 2000 et population variée.

Annexes

Population fixées à 200														
Itérations	400				800					1600				
	RSA		TSO		Itérations	RSA		TSO		Itérations	RSA		TSO	
1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	1	0,0000%	0,0000%	27,7905%	39,0442%
40	36,3642%	50,5185%	9,7825%	14,6801%	80	18,1064%	26,5826%	9,8961%	14,8495%	160	24,5818%	35,3308%	9,9911%	14,9877%
80	36,3642%	50,5185%	9,9343%	14,9046%	160	18,1064%	26,5826%	10,0031%	15,0047%	320	24,5818%	35,3308%	9,9915%	14,9877%
120	2,4304%	3,7617%	9,9343%	14,9047%	240	3,3356%	5,1096%	10,0032%	15,0047%	480	2,9304%	4,4975%	9,9919%	14,9882%
160	3,4641%	5,3112%	9,9936%	14,9907%	320	3,3356%	5,1096%	10,0032%	15,0046%	640	2,9304%	4,4975%	9,9922%	14,9887%
200	3,4641%	5,3112%	9,9936%	14,9907%	400	3,3356%	5,1096%	10,0031%	15,0046%	800	2,9304%	4,4975%	9,9922%	14,9887%
240	3,4641%	5,3112%	9,9936%	14,9907%	480	3,3356%	5,10956%	10,0031%	15,0046%	960	2,9304%	4,4975%	9,9936%	14,9907%
280	3,4641%	5,3112%	9,9936%	14,9907%	560	3,3356%	5,10956%	10,0031%	15,0046%	1120	2,9304%	4,4975%	9,9941%	14,9915%
320	9,5726%	14,3279%	9,9936%	14,9907%	640	8,6835%	13,10830%	10,0031%	15,0046%	1280	8,5089%	12,8159%	9,9941%	14,9915%
360	9,1372%	13,7492%	9,9936%	14,9907%	720	10,7796%	16,14052%	10,0031%	15,0046%	1440	9,0933%	13,6884%	9,9941%	14,9915%
400	9,1372%	13,7492%	9,9936%	14,9907%	800	10,7796%	16,14052%	10,0031%	15,0046%	1600	9,8646%	14,7877%	9,9990%	14,9986%

Tableau VI-10: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments deuxième scénario population fixé à 200 et itération variée.

Annexes

Population fixées à 400														
400					800					1600				
Itérations	RSA		TSO		Itérations	RSA		TSO		Itérations	RSA		TSO	
1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	1	0,0000%	0,0000%	21,2954%	31,0768%
40	8,7619%	13,1955%	10,3199%	15,4801%	80	27,5140%	39,2136%	10,0260%	15,0376%	160	8,9061%	13,5098%	9,9284%	14,8961%
80	8,7619%	13,1955%	9,9057%	14,8624%	160	27,5140%	39,2136%	10,0240%	15,0348%	320	13,1936%	19,5245%	9,9942%	14,9916%
120	8,7619%	13,1955%	9,9057%	14,8631%	240	7,9421%	11,9644%	10,0060%	15,0087%	480	9,5838%	14,2968%	9,9942%	14,9916%
160	8,7619%	13,1955%	9,9692%	14,9552%	320	7,9421%	11,9644%	9,9975%	14,9964%	640	9,5838%	14,2968%	9,9945%	14,9920%
200	8,7619%	13,1955%	9,9867%	14,9808%	400	7,9421%	11,9644%	9,9994%	14,9992%	800	9,5838%	14,2968%	9,9949%	14,9926%
240	8,7619%	13,1955%	9,9867%	14,9808%	480	7,9421%	11,9644%	9,9995%	14,9992%	960	9,5838%	14,2968%	9,9950%	14,9927%
280	8,7619%	13,1955%	9,9867%	14,9808%	560	7,9421%	11,9644%	9,9995%	14,9992%	1120	9,5838%	14,2968%	9,9950%	14,9927%
320	8,7619%	13,1955%	9,9984%	14,9979%	640	9,1591%	13,7607%	9,9995%	14,9992%	1280	9,8105%	14,7338%	9,9950%	14,9927%
360	8,7619%	13,1955%	9,9984%	14,9979%	720	9,7001%	14,5851%	9,9995%	14,9992%	1440	9,7762%	14,6763%	9,9950%	14,9927%
400	10,4700%	15,6578%	9,9986%	14,9979%	800	9,3534%	14,0573%	10,00%	14,99921%	1600	9,7762%	14,6763%	9,9950%	14,9927%

Tableau VI-11: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments deuxième scénario population fixé à 400 et itération variée.

Annexes

Population fixées à 900														
400					800					1600				
Itérations	RSA		TSO		Itérations	RSA		TSO		Itérations	RSA		TSO	
1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
40	15,1468%	22,3064%	9,9611%	14,9417%	80	15,9173%	22,9891%	10,0141%	15,0240%	160	8,3474%	12,6252%	10,0228%	15,0330%
80	15,1468%	22,3064%	9,9607%	14,9431%	160	18,1359%	26,4446%	10,0129%	15,0186%	320	8,3474%	12,6252%	9,9850%	14,9785%
120	6,4738%	9,7994%	9,9925%	14,9891%	240	9,4053%	14,0915%	10,0125%	15,0181%	480	8,3474%	12,6252%	9,9929%	14,9897%
160	6,4738%	9,7994%	10,0019%	15,0027%	320	9,4053%	14,0915%	9,9982%	14,9975%	640	8,3474%	12,6252%	9,9994%	14,9991%
200	6,4738%	9,7994%	10,0019%	15,0027%	400	9,4053%	14,0915%	9,9990%	14,9986%	800	8,3474%	12,6252%	9,9994%	14,9992%
240	6,4738%	9,7994%	10,0019%	15,0027%	480	9,4053%	14,0915%	9,9990%	14,9986%	960	8,3474%	12,6252%	9,9994%	14,9992%
280	6,4738%	9,7994%	10,0019%	15,0027%	560	9,4053%	14,0915%	9,9990%	14,9986%	1120	8,3474%	12,6252%	9,9994%	14,9992%
320	11,2923%	16,8660%	10,0019%	15,0027%	640	9,6220%	14,4473%	9,9990%	14,9986%	1280	9,3475%	14,0490%	9,9994%	14,9992%
360	9,9521%	14,9271%	10,0019%	15,0027%	720	9,6220%	14,4473%	9,9990%	14,9986%	1440	9,3475%	14,0490%	9,9994%	14,9992%
400	9,9521%	14,9271%	10,0019%	15,0027%	800	9,6220%	14,4473%	9,9990%	14,9986%	1600	10,6069%	15,8764%	9,9994%	14,9992%

Tableau VI-12: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments deuxième scénario population fixé à 900 et itération variée.

Annexes

itérations fixées à 500	populations	itérations	1	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	100	Best RSA	0,0000%	43,4122%	43,4122%	0,0376%	0,0376%	0,0376%	0,0001%	0,0001%	0,0001%	0,0001%	0,0001%
			0,0000%	47,5910%	47,5910%	0,0527%	0,0527%	0,0527%	0,0001%	0,0001%	0,0001%	0,0001%	0,0001%
			0,0000%	56,9646%	56,9646%	0,0596%	0,0596%	0,0596%	0,0001%	0,0001%	0,0001%	0,0001%	0,0001%
		Best TSO	0,0000%	3,4368%	0,0147%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	4,0992%	0,0178%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	4,9665%	0,0214%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
	500	Best RSA	0,0000%	26,0599%	26,0599%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	27,7690%	27,7690%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	35,7304%	35,7304%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
		Best TSO	0,0000%	0,0028%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	0,0034%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	0,0041%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
	1000	Best RSA	0,0000%	10,8818%	10,8818%	0,0645%	0,0645%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	12,7037%	12,7037%	0,0798%	0,0798%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	15,9869%	15,9869%	0,0975%	0,0975%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
		Best TSO	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%

Tableau VI-13: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments troisième scénario itération fixé à 500 et population variée.

Annexes

itérations fixées à 1000	Populations	itérations	1	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
	100	Best RSA	0,0000%	46,2959%	46,2959%	0,0060%	0,0001%	0,0001%	1,13E-08	1,13E-08	1,13E-08	1,13E-08	1,13E-08
			0,0000%	54,1616%	54,1616%	0,0081%	0,0002%	0,0002%	1,33E-08	1,33E-08	1,33E-08	1,33E-08	1,33E-08
			0,0000%	60,5404%	60,5404%	0,0085%	0,0002%	0,0002%	1,68E-08	1,68E-08	1,68E-08	1,68E-08	1,68E-08
		Best TSO	0,0000%	0,1799%	0,0001%	0,0001%	0,0001%	0,0000%	1,28E-12	7,15E-13	5,32E-13	5,32E-13	6,60E-13
			0,0000%	0,2181%	0,0001%	0,0001%	0,0001%	0,0000%	1,78E-12	9,21E-13	7,09E-13	7,09E-13	9,68E-13
			0,0000%	0,2626%	0,0001%	0,0001%	0,0001%	0,0000%	2,05E-12	9,96E-13	7,65E-13	7,65E-13	8,75E-13
	500	Best RSA	0,0000%	26,0599%	26,0599%	0,0025%	0,0025%	0,0025%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	27,7690%	27,7690%	0,0032%	0,0032%	0,0032%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	35,7304%	35,7304%	0,0038%	0,0038%	0,0038%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
		Best TSO	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
	1000	Best RSA	0,0000%	4,8875%	13,7965%	0,0485%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	6,5849%	16,4816%	0,0566%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	5,7830%	20,2033%	0,0723%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
		Best TSO	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%

Tableau VI-14: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments troisième scénario itération fixé à 1000 et population variée.

Annexes

itérations fixées à 2000	Populations	itérations	1	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
	100	Best RSA	0,0000%	43,4122%	43,4122%	0,0002%	0,0002%	0,0002%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	47,5910%	47,5910%	0,0003%	0,0003%	0,0003%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	56,9646%	56,9646%	0,0003%	0,0003%	0,0003%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
		Best TSO	0,0000%	0,0442%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	0,0541%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	0,0653%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
	500	Best RSA	0,0000%	22,6958%	22,6958%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	25,8700%	25,8700%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	30,3691%	30,3691%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
		Best TSO	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
	1000	Best RSA	0,0000%	10,8818%	10,8818%	0,1134%	0,1134%	0,1134%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	12,7037%	12,7037%	0,1382%	0,1382%	0,1382%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	15,9869%	15,9869%	0,1634%	0,1634%	0,1634%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
		Best TSO	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
			0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%

Annexes

Populations fixées à 200	Itérations	itérations	1	40	80	120	160	200	240	280	320	360	400
	400	best RSA	0,0000%	61,6540%	61,6540%	0,7097%	0,7097%	0,7097%	0,0407%	0,0407%	0,0407%	0,0407%	0,0407%
			0,0000%	49,7676%	49,7676%	0,4898%	0,4898%	0,4898%	0,0287%	0,0287%	0,0287%	0,0287%	0,0287%
			0,0000%	72,9797%	72,9797%	0,9178%	0,9178%	0,9178%	0,0516%	0,0516%	0,0516%	0,0516%	0,0516%
		BEST TSO	42,2020%	16,2373%	16,4644%	20,3115%	20,2912%	20,1445%	20,1370%	20,1370%	20,1370%	20,1370%	20,1370%
			28,7820%	12,2034%	12,2555%	15,2181%	15,2291%	15,1103%	15,1061%	15,1062%	15,1062%	15,1062%	15,1062%
			50,58702%	20,41689%	20,64553%	25,38028%	25,35199%	25,17552%	25,16767%	25,16745%	25,16745%	25,16745%	25,16745%
		itérations	1	80	160	240	320	400	480	560	640	720	800
	800	best RSA	0,0000%	13,5810%	13,5810%	10,9238%	0,0373%	0,0373%	0,0373%	0,0373%	0,0373%	5,5901%	5,5901%
			0,0000%	10,0507%	10,0507%	7,6185%	0,0271%	0,0271%	0,0271%	0,0271%	0,0271%	4,0962%	4,0962%
			0,00000%	18,10942%	18,10942%	14,03106%	0,04704%	0,04704%	0,04704%	0,04704%	0,04704%	7,15639%	7,15639%
		BEST TSO	47,3663%	21,1320%	20,7333%	19,9514%	19,9577%	19,9582%	19,9583%	19,9583%	19,9583%	19,9583%	19,9583%
			44,7950%	15,9119%	15,5681%	14,9647%	14,9681%	14,9672%	14,9676%	14,9676%	14,9676%	14,9676%	14,9676%
			58,56516%	26,39983%	25,89421%	24,93875%	24,94753%	24,94886%	24,94911%	24,94911%	24,94911%	24,94911%	24,94911%
		itérations	1	160	320	480	640	800	960	1120	1280	1440	1600
	1600	best RSA	0,0000%	47,2133%	47,2133%	3,6249%	3,6249%	3,6249%	3,6249%	3,6249%	3,6249%	3,6249%	3,6249%
			0,0000%	37,1212%	37,1212%	2,6472%	2,6472%	2,6472%	2,6472%	2,6472%	2,6472%	2,6472%	2,6472%
			0,00000%	56,52289%	56,52289%	4,58607%	4,58607%	4,58607%	4,58607%	4,58607%	4,58607%	4,58607%	4,58607%
		BEST TSO	28,7420%	18,3398%	19,2254%	20,2357%	20,0899%	20,0614%	20,0613%	20,0613%	20,0613%	20,0613%	20,0613%
			26,4934%	13,7174%	14,3911%	15,1826%	15,0689%	15,0477%	15,0476%	15,0476%	15,0476%	15,0476%	15,0476%
			40,46817%	22,96277%	24,05277%	25,29002%	25,11024%	25,07501%	25,07488%	25,07488%	25,07488%	25,07488%	25,07488%

Tableau VI-15: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments troisième scénario Populations fixé à 200 et itération variée.

Annexes

			itération	1	40	80	120	160	200	240	280	320	360	400
Population fixées à 900	400	best RSA		0,00%	52,55%	52,55%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
				0,00%	41,71%	41,71%	0,03%	0,03%	0,03%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
				0,00%	63,56%	63,56%	0,06%	0,06%	0,06%	0,06%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
		BEST TSO		6,53%	19,20%	19,56%	19,56%	19,99%	19,99%	19,99%	19,99%	19,99%	19,99%	19,99%
				4,91%	14,36%	14,66%	14,66%	14,99%	14,99%	14,99%	14,99%	14,99%	14,99%	14,99%
				8,20%	24,05%	24,46%	24,46%	24,99%	24,98%	24,98%	24,98%	24,98%	24,98%	24,98%
		itération		1	80	160	240	320	400	480	560	640	720	800
	800	best RSA		0,00%	28,46%	28,46%	28,46%	28,46%	14,07%	14,07%	14,07%	14,07%	14,07%	14,07%
				0,00%	22,20%	22,20%	22,20%	22,20%	10,56%	10,56%	10,56%	10,56%	10,56%	10,56%
				0,00%	35,57%	35,57%	35,57%	35,57%	17,67%	17,67%	17,67%	17,67%	17,67%	17,67%
		BEST TSO		52,03%	19,73%	19,73%	19,84%	19,93%	19,93%	19,97%	19,97%	19,97%	19,97%	19,97%
				40,71%	14,80%	14,79%	14,88%	14,95%	14,95%	14,98%	14,98%	14,98%	14,98%	14,98%
				63,74%	24,67%	24,67%	24,80%	24,92%	24,92%	24,97%	24,97%	24,97%	24,97%	24,97%
		itérations		1	160	320	480	640	800	960	1120	1280	1440	1600
	1600	best RSA		0,0000%	62,9641%	63,1224%	2,2816%	2,2816%	2,2816%	2,2816%	2,2816%	15,8230%	15,8230%	15,8230%
				0,0000%	51,7175%	52,5269%	1,6594%	1,6594%	1,6594%	1,6594%	1,6594%	11,8982%	11,8982%	11,8982%
				0,0000%	72,9627%	73,7751%	2,9012%	2,9012%	2,9012%	2,9012%	2,9012%	19,9246%	19,9246%	19,9246%
		BEST TSO		28,0065%	19,7862%	19,7707%	19,8339%	19,9967%	19,9967%	19,9967%	19,9968%	19,9968%	19,9968%	19,9968%
				20,4737%	14,8302%	14,8227%	14,8704%	14,9974%	14,9974%	14,9975%	14,9975%	14,9975%	14,9975%	14,9975%
				33,8130%	24,7465%	24,7204%	24,7963%	24,9960%	24,9960%	24,9960%	24,9961%	24,9961%	24,9961%	24,9961%

Tableau VI-16: Valeurs de best pour la structure 2D 31 éléments troisième scénario Populations fixé à 900 et itération variée.

Annexes

Valeurs Fitness pour la Structure 2D 31 éléments.

Itération fixées à 500						
Populations	100		500		1000	
itérations	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
1	0,000136102075	0,000285140116	0,000060546106	0,000112955947	0,000002354757	0,000006897539
50	0,000034192988	0,000000082041	0,000004083037	0,000000005719	0,000002354757	0,000000003522
100	0,000033693429	0,000000058035	0,000002824888	0,000000000115	0,000000369623	0,000000000025
150	0,000033693429	0,000000000401	0,000002824888	0,000000000068	0,000000369623	0,000000000025
200	0,000033693429	0,000000000401	0,000002824888	0,000000000008	0,000000369623	0,000000000003
250	0,000033693429	0,000000000401	0,000002824888	0,000000000002	0,000000369623	0,000000000002
300	0,000033693429	0,000000000212	0,000002824888	0,000000000002	0,000000369623	0,000000000001
350	0,000033693429	0,000000000212	0,000002824888	0,000000000002	0,000000369623	0,000000000001
400	0,000033693429	0,000000000212	0,000002824888	0,000000000002	0,000000369623	0,000000000001
450	0,000033693429	0,000000000212	0,000000807389	0,000000000002	0,000000369623	0,000000000001
500	0,000033693429	0,000000000212	0,000000807389	0,000000000002	0,000000369623	0,000000000001

Tableau VI-17: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments premier scénario d'endommagement itération fixées à 500 et population variées.

Annexes

Itération fixées à 1000						
Populations	100		500		1000	
Itérations	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
1	0,0001361	0,00147647157	0,000060546	2,33937832E-05	0,0000190460	1,1421762E-06
100	0,0000337	0,00000000009	0,000002825	3,81884267E-09	0,0000000941	4,6361349E-10
200	0,0000337	0,00000000008	0,000000281	2,89615702E-11	0,0000000941	5,7881152E-11
300	0,0000337	0,00000000008	0,000000281	2,89615702E-11	0,0000000941	4,3996022E-12
400	0,0000337	0,00000000003	0,000000281	5,77472184E-12	0,0000000941	2,4505970E-12
500	0,0000337	0,00000000003	0,000000281	4,56875518E-12	0,0000000941	1,7271606E-12
600	0,0000337	0,00000000003	0,000000281	4,56875518E-12	0,0000000941	1,5494785E-12
700	0,0000337	0,00000000003	0,000000281	1,87403997E-12	0,0000000941	1,5494785E-12
800	0,0000337	0,00000000003	0,000000005	1,87403997E-12	0,0000000941	1,5494785E-12
1000	0,0000337	0,00000000003	0,000000005	1,87403997E-12	0,0000000941	1,5494785E-12

Tableau VI-18: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments premier scénario d'endommagement itération fixées à 1000 et population variées .

Annexes

Itération fixées à 2000						
Populations	100		500		1000	
Itérations	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
1	0,00306453	0,09470692	0,02929742	0,06107426	0,01257221	0,00979611
200	0,00306453	0,00049233	0,02136081	0,00008750	0,01257221	0,00006005
400	0,00306453	0,00002665	0,02136081	0,00006576	0,01257221	0,00001073
600	0,00306453	0,00002446	0,02127700	0,00005071	0,00957983	0,00000495
800	0,00306453	0,00002208	0,02127700	0,00001047	0,00957983	0,00000445
1000	0,00306453	0,00001299	0,02127700	0,00001017	0,00957983	0,00000289
1200	0,00306453	0,00001232	0,02127700	0,00000463	0,00957983	0,00000039
1400	0,00306453	0,00001183	0,02127700	0,00000108	0,00957983	0,00000031
1600	0,00142082	0,00001183	0,00102514	0,00000066	0,00143832	0,00000031
1800	0,00142082	0,00001183	0,00069756	0,00000066	0,00039426	0,00000031
2000	0,00142082	0,00001183	0,00069756	0,00000066	0,00039426	0,00000031

Tableau VI-19: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments premier scénario d'endommagement itération fixées à 2000 et population variées.

Annexes

Population fixées à 200								
400			800			1600		
itérations	RSA	TSO	itérations	RSA	TSO	itérations	RSA	TSO
1	3,603000E-05	2,74155E-04	1	4,693804E-04	3,7965E-05	1	2,1119E-04	2,9702E-05
40	4,798436E-06	2,78359E-07	80	4,671418E-04	2,5538E-09	160	5,1689E-07	1,8698E-09
80	4,798436E-06	7,06338E-09	160	4,671418E-04	2,4804E-09	320	5,1689E-07	1,3061E-10
120	4,798436E-06	9,94091E-10	240	4,671418E-04	9,0393E-10	480	5,1689E-07	1,1243E-10
160	4,798436E-06	2,38843E-11	320	4,671418E-04	1,7905E-10	640	5,1689E-07	2,2990E-11
200	4,798436E-06	1,38014E-11	400	3,348151E-04	1,7905E-10	800	5,1689E-07	2,1509E-11
240	4,798436E-06	3,05260E-12	480	3,348151E-04	1,7905E-10	960	5,1689E-07	1,2770E-11
280	4,798436E-06	3,05260E-12	560	3,348151E-04	1,7905E-10	1120	5,1689E-07	1,2770E-11
320	4,798436E-06	3,05260E-12	640	3,041178E-04	1,7905E-10	1280	5,1689E-07	1,2770E-11
360	4,798436E-06	3,05260E-12	720	3,041178E-04	1,1713E-10	1440	5,1689E-07	1,2770E-11
400	4,798436E-06	3,05260E-12	800	3,041178E-04	1,1713E-10	1600	5,1689E-07	1,2770E-11

Tableau VI-20: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments premier scénario d'endommagement population fixées à 200 et itérations variées.

Annexes

Population fixées à 400								
400			800			1600		
itérations	RSA	TSO	itérations	RSA	TSO	itérations	RSA	TSO
1	5,58E-05	1,712921E-05	1	3,7603E-04	4,71680E-05	1	0,00023445	2,101167E-07
40	0,000056	1,453049E-08	80	2,0458E-06	4,95995E-09	160	0,00001488	5,1425008E-11
80	0,000056	4,817947E-10	160	1,0825E-06	1,12637E-11	320	0,00000628	3,2615198E-11
120	0,000055	1,255803E-10	240	9,5415E-08	1,12637E-11	480	0,00000628	1,0905839E-11
160	0,000055	7,684800E-11	320	9,5415E-08	6,74059E-12	640	0,00000628	1,6704705E-12
200	0,000055	4,288431E-11	400	9,5415E-08	6,74059E-12	800	0,00000628	1,6704705E-12
240	0,000055	1,294836E-11	480	9,5415E-08	6,74059E-12	960	0,00000628	1,6704705E-12
280	0,000055	1,294836E-11	560	9,5415E-08	6,74059E-12	1120	0,00000628	1,6704705E-12
320	0,000055	1,294836E-11	640	9,5415E-08	6,74059E-12	1280	0,00000628	1,6704705E-12
360	0,000055	1,294836E-11	720	9,5415E-08	6,74059E-12	1440	0,00000628	1,6704705E-12
400	0,000055	1,294836E-11	800	9,5415E-08	6,74059E-12	1600	0,00000628	1,6704705E-12

Tableau VI-21: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments premier scénario d'endommagement population fixées à 400 et itérations variées

Annexes

Population fixées à 900								
400			800			1600		
Itérations	RSA	TSO	Itérations	RSA	TSO	Itérations	RSA	TSO
1	0,0000068007	2,427838947E-05	1	1,154E-05	4,4686092E-05	1	4,286270E-05	7,16129E-06
40	0,0000058007	2,058705618E-09	80	2,440E-07	6,5379569E-10	160	3,250174E-07	3,12780E-12
80	0,0000058007	1,375438106E-11	160	2,440E-07	2,1130954E-11	320	1,316903E-07	3,12780E-12
120	0,0000054007	1,375438106E-11	240	2,838E-08	1,6179765E-12	480	1,316903E-07	2,52875E-12
160	0,0000054007	2,719308696E-12	320	2,838E-08	1,6179765E-12	640	1,316903E-07	1,54080E-12
200	0,0000050007	1,918963081E-12	400	2,838E-08	1,6179765E-12	800	1,316903E-07	1,41754E-12
240	0,0000050007	1,918963081E-12	480	2,838E-08	1,6179765E-12	960	1,316903E-07	1,18081E-12
280	0,0000050007	1,918963081E-12	560	2,838E-08	1,6179765E-12	1120	1,316903E-07	1,18081E-12
320	0,0000042007	1,918963081E-12	640	2,838E-08	1,6179765E-12	1280	1,316903E-07	1,18081E-12
360	0,0000042007	1,918963081E-12	720	2,838E-08	1,6179765E-12	1440	1,316903E-07	1,18081E-12
400	0,0000042007	1,918963081E-12	800	2,838E-08	1,6179765E-12	1600	1,316903E-07	1,18081E-12

Tableau VI-22: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments premier scénario d'endommagement population fixées à 900 et itérations variées .

Annexes

Itération fixées à 500						
Populations	100		500		1000	
Itérations	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
1	0,0030645	0,0282771	0,0292974	0,0650916	0,0125722	0,0034943
50	0,0030645	0,0010774	0,0292974	0,0003677	0,0125722	0,0000819
100	0,0030645	0,0003979	0,0226878	0,0000258	0,0125722	0,0000187
150	0,0030645	0,0003946	0,0194055	0,0000226	0,0073676	0,0000185
200	0,0030645	0,0002167	0,0194055	0,0000147	0,0073676	0,0000096
250	0,0030645	0,0001847	0,0194055	0,0000146	0,0073676	0,0000088
300	0,0030645	0,0001802	0,0194055	0,0000110	0,0073676	0,0000084
350	0,0030645	0,0001732	0,0194055	0,0000060	0,0073676	0,0000083
400	0,0018464	0,0001453	0,0005184	0,0000060	0,0051272	0,0000083
450	0,0018464	0,0001244	0,0004839	0,0000060	0,0049894	0,0000083
500	0,0018464	0,0001244	0,0004839	0,0000060	0,0015822	0,0000082

Tableau VI-23: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments deuxième scénario d'endommagement itération fixées à 500 et populations variées .

Annexes

Itération fixées à 1000						
Populations	100		500		1000	
Itérations	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
1	0,09092317	0,04717818	0,02929742	0,04848180	0,01257221	0,03252022
100	0,08591238	0,00053065	0,02268781	0,00012956	0,01257221	0,00004247
200	0,08591238	0,00006798	0,02136081	0,00007224	0,01257221	0,00004247
300	0,02982836	0,00006798	0,01959705	0,00006873	0,00289527	0,00001569
400	0,02982654	0,00005067	0,01875990	0,00000445	0,00289527	0,00000677
500	0,02982654	0,00004562	0,01875990	0,00000355	0,00289527	0,00000589
600	0,02982431	0,00004492	0,01875990	0,00000352	0,00289527	0,00000405
700	0,02982431	0,00004487	0,01875990	0,00000349	0,00289527	0,00000399
800	0,02981751	0,00004487	0,00213602	0,00000349	0,00116998	0,00000399
900	0,02981751	0,00004487	0,00213602	0,00000349	0,00116998	0,00000399
1000	0,02981751	0,00004487	0,00081322	0,00000349	0,00116998	0,00000282

Tableau VI-24: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments deuxième scénario d'endommagement itération fixées à 1000 et populations variées.

Annexes

Itération fixées à 2000						
Populations	100		500		1000	
Itérations	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
1	0,003064529	0,094706916	0,029297416	0,061074260	0,012572207	0,009796111
200	0,003064529	0,000492334	0,021360806	0,000087502	0,012572207	0,000060055
400	0,003064529	0,000026648	0,021360806	0,000065764	0,012572207	0,000010730
600	0,003064529	0,000024463	0,021276997	0,000050713	0,009579831	0,000004947
800	0,003064529	0,000022078	0,021276997	0,000010475	0,009579831	0,000004453
1000	0,003064529	0,000012986	0,021276997	0,000010172	0,009579831	0,000002888
1200	0,003064529	0,000012322	0,021276997	0,000004633	0,009579831	0,000000393
1400	0,003064529	0,000011830	0,021276997	0,000001080	0,009579831	0,000000314
1600	0,001420824	0,000011830	0,001025139	0,000000660	0,001438323	0,000000314
1800	0,001420824	0,000011830	0,000697556	0,000000660	0,000394262	0,000000314
2000	0,001420824	0,000011830	0,000697556	0,000000660	0,000394262	0,000000314

Tableau VI-25: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments deuxième scénario d'endommagement itération fixées à 2000 et populations variées.

Annexes

Population fixées à 200								
Itérations	400		800			1600		
	RSA	TSO	Itérations	RSA	TSO	Itérations	RSA	TSO
1	0,09967891	0,02260739	1	0,0276310	0,0171964	1	0,10463094	0,06182480
40	0,09967891	0,00020359	80	0,0276310	0,0003226	160	0,05026541	0,00007289
80	0,09967891	0,00020359	160	0,0276310	0,0000149	320	0,05026541	0,00002643
120	0,02443492	0,00020343	240	0,0201790	0,0000123	480	0,02134429	0,00002523
160	0,01978205	0,00002038	320	0,0201790	0,0000098	640	0,02134429	0,00002460
200	0,01978205	0,00001997	400	0,0201790	0,0000098	800	0,02134429	0,00002421
240	0,01978205	0,00001997	480	0,0201790	0,0000097	960	0,02134429	0,00001999
280	0,01978205	0,00001997	560	0,0201790	0,0000097	1120	0,02134429	0,00001818
320	0,00530835	0,00001997	640	0,0050115	0,0000097	1280	0,00470575	0,00001818
360	0,00270551	0,00001997	720	0,0026722	0,0000097	1440	0,00292072	0,00001818
400	0,00270551	0,00001997	800	0,0026722	0,0000097	1600	0,00159774	0,00000312

Tableau VI-26: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments deuxième scénario d'endommagement populations fixées à 200 et itérations variées.

Annexes

Populations fixées à 400								
Itérations	400		800			1600		
	RSA	TSO	Itérations	RSA	TSO	Itérations	RSA	TSO
1	0,00381130	0,02998322	1	0,06171943	0,04889927	1	0,019611	0,040830
40	0,00381130	0,00184272	80	0,06171943	0,00008131	160	0,011446	0,000222
80	0,00381130	0,00030036	160	0,06171943	0,00007477	320	0,011041	0,000018
120	0,00381130	0,00029214	240	0,00718906	0,00001968	480	0,009916	0,000018
160	0,00381130	0,00009623	320	0,00718906	0,00000795	640	0,009916	0,000017
200	0,00381130	0,00004180	400	0,00718906	0,00000292	800	0,009916	0,000016
240	0,00381130	0,00004180	480	0,00718906	0,00000169	960	0,009916	0,000016
280	0,00381130	0,00004180	560	0,00718906	0,00000169	1120	0,009916	0,000016
320	0,00381130	0,00002101	640	0,00306898	0,00000169	1280	0,001062	0,000016
360	0,00381130	0,00002101	720	0,00225525	0,00000169	1440	0,000706	0,000016
400	0,00259077	0,00000819	800	0,00201213	0,00000169	1600	0,000706	0,000016

Tableau VI-27: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments deuxième scénario d'endommagement populations fixées à 400 et itérations variées.

Annexes

Population fixées à 900								
Itérations	400		800			1600		
	RSA	TSO	Itérations	RSA	TSO	Itérations	RSA	TSO
1	0,037181413	0,048711	1	0,03372504	0,01857711	1	0,015833078	0,012168284
40	0,016543793	0,000216	80	0,03372504	0,00034839	160	0,006541617	0,000070649
80	0,016543793	0,000122	160	0,02645901	0,00004055	320	0,006541617	0,000048883
120	0,011302446	0,000024	240	0,00483899	0,00003875	480	0,006541617	0,000022049
160	0,011302446	0,000008	320	0,00483899	0,00000499	640	0,006541617	0,000001863
200	0,011302446	0,000006	400	0,00483899	0,00000306	800	0,006541617	0,000001782
240	0,011302446	0,000006	480	0,00483899	0,00000306	960	0,006541617	0,000001750
280	0,011302446	0,000006	560	0,00483899	0,00000303	1120	0,006541617	0,000001749
320	0,004032994	0,000006	640	0,00122041	0,00000297	1280	0,002027501	0,000001749
360	0,000365486	0,000006	720	0,00122041	0,00000297	1440	0,002027501	0,000001749
400	0,000365486	0,000006	800	0,00122041	0,00000297	1600	0,001898007	0,000001749

Tableau VI-28: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments deuxième scénario d'endommagement populations fixées à 900 et itérations variées

Annexes

itérations fixées à 500						
Populations	100		500		1000	
itérations	CONV	CURVE	CONV	CURVE	CONV	CURVE
1	1,153545	1,099861	1,083457	1,060286	1,041209	1,050513
50	1,125564	1,02521	1,078735	1,018418	1,041209	1,018423
100	1,125564	1,01846	1,078735	1,018411	1,041209	0,961865
150	1,025207	1,018415	1,020232	1,013515	1,018983	0,937455
200	1,025207	1,0184	1,018799	0,952406	1,018983	0,937455
250	1,025207	1,01839	0,967719	0,938989	1,018405	0,904028
300	1,018469	1,013501	0,967719	0,918676	1,018405	0,890891
350	1,018469	0,982475	0,967719	0,903352	1,018405	0,890891
400	1,018469	0,959253	0,967719	0,903352	1,018405	0,890891
450	1,018469	0,959253	0,967719	0,903352	1,018405	0,890891
500	1,018469	0,954811	0,967719	0,878835	1,018405	0,890891

Tableau VI-29: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments deuxième scénario d'endommagement itération fixées à 500 et populations variées .

itérations fixées à 1000						
Populations	100		500		1000	
itérations	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
1	1,141453	1,121715	1,083457	1,102452	1,06036	1,051939
100	1,136279	1,018778	1,078735	1,018428	1,06036	1,018412
200	1,136279	1,018413	1,078735	1,018402	1,047707	1,006136
300	1,02352	1,018412	1,018727	0,937581	1,019042	0,959196
400	1,022771	1,018409	1,018727	0,906449	1,018897	0,895629
500	1,022771	1,018409	1,018727	0,900555	1,018897	0,86163
600	1,018789	0,989168	1,01842	0,900555	1,018525	0,86163
700	1,018789	0,953813	1,01842	0,900555	1,013515	0,86163
800	1,018789	0,928618	1,01842	0,894053	1,013515	0,86163
900	1,018789	0,928618	1,01842	0,894053	1,013515	0,86163
1000	1,018789	0,927218	1,01842	0,894053	1,013515	0,86163

Tableau VI-30: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments deuxième scénario d'endommagement itération fixées à 1000 et populations variées .

Annexes

itérations fixées à 2000						
Populations	100		500		1000	
itérations	RSA	TSO	RSA	TSO	RSA	TSO
1	1,153545	1,067578	1,067858	1,086714	1,041209	1,087405
200	1,125564	1,018507	1,067858	1,018411	1,041209	1,014945
400	1,125564	1,018409	1,067858	0,966261	1,041209	0,933303
600	1,019177	1,018392	1,004508	0,940782	1,018812	0,904647
800	1,019177	1,011163	1,004508	0,88794	1,018812	0,875505
1000	1,019177	0,931144	1,004508	0,861509	1,018812	0,869867
1200	1,018426	0,925088	1,004508	0,861509	1,018416	0,854259
1400	1,018426	0,921331	1,004508	0,861509	1,018416	0,854259
1600	1,018426	0,921331	1,004508	0,861509	1,018416	0,854259
1800	1,018426	0,921331	1,004508	0,861509	1,018416	0,854259
2000	1,018426	0,921331	1,004508	0,861509	1,018416	0,854259

Tableau VI-31: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments deuxième scénario d'endommagement itération fixées à 2000 et populations variées .

Population fixées à 200								
itérations	400		800			1600		
	RSA	TSO	itérations	RSA	TSO	itérations	RSA	TSO
1	0,189976	0,163084	1	0,08742	0,230323	1	0,092478	0,265921
40	0,14889	0,01246	80	0,08742	0,003613	160	0,084007	0,00422
80	0,14889	0,009018	160	0,08742	0,001887	320	0,084007	0,002046
120	0,065744	0,00169	240	0,062281	0,000237	480	0,038651	0,00062
160	0,065744	0,0008	320	0,048404	0,000136	640	0,038651	0,00024
200	0,065744	0,000393	400	0,048404	0,000109	800	0,038651	0,000157
240	0,051488	0,000352	480	0,048404	0,000107	960	0,038651	0,000157
280	0,051488	0,000351	560	0,048404	0,000107	1120	0,038651	0,000157
320	0,051488	0,000351	640	0,048404	0,000107	1280	0,038651	0,000157
360	0,051488	0,000351	720	0,036008	0,000107	1440	0,038651	0,000157
400	0,051488	0,000351	800	0,036008	0,000107	1600	0,038651	0,000157

Tableau VI-32: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments deuxième scénario d'endommagement populations fixées à 200 itération variées .

Annexes

Populations fixées à 900								
Itération	400		Itération	800		Itérations	1600	
	RSA	TSO		RSA	TSO		RSA	TSO
1	1,10E-01	0,041197	1	0,035841	0,123688	1	2,18E-01	0,060569
40	1,10E-01	0,002903	80	0,035841	0,000714	160	1,52E-01	0,000785
80	1,10E-01	0,001127	160	0,035841	0,000683	320	1,52E-01	0,000588
120	4,87E-02	0,001126	240	0,035841	0,00041	480	4,10E-02	0,000429
160	4,87E-02	0,000121	320	0,035841	0,000175	640	4,10E-02	8,85E-06
200	4,87E-02	3,39E-05	400	0,017956	0,000174	800	4,10E-02	8,42E-06
240	4,87E-02	3,37E-05	480	0,017956	7,44E-05	960	4,10E-02	8,34E-06
280	4,77E-02	3,37E-05	560	0,017956	7,29E-05	1120	4,10E-02	8,23E-06
320	4,77E-02	3,37E-05	640	0,017956	7,28E-05	1280	1,42E-02	8,16E-06
360	4,77E-02	3,37E-05	720	0,017956	7,28E-05	1440	1,42E-02	8,16E-06
400	4,77E-02	3,37E-05	800	0,017956	7,28E-05	1600	1,42E-02	8,16E-06

Tableau VI-33: Valeurs de fitness de la structure 2D 31éléments deuxième scénario d'endommagement
populations fixées à 900 itération variées

Valeurs Best pour la structure 3D 28 éléments :

itérations fixées à 500				
itérations	100		1000	
	RSA	TSO	RSA	TSO
1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
50	9,9921%	10,0001%	10,0001%	10,0000%
100	9,9921%	10,0000%	10,0001%	10,0000%
150	9,9921%	10,0000%	10,0001%	10,0000%
200	9,9921%	10,0000%	10,0001%	10,0000%
250	9,9921%	10,0000%	10,0001%	10,0000%
300	9,9921%	10,0000%	10,0001%	10,0000%
350	9,9921%	10,0000%	10,0001%	10,0000%
400	9,9921%	10,0000%	10,0001%	10,0000%
450	9,9921%	10,0000%	10,0001%	10,0000%
500	9,9972%	10,0000%	10,0001%	10,0000%

Tableau VI-34: Valeurs de best de la structure 3D 28 éléments premier scénario d'endommagement itérations fixées à 500 populations variées

Itérations fixées à 1500				
Populations	100		1000	
Itérations	RSA	TSO	RSA	TSO
1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,00000%
150	10,0863%	10,0000%	9,9997%	10,0000%
300	10,0796%	10,0000%	9,9997%	10,0000%
450	10,0796%	10,0000%	9,9997%	10,0000%
600	10,0796%	10,0000%	9,9997%	10,0000%
750	10,0796%	10,0000%	9,9997%	10,0000%
900	10,0796%	10,0000%	9,9997%	10,0000%
1050	10,0796%	10,0000%	9,9997%	10,0000%
1200	10,0796%	10,0000%	9,9999%	10,0000%
1350	10,0796%	10,0000%	9,9999%	10,0000%
1500	10,0796%	10,0000%	9,9999%	10,0000%

Tableau VI-35: Valeurs de best de la structure 3D 28 éléments premier scénario d'endommagement itérations fixées à 500 populations variées .

Annexes

Populations fixées à 200					
itération	400		1600		
	RSA	TSO	itération	RSA	TSO
1	0,00000%	0,0000%	1	0,00000%	0,0000%
40	10,00364%	10,00039%	160	10,00004%	10,0000%
80	10,00328%	9,99999%	320	10,00004%	10,0000%
120	10,00328%	10,00000%	480	10,00004%	10,0000%
160	10,00328%	10,00000%	640	10,00004%	10,0000%
200	10,00328%	10,00000%	800	10,00004%	10,0000%
240	10,00328%	10,00000%	960	10,00004%	10,0000%
280	10,00328%	10,00000%	1120	10,00004%	10,0000%
320	10,00328%	10,00000%	1280	10,00004%	10,0000%
360	10,00328%	10,00000%	1440	10,00004%	10,0000%
400	10,00328%	10,00000%	1600	10,00004%	10,0000%

Tableau VI-36: Valeurs de best de la structure 3D 28 éléments premier scénario d'endommagement populations fixées à 200 itérations variées.

Populations fixées à 900					
itérations	400		itérations	1600	
	Best (RSA)	Best (TSO)		Best(RSA)	Best(TSO)
1	0,00000000%	0,0000%	1	0,00000%	0,0000%
40	9,99996957%	9,999998%	160	10,00054%	10,000000%
80	9,99996957%	10,000000%	320	10,00022%	10,000000%
120	9,99996957%	10,000000%	480	10,00010%	10,000000%
160	9,99996957%	10,000000%	640	10,00010%	10,000000%
200	9,99996957%	10,000000%	800	10,00010%	10,000000%
240	9,99996957%	10,000000%	960	10,00010%	10,000000%
280	9,99996957%	10,000000%	1120	10,00010%	10,000000%
320	9,99996957%	10,000000%	1280	10,00010%	10,000000%
360	9,99996957%	10,000000%	1440	10,00010%	10,000000%
400	9,99996957%	10,000000%	1600	10,00010%	10,000000%

Tableau VI-37: Valeurs de best de la structure 3D 28 éléments premier scénario d'endommagement populations fixées à 900 itérations variées.

Annexes

itérations fixées à 500								
Populations	100				1000			
itérations	Best RSA		Best TSO		Best RSA		Best TSO	
1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,00000%	0,00000%
50	15,3312%	23,6365%	9,9768%	14,9560%	9,3622%	13,9174%	10,0452%	15,0656%
100	16,7942%	23,6460%	9,9418%	14,9141%	9,3622%	13,9174%	9,9916%	14,9864%
150	6,3479%	10,0187%	9,9620%	14,9445%	9,9257%	14,8080%	9,9928%	14,9896%
200	6,3479%	10,0187%	9,9618%	14,9450%	9,9257%	14,8080%	9,9971%	14,9957%
250	6,3479%	10,0187%	9,9707%	14,9576%	9,9257%	14,8080%	10,0002%	15,0002%
300	6,3479%	10,0187%	9,9706%	14,9578%	9,9257%	14,8080%	10,0001%	15,0002%
350	6,3479%	10,0187%	9,9706%	14,9578%	9,9257%	14,8080%	10,0001%	15,0002%
400	9,1399%	13,8544%	9,9706%	14,9578%	9,6403%	14,4893%	10,0001%	15,0002%
450	9,8442%	14,7671%	9,9706%	14,9578%	10,0761%	15,1008%	10,0001%	15,0002%
500	9,8442%	14,7671%	9,9706%	14,9578%	10,0233%	15,0418%	10,0001%	15,0002%

Tableau VI-38: Valeurs de best de la structure 3D 28 éléments deuxième scénario d'endommagement itérations fixées à 500 populations variées .

Itération fixées à 1500								
populations	100				1000			
itérations	RSA		TSO		RSA		TSO	
1	0	0	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
150	32,57903%	44,13118%	9,9642%	14,9485%	15,2765%	22,4692%	9,9975%	14,9965%
300	32,57903%	44,13118%	9,9975%	14,9947%	15,2765%	22,4692%	9,9975%	14,9965%
450	0,00000%	0,00000%	9,9981%	14,9970%	5,4902%	8,3068%	9,9980%	14,9972%
600	0,00000%	0,00000%	9,9979%	14,9970%	5,4902%	8,3068%	9,9997%	14,9996%
750	0,00000%	0,00000%	9,9980%	14,9971%	5,4902%	8,3068%	10,0000%	15,0000%
900	0,00000%	0,00000%	10,0016%	15,0023%	5,4902%	8,3068%	10,0000%	15,0000%
1050	0,00000%	0,00000%	10,0016%	15,0023%	5,4902%	8,3068%	10,0000%	15,0000%
1200	9,96437%	14,87861%	10,0016%	15,0023%	9,9738%	14,9301%	10,0000%	15,0000%
1350	9,90400%	14,84409%	10,0016%	15,0023%	9,9418%	14,9234%	10,0000%	15,0000%
1500	9,90400%	14,84409%	10,0016%	15,0023%	9,9418%	14,9234%	10,0000%	15,0000%

Tableau VI-39: Valeurs de best de la structure 3D 28 éléments deuxième scénario d'endommagement itérations fixées à 1500 populations variées .

Annexes

Population fixées à 200									
itérations	400				itérations	1600			
	Best RSA		Best TSO			Best RSA		Best TSO	
1	0,00000%	0,00000%	0,0000%	0,0000%	1	0,00000%	0,00000%	0,0000%	0,0000%
40	11,12028%	17,11211%	9,83324%	14,77741%	160	17,66978%	25,80057%	10,03181%	15,04847%
80	12,26745%	18,65851%	9,93973%	14,91316%	320	17,66978%	25,80057%	10,03013%	15,04358%
120	12,26745%	18,65851%	9,94078%	14,91403%	480	2,94815%	4,63736%	9,98355%	14,97604%
160	5,88702%	8,98176%	10,00236%	15,00321%	640	2,94815%	4,63736%	9,99468%	14,99236%
200	5,88702%	8,98176%	10,00218%	15,00313%	800	2,94815%	4,63736%	9,99871%	14,99822%
240	5,88702%	8,98176%	10,00218%	15,00313%	960	2,94815%	4,63736%	9,99866%	14,99803%
280	5,88702%	8,98176%	10,00218%	15,00313%	1120	2,94815%	4,63736%	10,00064%	15,00090%
320	8,25663%	12,50042%	10,00218%	15,00313%	1280	8,92981%	13,47379%	10,00064%	15,00090%
360	10,18827%	15,28087%	10,00218%	15,00313%	1440	10,42354%	15,63377%	10,00064%	15,00090%
400	10,18827%	15,28087%	10,00218%	15,00313%	1600	10,42354%	15,63377%	10,00064%	15,00090%

Tableau VI-40: Valeurs de best de la structure 3D 28 éléments deuxième scénario d'endommagement populations fixées à 200 et itérations variées.

Annexes

Populations fixées à 900									
itérations	400				itérations	1600			
	Best RSA		Best TSO			Best RSA		Best TSO	
1	0,00000%	0,00000%	10,629638%	16,157286%	1	0,00000%	0,00000%	0,0000%	0,0000%
40	22,10382%	31,86367%	10,004631%	15,010029%	160	17,66708%	25,51784%	10,00111%	15,00148%
80	22,10382%	31,86367%	10,006763%	15,009756%	320	17,66708%	25,51784%	10,00043%	15,00061%
120	3,55265%	5,46269%	10,000595%	15,000841%	480	2,33677%	3,55550%	10,00003%	15,00007%
160	3,55265%	5,46269%	10,000518%	15,000739%	640	2,33677%	3,55550%	10,00003%	15,00004%
200	3,55265%	5,46269%	10,000163%	15,000220%	800	2,33677%	3,55550%	10,00003%	15,00004%
240	3,55265%	5,46269%	10,000144%	15,000201%	960	2,33677%	3,55550%	10,00002%	15,00003%
280	3,55265%	5,46269%	10,000144%	15,000201%	1120	2,33677%	3,55550%	10,00002%	15,00003%
320	8,94033%	13,47551%	10,000144%	15,000201%	1280	9,88863%	14,83857%	10,00002%	15,00003%
360	10,20779%	15,29592%	10,000144%	15,000201%	1440	9,88863%	14,83857%	10,00002%	15,00003%
400	10,20779%	15,29592%	10,000144%	15,000201%	1600	9,98279%	14,97285%	10,00002%	15,00003%

Tableau VI-41: Valeurs de best de la structure 3D 28 éléments deuxième scénario d'endommagement populations fixées à 200 et itérations variées.

Annexes

Valeurs fitness pour la structure 3D 28 éléments :

Itérations fixées à 500				
Itérations	100		1000	
	RSA	TSO	RSA	TSO
1	2,6619E-04	0,000512914	0,000013	7,26E-05
50	1,1604E-05	1,69E-07	1,81E-07	2,85E-09
100	1,1604E-05	1,05E-09	1,34E-07	4,71E-10
150	1,1604E-05	6,96E-11	1,34E-07	4,91E-11
200	1,1604E-05	6,96E-11	1,34E-07	3,49E-11
250	1,1604E-05	5,42E-11	1,34E-07	3,49E-11
300	1,1604E-05	5,42E-11	1,34E-07	3,49E-11
350	1,1604E-05	5,42E-11	1,34E-07	3,49E-11
400	1,1604E-05	5,42E-11	1,34E-07	3,49E-11
450	1,1604E-05	5,42E-11	1,34E-07	3,49E-11
500	4,1170E-06	5,42E-11	1,34E-07	3,49E-11

Tableau VI-42: Valeurs de fitness de la structure 3D 28 éléments premier scénario d'endommagement itérations fixées à 500 et population variées.

itérations fixées à 1500				
Populations	100		1000	
Itérations	RSA	TSO	RSA	TSO
1	0,000571468211	0,001600629	4,96E-05	2,39E-05
150	0,000126782521	6,75E-09	4,52E-07	1,19E-10
300	0,000116947265	5,67E-10	4,52E-07	2,71E-11
450	0,000116947265	5,05E-11	4,52E-07	2,71E-11
600	0,000116947265	3,86E-11	4,52E-07	2,71E-11
750	0,000116947265	3,86E-11	4,52E-07	2,33E-11
900	0,000116947265	3,86E-11	4,52E-07	2,33E-11
1050	0,000116947265	3,86E-11	4,52E-07	2,33E-11
1200	0,000116947265	3,86E-11	9,25E-08	2,33E-11
1350	0,000116947265	3,86E-11	9,25E-08	2,33E-11
1500	0,000116947265	3,86E-11	9,25E-08	2,33E-11

Tableau VI-43: Valeurs de fitness de la structure 3D 28 éléments premier scénario d'endommagement itérations fixées à 1500 et population variées.

Annexes

Population fixées à 200					
Itérations	400		Itérations	1600	
	RSA	TSO		RSA	TSO
1	3,6081987E-04	1,2317369E-04	1	0,00018002763855	0,00032297285055
40	5,3513151E-06	5,6982699E-07	160	0,00000006469511	0,00000000187202
80	4,8181658E-06	1,6754652E-08	320	0,00000006469511	0,00000000102891
120	4,8181658E-06	5,8744497E-09	480	0,00000006469511	0,00000000007115
160	4,8181658E-06	6,8457301E-10	640	0,00000006469511	0,00000000003396
200	4,8181658E-06	4,1407143E-10	800	0,00000006469511	0,00000000003396
240	4,8181658E-06	3,5415673E-10	960	0,00000006469511	0,00000000003396
280	4,8181658E-06	1,6648755E-10	1120	0,00000006469511	0,00000000003396
320	4,8181658E-06	1,6648755E-10	1280	0,00000006469511	0,00000000003396
360	4,8181658E-06	1,6648755E-10	1440	0,00000006469511	0,00000000003396
400	4,8181658E-06	1,6648755E-10	1600	0,00000006469511	0,00000000003396

Tableau VI-44: Valeurs de fitness de la structure 3D 28 éléments premier scénario d'endommagement populations fixées à 200 et itérations variées.

Populations fixées à 900					
itérations	400		itérations	1600	
	RSA	TSO		RSA	TSO
1	0,0000320056	3,15556E-05	1	2,0942018E-05	6,633694E-06
40	0,0000000447	2,85601E-09	160	7,9920733E-07	1,033811E-10
80	0,0000000447	6,48810E-10	320	3,2146048E-07	8,233148E-11
120	0,0000000447	1,23938E-10	480	1,5153803E-07	1,919873E-11
160	0,0000000447	5,82296E-11	640	1,5153803E-07	1,919873E-11
200	0,0000000447	4,17514E-11	800	1,5153803E-07	1,881584E-11
240	0,0000000447	4,17514E-11	960	1,5153803E-07	1,881584E-11
280	0,0000000447	4,13493E-11	1120	1,5153803E-07	1,881584E-11
320	0,0000000447	4,13493E-11	1280	1,5153803E-07	1,881584E-11
360	0,0000000447	4,13493E-11	1440	1,5153803E-07	1,881584E-11
400	0,0000000447	4,13493E-11	1600	1,5153803E-07	1,881584E-11

Tableau VI-45: Valeurs de fitness de la structure 3D 28 éléments premier scénario d'endommagement populations fixées à 900 et itérations variées.

Résumé

L'objectif principal de ce travail est l'identification d'endommagements dans les structures à l'aide des techniques qui exploitent des mesures vibratoires, afin d'évaluer la durée de vie des structures et réduire leurs coûts d'entretien. Nous avons présenté une nouvelle méthodologie d'identification d'endommagements dans les structures. La méthode des éléments finis (MEF) est utilisée pour construire les modèles des structures intactes et endommagées.

La détection des endommagements est considérée comme un axe essentiel dans le domaine d'ingénierie, afin d'évaluer les dommages et en utilisant les changements de paramètres modaux. La méthode proposée nommée indice de flexibilité modale amélioré a été appliquée pour identifier les éléments endommagés pour deux structures dont les dimensions sont 2D et 3D. Les résultats obtenus sont validés à l'aide d'une référence expérimentale.

Nous avons rajouté, une présentation de quelques algorithmes génétiques (AG), appelés algorithmes de recherche de reptiles (RSA) et optimisation des essaims de thons (TSO) afin de quantifier précisément les éléments endommagés. La fonction objective utilisée dans GA basée sur l'indicateur proposé de flexibilité modale. Nous avons pu quantifier nos dommages et nous avons comparé ces deux méthodes pour leurs précisions et le temps de calcul.

Mots-clés : Analyse vibratoire, Détection d'endommagements, localisation d'endommagements, Quantification d'endommagement, Structures à 2D et 3D, MEF et Algorithme génétique, temps de calcul.

Abstract

As an attempt towards damage detection in several mechanical structures, our work consisted on some new methodology for damage detection, localization and quantification in 2D and 3D structures this investigations is presented aiming at modal parameters using the concept of finite element methods (FEM) and dynamic of structures (DS), in order to assess the life of structures and reduce their maintenance costs.

Damage identification is viewed as heavy engineering problem several research has been made in order to evaluate damages using the changes in modal parameters. The proposed method named enhanced modal flexibility index was applied to identify the damaged elements for two structures with the dimensions are 2D and 3D. The obtained results are validated using an experimental reference. The results show that the proposed methodology is more accurate for damage identification compared to the literature. In addition, a small error was mentioned when we compare real and predicted damage.

In the second stage, a presentation of some genetic algorithms (GA), called reptiles search algorithms (RSA) and tuna swarm's optimization (TSO) in order to quantify the damaged elements correctly. The objective function used in GA based on the proposed indicator of modal flexibility. We've could quantify our damages and we made a comparison of these two methods for their precisions and timing process.

Keywords: damage detection, localization and quantification of damages, 2D and 3D, modal parameters, finite element methods (FEM), dynamic of structures (DS), modal flexibility index, genetic algorithms (GA), reptiles search algorithms (RSA), tuna swarm's optimization (TSO)