



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou



Faculté de Génie de la Construction

Département Génie Mécanique

En vue de l'obtention du diplôme

Master Académique en Génie Mécanique

MÉMOIRE DE FIN DE CYCLE

Thème :

*Comparaison des Modèles de Fissuration dans des Poutres en Evaluant
les Méthodes d'Identification d'Endommagements et les Techniques
d'Optimisation*

Encadré par : Mr SLIMANI Mohand

Co-encadré par : Mr TIACHACHT Samir

Réaliser par	Spécialité
-GHOULEM MENAD	Fabrication Mécanique et Productique
-SMAIL IZMIR	Construction Mécanique

Membre du jury :

Président : MCA.UMMTO Mr. BEHTANI Amar

Examinatrice : MCA.UMMTO Mme. MANSOURI Lilla

Année universitaire : 2023/2024



Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur Slimani Mohand, notre promoteur, pour sa précieuse guidance, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Sa disponibilité et son expertise ont grandement enrichi notre travail.

Nous remercions également Monsieur Samir Tiachacht, notre co-promoteur, pour ses remarques pertinentes et ses encouragements, qui ont contribué à l'amélioration de notre recherche.

Nos sincères remerciements vont également à Monsieur Behtani Amar, président du jury, ainsi qu'à tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail et pour leurs suggestions constructives lors de la soutenance.

Nous adressons nos remerciements les plus chaleureux à nos familles et nos proches pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et leur compréhension tout au long de cette période d'étude.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance envers tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail de recherche.





Dédicace



Je souhaite dédier ce travail à mes chers parents, des êtres exceptionnels dont le soutien indéfectible a été le palier de ma réussite. A mon père, source constante d'inspiration et de force, ainsi qu'à ma chère mère, pour son dévouement infatigable à mon égard. Je leur souhaite une longue vie emplie de bonheur.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude envers mon grand frère Moula, dont le soutien inébranlable a été une des principales raisons de ma poursuite d'études. Son accompagnement constant attentif, de près comme de loin, a été précieux toute au long de mon parcours.

A mes frères Ghilas, Idir, Amlassen, et à ma sœur Lilia, dont le soutien et encouragements constants m'ont donné la force d'avancer.

Je souhaite aussi exprimer ma reconnaissance à mes amis, Fatah, Mouhend cherif, Ines, Merzouk, Drifa, Yazid et Nabil ainsi qu'à mes camarades Menad, Celia, Lyes et Ghenima. Leur collaboration et leur soutien ont enrichi mon expérience d'apprentissage et ont contribué à la réalisation de ce travail.

A tous ceux qui ont été une source de soutien, d'encouragement et d'inspiration tout au long de ce parcours, je vous adresse mes plus sincères remerciements

Izmir SMAIL

Dédicace

Je dédie humblement ce modeste travail :

A la mémoire de mon père, décédé l'année dernière, qui a toujours été un soutien inébranlable dans mes études. Que le tout-puissant lui accorde son infinie miséricorde et l'accueille dans son éternel paradis.

A ma mère, la plus belle, sincère et douce des personnes que dieu a créé. Elle s'est sacrifiée jour et nuit pour notre bonheur et notre réussite.

A mes frères : Amine, Samir, Hamid et Mhend ainsi qu'à ma femme Nadia qui m'ont apporté leurs aides précieuses.

Je souhaite aussi exprimer ma reconnaissance à mes amis, Karim, Sofiane, Houcine, Izmir, Fazia, Lynda, Saïd et Ghilas, Tafat ainsi qu'à mes camarades Celia et Lyes, Ghenima . Leur collaboration et leurs soutiens ont enrichi mon expérience d'apprentissage et ont contribué à la réalisation de ce travail.

A tous ceux que j'aime et m'aiment sur cette terre, je vous dédie ce travail.

GHOULEM MENAD

Table des matières

Chapitre I : Recherche bibliographique	2
1.1 Introduction.....	5
1.2 Classification des méthodes utilisant l'énergie de déformation modale	13
1.3 Méthode de l'indice des endommagements.....	13
1.3.1 Méthode de Stubbs de l'indice d'endommagement SIE	14
1.3.2 Méthode de décomposition de l'énergie de déformation modale DEMD	14
1.3.3 La méthode de changement de l'énergie de déformation modale CEDM	14
1.3.4 La méthode de pourcentage de changement de l'énergie de déformation modale PCEDM	14
1.3.5 Energie de déformation modale élémentaire.....	15
1.3.6 Méthode de l'énergie de déformation intermodale EDIM	15
1.4 Présentations des modèles d'endommagements.....	16
1.4.1 Présentation du modèle J.K.Sinha.....	16
1.4.2 Modèle Dimarogonas	19
1.4.3 Réduction de la rigidité	19
1.5 Conclusion.....	19
Chapitre II : Etude théorique.....	21
2.1 Introduction.....	22
2.1.1 Élément finis poutres.....	22
2.1.2 La matrice élémentaire de raideur et de masse	22
2.2 La matrice globale d'une poutre	27
2.3 Introduction des conditions d'appui	28
2.4 Méthode basée sur la variation des fréquences.....	31
2.4.1 Déformation modales	33
2.5 Modélisation d'une structure fissurée.....	35

2.5.1	Les modèles des éléments poutres endommagées.....	35
2.5.2	Modèle de A.D.Dimarogonas et S.A.Paipitis.....	40
2.5.3	Model de réduction de la raideur E	43
2.6	Utilisation des modèles d'endommagement.....	43
2.6.1	Utilisation du modèle J.K.Sinha.....	43
2.6.2	Utilisation de S.A.Paipetis A.D.Dimarogonas	44
2.6.3	Utilisation de la réduction de rigidité E.....	46
2.7	Détection d'endommagement par la méthode vibratoire	46
2.7.1	Méthode de l'énergie de déformation modale.....	46
2.7.2	Détection d'endommagement structurel basée sur l'énergie de déformation modale ..	48
2.8	Conclusion.....	49
Chapitre III : Applications Numériques		50
3.1	Introduction.....	51
3.2	Validation et Modélisation par éléments finis de la poutre sans endommagement.....	51
3.2.1	Poutre encastree-encastree :	51
3.2.2	Poutre flexible-libre :	52
3.2.3	Poutre simple.....	52
3.3	Comparaison des résultats	53
3.3.1	Comparaison entres les fréquences mesurées et les fréquences calculées dans le cas d'une poutre saine encastree-encastree en aluminium qui est discrétisée en 27 éléments	53
3.3.2	Comparaison entres les fréquences mesurées et les fréquences calculées dans le cas d'une poutre appuis simple saine en acier qui est discrétisée en 30éléments	53
3.4	Tableaux de localisation des éléments endommagés.....	54
3.5	Etude comparative des modèles de poutres endommagées en termes de fréquences.....	54
3.5.1	Cas d'une poutre a une seule fissure	54
3.6	Localisation des dommages basé sur l'indicateur MSEBI	58
3.7	Conclusion.....	61
Chapitre IV : Optimisation et quantification.....		63

4.1	Introduction :	64
4.2	Optimisation de la recherche de nourriture de l'anguille électrique.....	65
4.2.1	Introduction	65
4.2.2	Méthode d'interpolation quadratique :.....	65
4.2.3	Interpolation quadratique généralisée (GQI).....	67
4.2.4	Stratégie d'exploitation	79
4.2.5	Stratégie d'exploitation :	80
4.3	Méthode d'optimisation de la recherche de nourriture pour l'anguille électrique EEFO	80
4.3.1	Modèle mathématique et algorithme	81
4.3.2	Interaction.....	82
4.3.3	La zone de repos.....	83
4.3.4	La chasse	84
4.3.5	Migration.....	86
4.3.6	Transition entre l'exploration et l'exploitation	86
4.3.7	Procédure l'EEFO :	87
4.4	Fonction objective	88
4.5	Résultat d'optimisation.....	89
4.5.1	Quantification des dommages	89
4.6	Résultats d'applications	89
4.6.1	Application sur une poutre Encasté-Encasté	89
4.6.2	Application pour une poutre flexible-libre.....	108
4.6.3	Application pour une poutre appuis simple.....	127
4.7	Conclusion :.....	145
	Conclusion générale	146

Table des figures

Figure 1 : la discrétisation d'une poutre en élément unis dimensionnelle	22
Figure 2 : poutre encastré-libre	30
Figure 3. Modèle de poutre à plusieurs fissures.....	36
Figure 4. Variation linéaire de la rigidité en flexion (EI) d'aspect triangulaire utilisée par J. K. Sinha et.....	37
Figure 5° Modèle poutre endommagée proposé par Dimarogonas et Paipitis.....	41
Figure 6- Poutre encastrée-encastrée	51
Figure 7- Poutre flexible-libre à 6 nœuds	52
Figure 8 : poutre à deux appuis	52
Figure 9 : poutre encastrée-encastrée a une seule fissure.....	55
Figure 10 : poutres à deux endommagements	57
Figure 11 : Histogramme des valeurs MSEBI d'endommagement de l'élément.....	58
Figure 12 : Histogramme des valeurs MSEBI d'endommagement de l'élément 8.....	59
Figure 13 : Histogramme des valeurs MSEBI d'endommagement de l'élément 8.....	59
Figure 14 : Histogramme des valeurs MSEBI d'endommagement des éléments 9 et 12	60
Figure 15 : Histogramme des valeurs MSEBI d'endommagement des éléments 9 et 12	60
Figure 16 : Histogramme des valeurs MSEBI d'endommagement des éléments 9 et 12	61
Figure 17: les étapes de résolution du problème.....	64
Figure 18 : schéma quadratique interpolation	66
Figure 19: minimiser et maximiser intervalle quadratique interpolation pour les différents cas.....	72
Figure 20: schéma pour l'obtention de l'intervalle minimisé	74
Figure 21 : schéma pour l'obtention de l'intervalle minimiseurs	75
Figure 22: schéma pour l'obtention de l'intervalle mini.....	76
Figure 23 : Schéma pour l'obtention de l'intervalle minimiser	77
Figure 24: structure et organe de production des anguilles électrique.....	81
Figure 25: Poutre encastré-encastré – un seule endommagement – Paipetis & Dimarogonas avec 30population et 100 itération.	90

Figure 26 : Poutre encastré-encastré – un seule endommagement – Réduction de rigidité avec 30population et 100 itération.	90
Figure 27 : Poutre encastré-encastré – un seule endommagement – J.K.Sinha– 30population et 1091	
Figure 28 : Poutre encastré-encastré – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 30population et 100 itération.	91
Figure 29 : Poutre encastré-encastré – Deux endommagement – Réduction de rigidité de E– 30population et 100 itération.	92
Figure 30: Poutre encastré-encastré – Deux endommagement – J.K .Sinha– 30population et 100 itération.	92
Figure 31 : Poutre encastré-encastré – Un endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 100population et 100 itération.	93
Figure 32 : Poutre encastré-encastré – un seule endommagement – Réduction de rigidité – 100population et 100 itération.	93
Figure 33 : Poutre encastré-encastré – Un seule endommagement – J.K.Sinha– 100population et 100 itération.	94
Figure 34 : Poutre encastré-encastré – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 100population et 100 itération.	94
Figure 35 : Poutre encastré-encastré – Deux endommagement – Réduction– 100population et 100 itération.	95
Figure 36 : Poutre encastré-encastré – Deux endommagement –J.K.Sinha– 100population et 100 itération.	95
Figure 37 : Poutre encastré-encastré – Un seule endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 200population et 100 itération.	96
Figure 38 : Poutre encastré-encastré – Un seule endommagement –Réduction de rigidité de E– 200population et 100 itération.	96
Figure 39 : Poutre encastré-encastré – Un seule endommagement –J.K.Sinha– 200population et 100 itération.	97
Figure 40 : Poutre encastré-encastré – Deux endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 200population et 100 itération.	97
Figure 41 : Poutre encastré-encastré – deux endommagement –Réduction de rigidité de E– 200population et 100 itération.	98

Figure 42 : Poutre encasté-encasté – deux endommagement –J.K.Sinha– 200population et 100 itération.	98
Figure 43 : Poutre encasté-encasté – un seul endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50population et 100 itération.	99
Figure 44 : Poutre encasté-encasté – un seul endommagement – Réduction de rigidité de E – 50population et 100 itération.	99
Figure 45 : Poutre encasté-encasté – un seul endommagement – J.K.Sinha – 50population et 100 itération.	100
Figure 46 : Poutre encasté-encasté – Deux endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 100 itération.	100
Figure 47 : Poutre encasté-encasté – Deux endommagement –Réduction de rigidité E– 50 population et 100 itération.	101
Figure 48 : Poutre encasté-encasté – Deux endommagement –J.K.Sinha– 50 population et 100 itération.	101
Figure 49 : Poutre encasté-encasté – un seul endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 500 itération.	102
Figure 50 : Poutre encasté-encasté – un seul endommagement –Réduction de rigidité E– 50 population et 500 itération.	102
Figure 51 : Poutre encasté-encasté – un seul endommagement –J.K.Sinha– 50 population et 500 itération.	103
Figure 52 : Poutre encasté-encasté – Deux endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 100 itération.	103
Figure 53 : Poutre encasté-encasté – Deux endommagement –Réduction de rigidité E– 50 population et 100 itération.	104
Figure 54 : Poutre encasté-encasté – Deux endommagement –J.K.Sinha– 50 population et 100 itération.	104
Figure 55 : Poutre encasté-encasté – un seul endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 1000 itération.	105
Figure 56 : Poutre encasté-encasté – un seul endommagement –Réduction de rigidité E– 50 population et 1000 itération.	105

Figure 57 : Poutre encastré-encastré – un seul endommagement –J.K.Sinha– 50 population et 1000 itération.	106
Figure 58 : Poutre encastré-encastré – Deux endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 1000 itération.	106
Figure 59 : Poutre encastré-encastré – Deux endommagement –Réduction de rigidité E– 50 population et 1000 itération.	107
Figure 60 : Poutre encastré-encastré – Deux endommagement –J.K.Sinha– 50 population et 1000 itération.	107
Figure 61 : Poutre flexible-libre– un seule endommagement – Paipetis & Dimarogonas avec 30population et 100 itération.	109
Figure 62 : Poutre flexible-libre – un seule endommagement – Réduction de rigidité avec 30population et 100 itération.	109
Figure 63 : Poutre flexible-libre – un seule endommagement – J.K.Sinha– 30population et 100 itération	110
Figure 64 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 30population et 100 itération.	110
Figure65 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement – Réduction de rigidité de E– 30population et 100 itération.	111
Figure 66. Poutre flexible-libre – Deux endommagement – J.K .Sinha– 30population et 100 itération.	111
Figure67 : flexible-libre – Un endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 100population et 100 itération.	112
Figure68 : Flexible-libre – un endommagement – Réduction de rigidité – 100population et 100 itérations.	112
Figure 69 : Poutre-flexible – Un seule endommagement – J.K.Sinha– 100population et 100 itération.	113
Figure 70. Poutre flexible-libre – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 100population et 100 itération.	113
Figure 71 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement – Réduction– 100population et 100 itération.	114

Figure 72 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement –J.K.Sinha– 100population et 100 itération.	114
Figure73 : Poutre flexible-libre – Un seule endommagement –Paipetis & dimarogonas– 200population et 100 itération.	115
Figure74 : Poutre-flexible– Un seule endommagement –Réduction de rigidité de E– 200population et 100 itération.	115
Figure75 : Poutre flexible – Un seule endommagement –J.K.Sinha– 200population et 100 itération	116
Figure76 : Poutre flexible – Deux endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 200population et 100 itération	116
Figure77 : Poutre flexible-libre – deux endommagement –Réduction de rigidité de E – 200population et 100 itération.	117
Figure 78 : Poutre flexible-libre – deux endommagement –J.K.Sinha– 200population et 100 itération.	117
Figure79 : Poutre flexible-libre – un seul endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50population et 100 itération	118
Figure80 : Poutre flexible-libre – un endommagement – Réduction de rigidité de E – 50population et 100 itération.	118
Figure 81 : Poutre flexible-libre – un endommagement – J.K.Sinha – 50population et 100 itération.	119
Figure 82 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 100 itération.	119
Figure 83 : Poutre flexible-libre– Deux endommagement –Réduction de rigidités E– 50 population et 100 itération.	120
Figure 84 : Poutre flexible-libre. – Deux endommagement –J.K.Sinha– 50 population et 100 itération	120
Figure 85 : Poutre flexible-libre – un seul endommagement –Réduction de rigidité E– 50 population et 500 itération.	121
Figure 86 : Poutre flexible-libre – un seul endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 500 itération.	121

Figure 87 : Poutre flexible-libre – un seul endommagement –J.K.Sinha– 50 population et 500 itération.	122
Figure 88 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 500 itération.	122
Figure89 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement –Réduction de rigidité E– 50 population et 500 itération.	123
Figure 90 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement –S.K.Sinha– 50 population et 500 itération.	123
Figure 91 : Poutre flexible-libre – un seul endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 1000 itération.	124
Figure 92 : Poutre flexible-libre – un seul endommagement –Réduction de rigidité E– 50 population et 1000 itération.	124
Figure 93 : Poutre flexible-libre – un seul endommagement –J.K.Sinha– 50 population et 1000 itération.	125
Figure 94 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 1000 itération.	125
Figure 95 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement –Réduction de rigidité E– 50 population et 1000 itération.	126
Figure 96 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement –J.K.Sinha– 50 population et 1000 itération.	126
Figure 97 : poutre simple – une seule endommagement – Paipetis & Dimarogonas avec 30population et 100 itérations.....	127
Figure 98 : Poutre simple – un seule endommagement – Réduction de rigidité avec 30population et 100 itération.	128
Figure 99 : Poutre simple – un seule endommagement – J.K.Sinha– 30population et 100 itération.	128
Figure 100 : Poutre simple – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 30population et 100 itération.	129
Figure 101 : Poutre simple – Deux endommagement – Réduction de rigidité E– 30population et 100 itération.	129
Figure 102 : Poutre simple – Deux endommagement – J.K.Sinha– 30population et 100 itération.	130

Figure 103 : Poutre simple – un seule endommagement – Paipetis & Dimarogonas avec 100population et 100 itération.	130
Figure 104 : Poutre simple – un seule endommagement – Réduction de rigidité avec 100population et 100 itération.	131
Figure 105 : Poutre simple – un seule endommagement – J.K.Sinha– 100population et 100 itération.	131
Figure 106 : poutre simple – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 100population et 100 itération.	132
Figure 107 : Poutre simple – Deux endommagement – Réduction de rigidité E– 100population et 100 itération.	132
Figure 108 : Poutre simple – Deux endommagement – J.K.Sinha– 100population et 100 itération.	133
Figure 109 : Poutre simple – un seule endommagement – Paipetis & Dimarogonas avec 200population et 100 itération.	133
Figure 110 :Poutre simple – un seule endommagement – Réduction de rigidité avec 200population et 100 itération.	134
Figure 111 : Poutre simple – un seule endommagement – J.K.Sinha– 200population et 100 itération.	134
Figure 112 : Poutre simple – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 200population et 100 itération.	135
Figure 113 : Poutre simple – Deux endommagement – Réduction de rigidité E– 200population et 100 itération.	135
Figure 114 :Poutre simple – Deux endommagement – J.K.Sinha– 200population et 100 itération.	136
Figure 115 : Poutre simple – un seule endommagement – Paipetis & Dimarogonas avec 50population et 100 itération.	136
Figure 116 : Poutre simple – un seule endommagement – Réduction de rigidité avec 50population et 100 itération.	137
Figure 117 : Poutre simple – un seule endommagement – J.K.Sinha– 50population et 100 itération.	137

Figure 118 :Poutre simple – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 50population et 100 itération.	138
Figure 119 : Poutre simple – Deux endommagement – Réduction de rigidité E– 50population et 100 itération.	138
Figure 120 : Poutre simple – Deux endommagement – J.K.Sinha– 50 population et 100 itération.	139
Figure 121 : Poutre simple – un seule endommagement – Paipetis & Dimarogonas avec 50population et 500 itération.	139
Figure 122 :Poutre simple – un seule endommagement – Réduction de rigidité avec 50population et 500 itération.	140
Figure 123 : Poutre simple – un seule endommagement – J.K.Sinha– 50population et 500 itération.	140
Figure 124 : Poutre simple – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 50population et 500 itération.	141
Figure 125. Poutre simple – Deux endommagement – Réduction de rigidité E– 50population et 500 itération.	141
Figure 126 : Poutre simple – Deux endommagement – J.K.Sinha– 50population et 500 itérations	142
Figure 127 : Poutre simple – un seule endommagement – Paipetis & Dimarogonas avec 50population et 1000 itération.	142
Figure 128 : Poutre simple – un seule endommagement – Réduction de rigidité avec 50population et 1000 itération.	143
Figure 129 : Poutre simple – un seule endommagement – J.K.Sinha– 50population et 1000 itération.	143
Figure 130 : Poutre simple – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 50population et 1000 itération.	144
Figure 131 : Poutre simple – Deux endommagement – Réduction de rigidité E– 50population et 1000 itération.	144
Figure 132 : Poutre simple – Deux endommagement – J.K.Sinha– 50population et 1000 itération.	145

Liste des tableaux

Tableau 1: propriétés géométriques de la poutre encasté-encasté en aluminium.....	51
Tableau 2 propriétés géométriques de la poutre flexible-libre en aluminium.....	52
Tableau 3: propriétés géométriques de la poutre simple.....	52
Tableau 4 Comparaison entre les fréquences mesuré et les fréquences calculer.....	53
Tableau 5 : Comparaison entre les fréquences mesuré et les fréquences calculer	53
Tableau 6 : Comparaison entre les fréquences mesuré.....	53
Tableau 7 : les différents cas d'endommagement de la structure poutre encasté-encasté.....	54
Tableau 8 : les différents cas d'endommagement de la structure poutre flexible-libre	54
Tableau 9 : les différents cas d'endommagement de la structure poutre simple.....	54
Tableau 10 : Fissuré en aluminium encasté-encasté discrétisé en 27 éléments de la poutre 1.....	55
Tableau 11 : Fissuré en aluminium flexible-libre discrétisé en 16 éléments	55
Tableau 12 : Poutre simple fissuré discrétisé en 30 éléments et de longueur total $L=1900$	56
Tableau 13 : Poutre fissuré en aluminium encasté-encasté discrétisé en 27 éléments	57

Nomenclature

Liste des symboles

\ddot{v}_e	Vecteur accélération
x	Déplacement
ν	Coefficient de Poisson
ρ	Densité volumique
I	Le moment d'inertie
w, m	Fréquence naturelle
[B]	Dérivée de la fonction de forme
L, l	Longueur de la poutre
[M]	Matrice de masse
[K]	Matrice de raideur
$[K_e]$	Matrice de rigidité élémentaire
$[M_e]$	Matrice élémentaire de la masse
$[Kg]$	La matrice globale
E	Module de Young
h, d	La hauteur de la poutre
b, w	Largeur de la poutre
N	Matrice de la fonction de forme
I_{cj}	Moment quadratique au niveau de la $j^{\text{ème}}$ fissure
I_z, I	Moment d'inertie de la section droite
X_i, X_p, X_j	Position de $j^{\text{ème}}$ fissure
$\alpha, d_{ci}, d_{cj}, d_{cp}$	Profondeur de la fissure
k_{ij}	Raideur du ressort
$[K_{cj}]$	Réduction de la matrice de rigidité due à la $j^{\text{ème}}$ fissure
EI	rigidité de flexion
M	Le moment
$\{\delta\}$	Déplacement nodal
$\{p\}$	Vecteur de chaque nœud
$\{\alpha\}$	Le vecteur des coefficients
ε	La déformation
δ	La contrainte
Q_i	Le travail externe

Q_e	Le travail interne
Q, v_e	Vecteur de déplacement
F, F_e	Vecteur force associé.
R	Vecteur réaction
l_c	Longueur effective
v_e	Vecteur de déplacement
k_t	La constante de torsion de la section endommagée
\bar{a}	La profondeur normalisée de la fissure
$[K_e^f]_j$	Matrice élémentaire de la partie saine
$MSEBI$	Indicateur d'endommagement
P_j	La fonction quadratique d'interpolation
n_1	La distribution normale standard
t	le nombre d'itérations
T	le nombre maximum d'itérations
p_1, p_2	Le nombre aléatoire
$fit(x_i)$	L'amplitude de la position candidate de la $i^{ème}$ anguille électrique.
x_j	La position d'une anguille
n	la taille de la population
r	Le nombre aléatoire compris entre 0 et 1
Low, Up	Les limites inférieure et supérieur, respectivement.
$x_{rand\{d\}}^{rand\{d\}}$ $x_{rand\{n\}}$	La position aléatoire de l'individu
a	L'échelle de l'aire de repos
r	Le nombre aléatoire compris entre 0 et 1
β	L'échelle de la zone de chasse.
η	Le facteur d'enroulement.
H_r	La zone de la chasse.
Γ	La fonction Gamma standard
f_i^*	La fréquence de la structure fissurée mesurée expérimentalement
f_i	La fréquence calculée

Liste des Abréviations

EEFO, QIO	Méthode d'optimisation de la recherche de nourriture pour l'anguille
<i>MSEBI</i>	Indicateur d'endommagement basé sur l'énergie de déformation
MSE	Energie de déformation modale
<i>mn</i>	La moyenne normalisée
Nn	La normale
DDL	degré de liberté
PCEDM	Pourcentage de changement de l'énergie de déformation modale
EDIM	Energie de déformation intermodale
EDM	l'énergie de déformation modale
RNA	réseaux neuronaux artificiels
EF	Elément finis
MDMED	Méthode de décomposition modale et de l'énergie de déformation
CEDM	Changement d'énergie de déformation modale
SIE	Méthode de Stubbs de l'indice d'endommagement
DEMD	Méthode de décomposition de l'énergie de déformation modale
CEDM	Méthode de changement de l'énergie de déformation modale.

Introduction générale

Introduction générale

La détection d'endommagement dans les structures mécaniques vibrantes est une opération cruciale. Même une fissure faible d'importance peut compromettre l'intégrité et la fiabilité de la structure, et avoir un impact significatif sur ses caractéristiques dynamiques.

Aujourd'hui, l'identification, la détection, l'optimisation et la quantification des endommagements dans les structures en génie civil ou en mécanique est d'une grande importance.

Cette préoccupation est liée à l'utilisation croissante des systèmes structurels avancés tels que les turbines à gaz, les robots industriels, les systèmes de transport à câbles et aussi au vieillissement des structures anciennes comme les barrages, les centrales électriques, les réservoirs de stockage et soulève également des questions de sécurité.

Dans ce contexte, garantir la sécurité et la fiabilité des structures est primordial pour éviter les dégâts et la perte de vies humaines.

Le schéma ci-dessous montre les 4 niveaux d'analyse pour identifier et quantifier la fissure dans la structure mécanique.

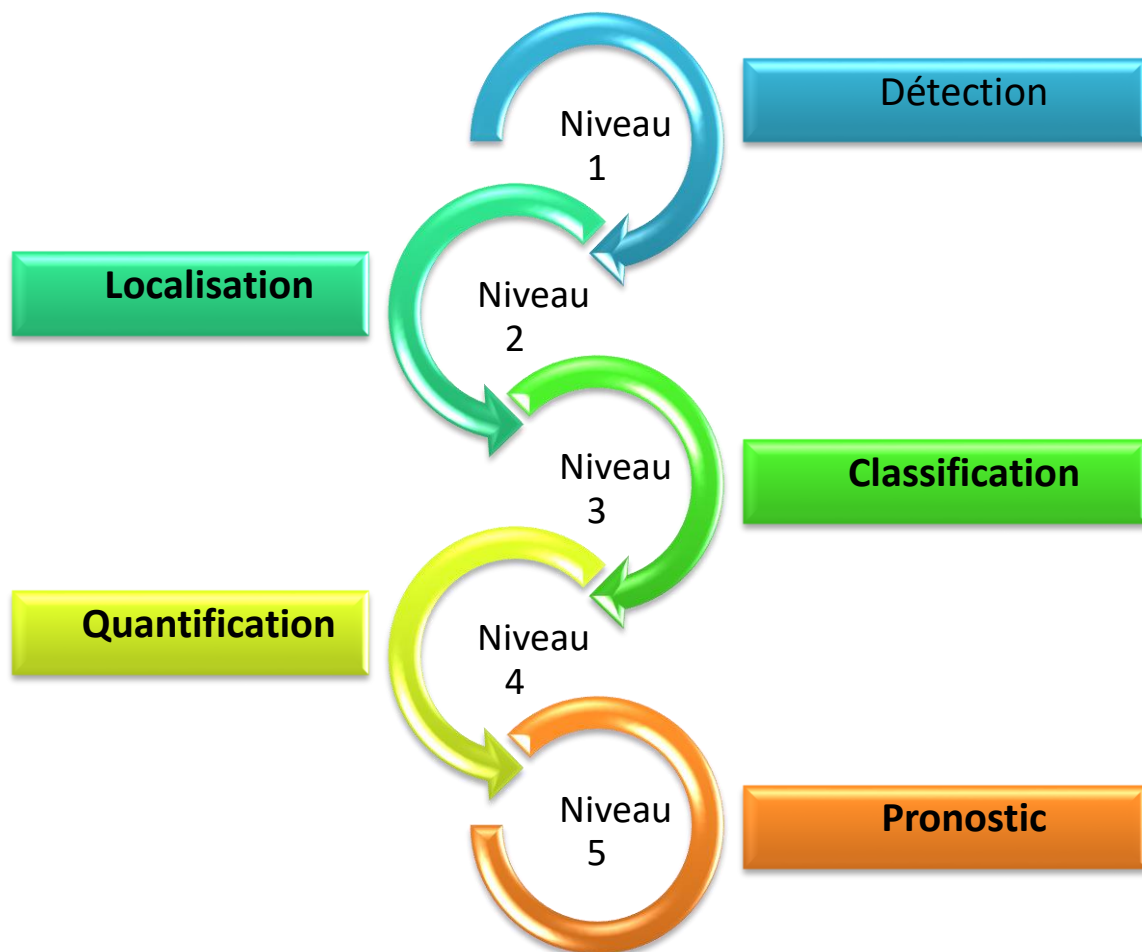
La première étape consiste à prendre des mesures directement sur la structure et appliquer des méthodes basées sur les réponses dynamiques pour détecter et localiser l'occurrence d'endommagement. Une fois que la présence d'un endommagement est établie, un modèle de la structure est créé en utilisant la méthode des éléments finis ou d'autres approches de modélisation numérique. Ce modèle doit ensuite être vérifié et corrigé de manière à bien refléter le comportement structural réel et les paramètres globaux de la structure.

La deuxième étape consiste à déterminer avec précision la localisation et l'ampleur des endommagements. Pour cela, un indice ou paramètre d'endommagement approprié doit être soigneusement sélectionné. Une fonction objective est alors construite dans le but de minimiser l'écart entre la réponse mesurée expérimentalement et la prédiction numérique du modèle. Une analyse de sensibilité est utilisée pour s'assurer que les paramètres d'endommagement et les fonctions objectives sont suffisamment sensibles.

Dans la troisième étape, un algorithme d'optimisation efficace est ensuite appliqué pour résoudre le problème et obtenir la solution qui doit être vérifiée pour s'assurer qu'elle est physiquement significative. Cette procédure itérative peut être répétée plusieurs fois jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante.

Dans la quatrième étape, après quantification des endommagements, la durée de vie résiduelle de la structure peut être évaluée et des actions correctives, peuvent être recommandées.

Cette approche systématique vise à évaluer de manière fiable l'intégrité structurelle à partir des mesures expérimentales et de la modélisation numérique.



Les différents niveaux de la détection d'endommagement

Ce projet de recherche se concentre sur le développement des techniques avancées pour évaluer l'intégrité structurelle des systèmes mécaniques. L'accent est mis sur l'exploitation de données vibratoires afin de détecter, localiser et quantifier l'endommagement potentiel.

La dissertation est organisée en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons faire une recherche bibliographique sur la détection d'endommagement qui est basée sur la méthode énergétique, et les modèles d'endommagements.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter la partie théorique des modèles d'endommagements et sont historique d'utilisation ainsi que la partie théorique des poutres et la détection d'endommagements des structures mécaniques.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter quelques caractéristiques des poutres ainsi que la comparaison des résultats mesurés et calculés. Nous allons mettre aussi l'accent sur la localisation des éléments endommagés dans les différentes structures.

Dans le dernier chapitre, à la fin de ce chapitre, nous allons présenter deux techniques d'optimisation qui consistent à faire l'optimisation et la quantification.

Introduction général

Nous allons ensuite appliquer ces méthodes d'optimisations sur les trois modèles de poutres et nous allons analyser les résultats de ces deux techniques QIO et l'EEFO.

Pour conclure, nous terminerons ce mémoire avec une présentation d'une synthèse de notre travail concernant les résultats obtenus.

.

Chapitre I

Recherche bibliographique

1.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons passer en revue l'état de l'Art des techniques d'identification des fissures dans une structure mécanique qui est basée sur la technique énergétique vibratoire. Elle mène à la localisation des éléments endommagés dans la structure et de définir les différents modèles de détection des dommages dans les structures mécaniques.

Khosravan et al [1], ont développé une méthode novatrice nommée « Méthode améliorée de décomposition de l'énergie de déformation modale » (MADEDM^o pour détecter les dommages structurels sur les plates-formes offshore de type «jacket». Cette approche utilise un nombre limité de capteurs juste au-dessus de l'eau. La méthode combine les fréquences modales et les modes pour une détection plus précise des dommages. De plus, elle décompose l'énergie de déformation modale en énergie axiale et en énergie de flexion pour localiser les éléments endommager. Les tests effectués sur une plate-forme offshore expérimentale de type « jacket » ont confirmé l'efficacité de la méthode, même avec des données incomplète.

Minshui et al [2], ont introduit un cadre d'identification des dommages basé sur le critère d'assurance de l'énergie de déformation a fréquence modale (CAEDFM), la flexibilité modale et l'optimisation amélioré de la flamme de papillons de nuit. Ils ont ensuite appliquer ce cadre a trois exemples numérique : une poutre continue à béton a trois travées prenant en compte les variations de température par gradient, un cadre de cisaillement de 40 étages sous l'effets du bruit aléatoire, et une structures de treillis de 31 barres sous l'influence simultanée du bruit aléatoire et des températures. Ces structures ont été endommagées, et comparaison entre le CEAEDFM et le rapport de changement de fréquence (RCF) ainsi contre les critères d'assurances modale (CAM) a l'énergie de déformation modale (EDM) et à la flexibilité modale a été réalisée pour évaluer la précision de l'identification des dommages selon la fonction objectif proposée.

Jayasundara et al [3] ,ont mis au point une méthode basée sur les vibrations spécifiquement conçue pour les ponts en arc, en fin de détecter, localiser et quantifier les dommages dans les composants structurelles. Le rapproche combine des variantes d'indice d'endommagement basée sur la flexibilité modale (FM) et l'énergie de déformation modale (EDM), en intégrant la technologie des réseaux neuronaux artificiels (RNA). Cette méthode fournie une évaluation holistique des dommages, permettant une analyse complète des dommages structurels.

Yan et al [4], ont introduit une cadre de modélisation basé sur la sensibilité à l'énergie de déformation modale des éléments pour identifier les dommages dans les poutres fonctionnellement graduées. Ils ont établi un ensemble d'équations de dommages pour les éléments du faisceau d'Euler-Bernoulli a gradation fonctionnelle en se basant sur la sensibilité de la déformation modale des éléments et le taux de changement de l'énergie de déformation modale des éléments, a l'état sain a l'état endommager. L'algorithme de régularisation de Tikhonov, associé à la validation croisée généralisée, a été utilisé pour résoudre les problèmes de fiabilité de cet ensemble d'équations de dommages. Des exemples numériques ont été considérés pour démontrer l'efficacité de la méthode, en étudiant l'influence de l'indice de gradient, de l'étendue des dommages, du mode propre et du niveau de bruit. Les résultats obtenus montrent que cette méthode peut détecter avec précision les dommages dans les structures de type poutre.

Kaveh et al[5], ont introduit une approche novatrice pour détecter les dommages structurels en utilisant une méthode méta-heuristique multi-agents appelée Algorithme de parthénogenèse cyclique

(CPA). Cette méthode est intégrée à une technique de détection des dommages structurels, ils ont formulé le problème comme un problème d'optimisation inverse, utilisant un indice basé sur l'énergie de déformation modale pour guider le processus. La fonction objective du problème d'optimisation est définie en utilisant la matrice de flexibilité généralisée de la structure.

L'efficacité de cette méthode a été évaluée à l'aide de trois exemples numériques, démontrant sa capacité à localiser et quantifier les dommages structurels en se basant uniquement sur les premiers algorithmes méta-heuristique pour démontrer l'efficacité de l'approche utilisant le MFG pour résoudre le problème de détection des dommages structurels. Cette méthode présente donc une approche prometteuse pour la détection efficace des dommages structurels.

Liu et al[1], ont développé une approche innovante pour détecter les dommages structurels sur les plates-formes offshore en utilisant les méthodes basées sur le regroupement de l'énergie de déformation modale. Cette méthode subdivise l'énergie de déformation modale unitaire en composantes de tension-compression axiale de flexion. Elle permet d'élargir les paramètres modaux connus et de surmonter les données modales incomplètes sous l'excitation naturelle de la charge. De plus, elle peut estimer l'emplacement des dommages, se basant sur les paramètres modaux d'ordre inférieur.

Cette approche représente une avancée significative dans la détection des dommages structurels sur les plates-formes offshore, offrant une méthode efficace pour analyser les dommages et estimer leurs emplacements, même avec des données modales limitées.

Duy et al[6]. Ont proposé une approche en deux étapes pour détecter les dommages dans les structures composites laminées. Leur méthode combine la méthode de l'énergie de déformation modale avec un algorithme d'évolution différentielle amélioré. Dans la première étape, la méthode basée sur l'énergie de déformation modale est utilisée pour identifier un ensemble d'éléments potentiellement endommagés. Ensuite, dans la deuxième étape, l'algorithme d'évolution différentielle amélioré est employé pour minimiser la fonction d'erreur de forme modale en ajustant les variables de conception liées à l'étendue des éléments endommagés identifiés.

Cette approche séquentielle permet une détection efficace des dommages dans les structures composites laminées en utilisant les informations modales pour guider le processus de détection, suivi d'une optimisation précise des variations pour affiner les résultats.

Nick et al[7], ont présenté une méthode en deux étapes pour l'identification des dommages visant à localiser et estimer les fissures dans les ponts à poutre en acier, pour évaluer la performance et la faisabilité de leur méthode, plusieurs scénarios d'endommagement simple et multiples ont été appliqués à un modèle d'élément fini (EF) validé du pont I-40.

Dans le premier étage, la localisation des dommages a été réalisée en utilisant la méthode de l'indice d'endommagement basé sur l'énergie de déformation modale. Cette méthode a permis de calculer séparément l'indice d'endommagement pour les trois premiers modes de flexion du pont. Ensuite, les vecteurs d'endommagement ainsi calculés ont été combinés le long des poutres pour déterminer la localisation et l'étendue des dommages.

Tan et al[8]. Ont développé une méthode basée sur les vibrations, exploitant exclusivement le premier mode de vibration, pour prédire les dommages, leur localisation et leur gravité dans les poutres en acier, des éléments structurels cruciaux dans les bâtiments et les ponts.

Chapitre I : Recherche bibliographique

Pour les cas d'endommagement simple, ils ont utilisé l'indice d'endommagement basée sur l'énergie de déformation modale β afin de détecter, localiser et quantifier les dommages. En revanche, pour les scénarios impliquant plusieurs types de dommages, un réseau neuronal artificiel intégrant β comme couche d'entrée a été mis en œuvre.

Ramesh et al[9], ont mené une analyse modale expérimentale sur une poutre en porte-à-faux aluminium pour étudier les modes propres avant et après l'endommagement dans des conditions de limite libre fixées par un variomètre laser Doppler (VLD). Ils ont induit une légère perturbation en utilisant une machine à décharge électrique (MDE) et ont simulé une fissure en séparant les nœuds à l'emplacement de la fissure sur les poutres.

L'objectif de leur étude était de présenter une méthode utilisant l'indice d'endommagement et des approches de transformation spatiale par ondelettes pour identifier l'emplacement de quantifier la fissure de surface dans la structure des poutres. Ils ont également réalisé une analyse par éléments finis (FEA) pour valider ces approches et illustrer un processus réalisable pour le travail expérimental. Dans cette méthodologie, les modes propres de déplacement obtenus à partir des poutres intactes et endommagées ont été utilisées pour calculer le rapport de l'énergie de déformation de la poutre avant et après l'endommagement, puis ces signaux spatialement distribués ont été analysés à l'aide de la transformation en ondelettes.

Li et al [10], ont développé une méthode améliorée de l'énergie de déformation modale (Méthode A) pour détecter les dommages dans les structures des plates-formes offshore, en se basant sur la méthode traditionnelle d'énergie de déformation modale, également connue sous le nom de méthode de l'indice de Stubbs. La principale innovation de leur méthode réside dans l'application des fréquences modales, ce qui vise à renforcer la robustesse de la méthode traditionnelle.

Dans le but de démontrer l'efficacité de leur méthode améliorée, Li et al[10], ont mené des études numériques et expérimentales sur différents scénarios d'endommagement, en utilisant une méthode A était efficace pour localiser les dommages, même lorsque les données modales étaient limitées, incomplètes spatialement ou perturbées par du bruit. Des analyses comparatives ont également démontré que l'indice A surpassait l'indice de Stubbs en termes de performance et de robustesse, confirmant ainsi l'avantage de l'approche proposée.

Dewang et al [11], ont développé une méthode de détection des dommages affectant la boîte à vitesse d'une éolienne, utilisant l'énergie de déformation modale (). Ils ont réalisé une analyse modale d'une boîte à vitesse éolienne à trois étages utilisé les paramètres modaux pour calculer l'énergie de déformation modale dans différentes composantes de la boîte à vitesses.

Leur étude comprend une analyse de distribution dans l' la boîte a vitesses en bon état caractériser dynamiquement les modes, ils ont utilisée deux indicateurs de dommages, à savoir le changement de l'énergie de déformation modale (C) et l'indice d'endommagement (IE) basé sur l' pour détecter les dommages, une comparaison entre ces deux indicateurs a été réalisée pour évaluer leur capacité à localiser avec précision et efficacité les dommages. Leurs résultats montrent que l'indice d'endommagement permet de localiser les dommages de manière plus précise que le changement de l'énergie de déformation modale.

Hosseini et al [12], ont introduit deux nouvelles fonction objectifs pur détecter l'endommagement dans les structures en comparant la structure endommagée avec le modèle analytique mis à jour à

l'aide de simulations par élément finis. Ils ont formulé le problème de détection des dommages comme un problème d'optimisation de la flamme de papillon de nuit (MFO) pour résoudre ce problème.

Dans la première méthode, une fonction objective basée sur l'énergie statique de déformation (ESD) et la matrice de flexibilité généralisée (MFG) a été proposée pour localiser et estimer l'étendue des dommages dans les structures. Une fonction objective basée sur une combinaison de l'énergie de déformation modale et de la fréquence naturelle a été développée.

Pour évaluer ces méthodes, quatre exemples de teste différents ont été étudiée pour chaque méthode, comprenant des poutres a 13 et 25 barres, des cadres plans a 23 et 28 éléments, un cadre spatial a 16 éléments ; ainsi qu'un cadre de cisaillement à 10 et 15 étages. Les chercheurs ont également pris en compte plusieurs défis, tels que l'impact du nombre de modes de vibration utilisés pour détecter les dommages et l'effet du bruit aléatoire sur les résultats de détection des dommages, afin de démontrer l'efficacité de leurs approches proposées.

Lee et al [13], a introduit une méthode améliorée de détection des dommages dans les structures des forme de plaque en utilisant l'énergie de déformation modale 0. Ils ont succinctement exposé la théorie de cette méthode pour les structures de plaque avec différentes condition aux limites, puis ont proposé une procédure en deux étapes basée sur l', comprenant une étape globale et une étape locale, dans le but d'améliorer la précision de la détection de l'emplacement et de gravité des dommages.

Pour tester l'efficacité de leur méthode, une plaque rectangulaire en aluminium a été étudiée. Ils ont analysé les modèles d'éléments finis de la plaque pour obtenir les fréquences naturelles et les modes propres avant et après l'apparition des dommages. En outre, ils ont introduit un indice de dommages pour évaluer la précision de leur méthode. Les résultats de leur analyse ont démontré que l'étape globale de la méthode MSE identifie efficacement la zone endommagée dans la plaque tandis que l'étape locale de la méthode MSE détecte avec la longueur de la fissure dans cette zone endommagée.

Yang et al [4], ont élaboré un cadre de modélisation basé sur la sensibilité à l'énergie de déformation modale des éléments pour détecter les dommages des poutres fonctionnellement graduées. Ils ont établi un ensemble d'équation d'endommagement pour les éléments de la poutre d'Euler-Bernoulli à gradation fonctionnelle, en fondant sur la sensibilité de la déformation modale des éléments et la taux de changement de l'énergie de déformation modale éléments de la condition de la condition saine à la condition endommagée.

Dehcheshmeh et al[14],ont introduit une méthode basée sur un modèle pour détecter et quantifier les dommages structurels. Leur approche repose sur l'utilisation de vecteurs pseudo-modaux d'énergie de déformation et de mode propre, avec une fonction objective sensible aux dommages adaptée à l'estimation et la quantification des dommages dans le cadre de cisaillement. Pour résoudre ce problème, ils ont employé l'algorithme d'optimisation des baleines AOB, fournissant ainsi une solution optimale pour la détection des dommages.

Ghasemi et al[15], ont développé une méthode de détection des dommages en deux étapes, dans la première étape, ils ont utilisé le concept d'énergie de déformation modale de la structure pour déterminer les éléments les plus susceptibles d'être endommagées, à cette fin, ils ont introduit un indice efficace basé sur la conversion de l'énergie de déformation modale. Dans la deuxième étape, ils formulé le problème de notification des dommages structurels comme un problème d'optimisation, qui a été résolu a l'aide d'un algorithme génétique modifié.

Ashory et al [16], ont mené une étude visant à améliorer la technique d'identification des dommages en utilisant une mise à jour du modèle d'éléments finis basée sur un algorithme génétique. Leur approche comprenait également une méthode d'évaluation avec une sensibilité accrue pour la détection des paramètres quantitatifs des dommages. A cette fin, ils ont développé une fonction objective appropriée basée sur l'énergie de déformation pondérée, qui présentait un niveau de sensibilité supérieur par rapport aux autres méthodes de diagnostic des dommages.

Leur étude a démontré une amélioration de la précision dans l'identification de la localisation et de l'intensité des dommages grâce à cette méthode proposée.

Moradipour et al [17], ont développé une méthode basée sur l'énergie de déformation modale, appliquée d'abord mathématiquement puis numériquement à une poutre fixe et à un cadre à trois étages, ils ont examiné des scénarios d'endommagements simples et multiples dans des conditions sans bruit et avec jusqu'à 5% de bruit ajouté. Pour chaque scénario d'endommagements, ils ont utilisé STRAND7 pour obtenir tous les modes propres et les fréquences naturelles des structures intactes, ainsi que les cinq premiers modes propres des structures supposées endommagées.

Par la suite les modes propres dérivés de chaque structure intacte et endommagée ont été utilisés séparément dans une formulation améliorée en utilisant MATLAB pour détecter l'emplacement et quantifier la gravité des dommages, comparativement aux résultats obtenus par la méthode précédente.

Wu et al [18], ont présenté une approche novatrice de détection des dommages structurels, basée sur l'énergie de déformation modale. Ils ont reformulé l'énergie de déformation modale élémentaire en utilisant les modes de déformation. Cette méthode a été appliquée à une poutre d'Euler-Bernoulli de section transversale uniforme.

Ce qui distingue cette nouvelle approche, c'est qu'elle ne nécessite que les données de déformation pour fonctionner, sans avoir besoin d'informations sur la rotation de la structure.

Shokrgozar et al [1] ont développé une nouvelle méthode appelée « méthode améliorée de la décomposition de l'énergie de déformation modale » (DA) pour détecter les dommages structurels sur les plateformes offshore de type "Jacket", en utilisant un nombre restreint de capteurs juste au-dessus de l'eau. Cette méthode présente deux contributions principales, ce qui améliore la précision de la détection des dommages. Deuxièmement, elle décompose l'énergie de déformation modale en énergie axiale et en énergie de flexion. L'approche DA permet de localiser les éléments endommagés en tenant compte de l'impact des dommages sur l'énergie de déformation axiale et flexion.

Xu et al [19], ont élaboré une nouvelle méthodologie pour évaluer les dommages en combinant deux approches distinctes. Dans cette méthodologie, l'approche d'intégrité est d'abord utilisée pour localiser approximativement les éléments potentiellement endommagés. Ensuite, dans une deuxième étape, les emplacements finaux des dommages et leurs étendues associées sont précisément estimés à l'aide de l'approche de la localité.

Pour étudier et comparer de manière efficace le comportement de la méthode de l'énergie de déformation intermodale, deux facteurs ont été introduits. Le premier facteur mesure la capacité de reconnaissance de la localisation des dommages, tandis que le deuxième facteur mesure la précision de l'estimation de la gravité des dommages.

Chapitre I : Recherche bibliographique

Yang et al [20], ont associé le capteur a réseau de bragg sur fibre (CBF) a la méthode des éléments finis inverse (MEFI) pour reconstruire le champs de contraintes globale à partir de données de contraintes mesurées en quel que point spécifique, cette approche leur a permis d'obtenir une approximation du mode de mesure complet basé sur le champs de contraintes globale. Ainsi, en utilisant directement la déformation, l'indice d'endommagement modal de déformation présente un avantage naturel.

Ensuite, ils ont introduit un indice de détection directe des dommages basé sur la forme du modèle de déformation. Cette méthode permet de localiser les dommages en se basant uniquement sur les données modales de déformation après l'occurrence des dommages, sans nécessiter de données préalables, les résultats des calculs ont démontré que le champ de contrainte global pouvait être rapidement reconstruit en utilisant le CBF et la MEFI, ce qui permettait de détecter les dommages en se fondant sur la méthode du modèle de contrainte.

Yong-Ji Cha et al [21], ont développé une nouvelle approche de détection des dommages en utilisant des algorithmes d'optimisation hybrides multi-objectifs basés sur l'énergie de déformation modale (EDM). Cette méthode vise à détecter les dommages dans diverses structures tridimensionnelles en acier (3D).

Les dommages mineurs ont peu d'impact sur les propriétés modales de la structure, rendant ainsi leur détection difficile avec les méthodes traditionnelles basées sur ces propriétés. Pour étudier l'efficacité de leur approche, différents scénarios d'endommagements mineurs ont été créés pour des structures 3D. L'algorithme génétique hybride multi-objectif proposé a été en mesure de détecter précieusement les emplacements et les étendues des dommages mineurs induits dans la structure.

Tang et al [22], ont exploré l'utilisation du réseau neuronal convolutif (CNN) pour extraire les caractéristiques de détérioration d'une structure a ossature métallique. Etant donné que les dommages structurels peuvent provoquer des changements dans les paramètres modaux de structure, ils ont utilisé l'opération de convolution pour extraire ces caractéristiques à partir des paramètres modaux, ensuite, ils ont employé un algorithme de classification pour évaluer l'état des dommages de structure.

Pour entrainer le CNN, ils ont appliqué la méthode des éléments finis pour analyser la vibration libre de la structure en acier et obtenir l'énergie de déformation modale du premier ordre pour divers scénarios de dommages. Ces données ont été utilisées comme échantillons d'endommagement pour le CNN. Par la suite, des expériences de vibration en été menées, et les paramètres modaux ont été obtenues à partir de l'analyse des signaux de vibration. Les données expérimentales ont été utilisées comme échantillons d'entraînement pour le CNN. Par la suite, des expériences de vibration. Les données expérimentales ont été introduites dans le CNN pour évaluer sa capacité de détection des dommages.

Khosraviani et al [23], ont introduit une méthode novatrice de détection des dommages qui permet d'identifier précisément les emplacements des dommages en combinant simultanément des indices d'endommagement liés a l'énergie de déplacement. Grace a cette approche, les zones endommagées, y compris le sol, peuvent être détectées avec une grande précision.

La première méthode présentée implique l'utilisation d'une combinaison de l'indice d'énergie à fréquence instantanée (EFI) et des réponses d'accélération structurelle. Pour évaluer cette méthode et fournir une évolution rapide, un nouvel indice d'endommagement par déplacement (IED) est introduit.

Cet IED combine des indices de fiabilité d'erreur (β) et de fonction de densité de probabilité normale (FDPN). L'innovation, ce qui s'avère plus efficace pour l'évaluation rapide des modèles de dommages avec des vecteurs de vitesse.

XU et al [24], ont introduit une stratégie spécialisée pour les méthodes basées sur l'énergie modale (EM), telles que l'énergie de déformation modale (EDM) et l'énergie cinétique modale (ECM), dans le but de sélectionner le meilleur sous-ensemble de modes avant d'effectuer l'identification des dommages. Cette stratégie prend en compte les dommages résultant des changements de rigidité et de masse des éléments structurels.

Pour rendre ce schéma applicable à une gamme plus large de situations, ils ont dérivé la sensibilité de l'énergie intermodale (EIM) plutôt que la sensibilité traditionnelle de l'énergie modale. Cette sensibilité, désignée comme indice de sensibilité, permet de sélectionner les combinaisons de modes (CM) les plus sensibles aux changements de rigidité et de masse, tandis que les CM restants, qui compliquent le processus de détection des dommages, sont éliminés.

Nedushan et al [25], ont développé une nouvelle approche en deux étapes pour détecter les dommages structurels, en utilisant la flexibilité modale et un indice basé sur l'énergie de déformation (MAMOE). (MAMOE).

Dans la première étape, ils ont proposé un nouvel indice d'endommagement (MFMIED) qui combine deux propriétés modales structurelles, à savoir l'énergie de déformation modale des éléments et les éléments diagonaux de la matrice de flexibilité structurelle, pour identifier les éléments potentiellement endommagés. Ils ont comparé les performances de cet indice à celles d'un autre dérivé de l'énergie de déformation modale, tout en examinant également l'impact des conditions environnementales variables sur la performances du MFMIED.

Dans la deuxième étape, la réponse modale de la structure est utilisée et mise à jour par l'algorithme MAMOE pour estimer l'étendue des dommages causés par les éléments suspects. Pour cela, l'algorithme MAMOE a été amélioré en enrichissant l'enseignement et l'apprentissage de l'algorithme EABO à l'aide de nouveaux mécanismes de mise à jour de chaque position de l'apprenant.

XU et al [26], ont introduit nouvelle approche pour localiser les dommages, nommée méthode EDR (énergie de déformation résiduelle), conçue pour repérer les dommages sur des structures « D en tenant compte des variations environnementales. Cette méthode EDR repose sur l'utilisation des modes propres résiduels pour créer un indicateur de localisation des dommages. Ils ont intégré l'algorithme de l'analyse des composants principaux pour atténuer l'impact des variations environnementales.

Wang et al [27], ont examiné différentes techniques liées à l'Energie de Déformation Modale (ED) pour l'identification des dommages structurels, les classant en plusieurs catégories telles que la méthode de l'Indice de Dommage (DI), la Méthode du Changement d'Energie de Déformation Modale (MSEC), la Méthode de l'Energie de Déformation Intermodale (Cross-MSE), et d'autres. Quatre méthodes représentatives liées à l'EDM ont été sélectionnées et présentées en premier lieu. Ensuite, l'identification des dommages sur des structures en poutres 1-D et des plates-formes offshore 3-D, tout en tenant compte des défis tels que l'incomplétude spatiale des données et le bruit, a été examinée de manière systématique à travers des simulations numériques et des données expérimentales. La capacité de ces quatre méthodes à localiser les dommages a été comparée. En conclusion, des critères généraux

sur ces méthodes d'identification des dommages ont été établis, et des suggestions pour des travaux futurs ont été discutées.

Niu et al [27], ont développé une nouvelle méthode d'identification des dommages pour les structures de ponts à poutres, en se basant sur la mise à jour du Modèle de Surface de Réponse (MSR) et l'Indice d'Endommagement de l'Energie de Déformation Modale des Eléments (EDME). Pour évaluer l'efficacité de cette méthode, des expériences ont été menées sur quatre poutres en acier simplement supportées. En utilisant le pont de Xiabaishi, une structure précontrainte à ossature rigide de grande portée, comme étude de cas, la méthode proposée a été validée en simulant divers scénarios d'endommagement des roulements. Enfin, son efficacité a été confirmée en appliquant la méthode de l'identification des dommages liés aux fissures sur un véritable pont à poutres continues appelé pont de Xinyihe.

Xu et al [28], ont introduit une approche itérative en deux étapes pour l'identification des dommages structurels. Cette méthode combine la méthode de décomposition modale et de l'énergie de déformation (MDMED) avec l'algorithme d'optimisation des essaims de particules à objectifs multiples. Contrairement à l'approche générale en deux étapes, qui cherche à localiser les dommages dans la première étape et à estimer leur gravité dans la deuxième, cette approche itérative construit un indicateur MSED itératif pour effectuer ces tâches de manière cyclique. Cela permet de progressivement supprimer les indicateurs faussement positifs des dommages et d'améliorer la précision de l'estimation de leur gravité au fil des itérations. De plus, une nouvelle opération d'activation des éléments est intégrée dans le processus itératif, permettant de réactiver et de refaire les tests avec les indications potentiellement fausses négatives exclues lors de la première étape, ce qui réduit le taux de faux négatifs.

Wei et al[29], ont proposé une méthode en deux étapes pour l'identification des dommages dans les plaques minces, basée sur l'énergie de déformation modale. Dans la première étape, ils ont localisé les dommages en utilisant l'approche du rapport de changement d'énergie de déformation modale, tout en introduisant une méthode pour atténuer l'effet de proximité, ce qui réduit les fausses alertes lors de la localisation des dommages. Dans la deuxième étape, ils ont itérativement déterminé l'étendue des dommages des éléments suspectés d'être endommagés en utilisant l'approche de mise du modèle d'éléments finis basée sur la sensibilité au changement d'énergie de déformation modale.

Bannen et al [29], ont introduit une méthode sans ligne de base pour améliorer la précision de la détection des dommages en utilisant l'énergie de déformation modale. Leurs travaux incluent des simulations numériques ainsi que des essais expérimentaux sur une poutre, où différents scénarios d'endommagement, simples et multiples, ont été considérés, avec des réductions d'épaisseur variant de 25% à 50%. Dans tous les cas, leur approche a permis d'obtenir des résultats présentant des pics relativement moins bruités dans l'indice d'endommagement, sans nécessiter de données de référence ou de base.

Zhong et al [30], ont étendu la méthode basée sur la courbure des modes propres pour s'adapter à l'identification des dommages sur des structures en forme de plaque, en utilisant les courbures des modes propres bidimensionnels. Cette méthode modifiée ne requiert que les premiers modes propres de courbures de la plaque avant et après l'endommagement, ou nécessite uniquement des informations sur le mode de la plaque endommagée si la technique de lissage par espacement est employée. Pour évaluer l'efficacité de leur méthode, ils ont réalisé des simulations numériques couvrant différents

scénarios de dommages sur les plaques, incluant la localisation, la gravité et les dommages multiples. De plus, ils ont mené une analyse modale expérimentale sur une plaque d'acier avec des bords serrés et libres afin de corrélérer les résultats numériques.

Nizar et al [31], ont abordé les aspects critiques de l'identification des dommages structurels en utilisant un algorithme évolutif basé sur la mise à jour du modèle d'éléments finis. Ils ont d'abord dressé un contexte théorique comprenant le problème de la détection des dommages structurels et les différents résidus entre les caractéristiques dynamiques du modèle d'éléments finis et le modèle physique correspondant, utilisés pour construire la fonction objective pour le suivi des dommages. Ils ont examiné les préoccupations concernant la sélection des paramètres pour la mise à jour du modèle d'éléments finis. De plus, ils ont exploré l'utilisation d'algorithmes évolutifs pour la mise à jour des modèles d'éléments finis dans la détection des dommages. Ils ont également présenté une étude de cas comparant les applications d'évaluations environnementales à objectif unique et d'une évaluation environnementale à objectifs multiples pour la mise à jour des modèles d'éléments finis en vue de la détection des dommages. Enfin, ils ont formulé des orientations de recherche potentielles pour l'utilisation d'algorithmes évolutifs basés sur la mise à jour de modèles d'éléments finis afin de résoudre les problèmes de détection des dommages.

Nguyen et al[31], ont développé une nouvelle méthode pour localiser et quantifier les dommages en utilisant des modes propres mesurés et des fréquences naturelles. Ils ont introduit un nouveau paramètre de vibration, le rapport entre l'énergie de déformation modale géométrique et la valeur propre (EDMGVP), et ont formulé sa modification due à la réduction de la rigidité à l'aide d'une matrice de sensibilité. Cette matrice de sensibilité a été estimée à partir des paramètres modaux mesurés et des informations de base sur la structure. Pour l'identification des dommages, ils ont d'abord localisé les dommages et déterminé leurs étendues en maximisant le niveau de corrélation entre un vecteur de changement analytique EDMGVP et un vecteur mesuré. Pour résoudre ce problème d'optimisation, ils ont utilisé l'algorithme génétique, un puissant algorithme d'optimisation évolutionnaire. Ensuite, ils ont estimé l'ampleur des dommages à l'aide de la technique EDMGVP proposée et l'ont comparée à une technique conventionnelle utilisant le changement de fréquence. Ils ont utilisé un pont numérique en treillis 2D pour démontrer la performance de leur méthode dans l'identification de cas de dommages simples et multiples.

1.2 Classification des méthodes utilisant l'énergie de déformation modale

L'identification des dommages basée sur l'énergie de déformation modale (EDM) est devenue un domaine d'intérêt distinct dans la détection des dommages structurels en raison de sa grande adaptabilité et de son efficacité. L'EDM a été largement appliquée à divers problèmes, comme indiqué dans [32], et d'autres références. Dans ce chapitre, les techniques d'identification des dommages basées sur l'EDM sont classées en quatre catégories : (1) la méthode de l'indice des dommages (IE) ; (2) la méthode du changement d'énergie de déformation modale (CEDM) ; (3) la méthode de l'énergie de déformation intermodale ; et (4) d'autres méthodes.

1.3 Méthode de l'indice des endommagements

Essentiellement, la méthode de l'indice d'endommagement vise à évaluer l'état de santé d'un élément structurel en utilisant un indice d'endommagement généré à partir de ses propriétés modales et physiques.

1.3.1 Méthode de Stubbs de l'indice d'endommagement SIE

La méthode de l'indice d'endommagement (SIE) requiert la connaissance des modes propres avant et après l'apparition des dommages. Cependant les valeurs normalisées en masse des modes propres ne sont pas indispensables pour calculer l'indice d'endommagement, ce qui est également le cas pour plusieurs autres méthodes, telles que la méthode de flexibilité. Les premiers rapports ont confirmé que la SIE est adaptée aux structures qui se comportent globalement comme des poutres ou qui peuvent être décomposées en éléments de poutre. Par la suite, l'application réussie de la SIE a également été démontrée sur des plaques composites avec raidisseurs[33].

Cependant, il est regrettable que la méthode SIE ne puisse identifier que la localisation des dommages, sans pouvoir quantifier leur ampleur. Jusqu'à présent, deux approches semblent prédominer dans les efforts visant à améliorer la précision de l'estimation de gravité des dommages, La premier consiste à développer une méthode capable de localiser et de dimensionner les dommages avec précision. Cette approche pourrait potentiellement modifier la forme naturelle de l'indice de Stubbs. L'autre approche consiste à appliquer une méthode de quantification afin d'obtenir des prévisions plus précises des niveaux de dommages.

1.3.2 Méthode de décomposition de l'énergie de déformation modale DEDM

La méthode SIE offre une grande promesse pour localiser des dommages significatifs. Cependant, elle montre des limitations lorsqu'il s'agit d'identifier de petits dommages dans des conditions de bruit intense. Pour pallier cette lacune, la méthode de décomposition modale de l'énergie de déformations(DEDM) a été développée afin d'améliorer la capacité de localisation de l'indice SIE. Contrairement à l'approche unique de l'indice d'endommagement dans la méthode SIE, la méthode DEDM propose deux indices d'endommagement distincts : l'indice des dommages axiaux et l'indice des dommages transversaux, qui sont liés aux coordonnées nodales axiales et transversales, respectivement. En analysant les informations fournis par ces deux indices d'endommagement, la méthode DEDM améliore considérablement la précision de la localisation des dommages. Les résultats ont démontré que la DEDM surpassait la méthode SIE pour détecter les petits dommages potentiels. De plus, la méthode DEDM s'est également révélée face aux variations de température[34]. Plus récemment, Li et al [4], ont également proposé un nouvel indice d'endommagement basé sur les recherches de Stubbs

1.3.3 La méthode de changement de l'énergie de déformation modale CEDM

Une catégorie de méthodes basées sur l'EDM est la méthode CEDM, qui repose sur le changement de l'énergie de déformation modale d chaque élément. Lorsqu'un dommage survire sur une structure d'une certaine étendue, les paramètres physique et modaux changement en conséquence, ainsi, l'analyse de ces changements constitue un critère logique pour la détection des dommages. L'avantage le plus significatif de cette méthode est sa formule simple mais efficace qui prend en compte la localisation des dommages.

1.3.4 La méthode de pourcentage de changement de l'énergie de déformation modale PCEDM

La méthode PCEDM est particulièrement attrayante, mais elle soulève certaine question critique, notamment l'utilisation des valeurs absolues de sensibilité. Malgré cela, la méthode CEDM a été appliquée avec succès sur une poutre sandwich composite et pond réel. Cependant, un inconvénient de

méthode PCEDM est sa sensibilité au bruit de mesure et au caractère incomplet des formes de mode mesurées. Bien que largement adoptée au cours des deux dernières décennies, la méthode PCEDM est souvent utilisée comme base théorique pour le développement d'autres techniques de détection des dommages plutôt que comme une méthode de détection des dommages individuels. Jusqu'à présent, ces techniques se répartissent en trois grandes catégories.

1.3.5 Energie de déformation modale élémentaire

Des équations de sensibilité du premier ordre de l'EDM élémentaire ont été dérivées pour un système réel symétrique non amorti, ces équations de sensibilité ont ensuite été utilisées pour formuler de manière systématique les équations d'endommagements élémentaires afin de résoudre simultanément la localisation et gravité des dommages. Pour surmonter le problème mal conditionné cause par le bruit de mesure, un algorithme de régularisation basée sur la décomposition en valeurs singulières a été appliqué. Des recherches plus récentes sur la méthode basée sur la sensibilité à l'énergie de déformations modale des éléments ont également été rapportées par Entezami et al[35]

Il est important de souligner que la sensibilité de l'EDM ne se limite pas à être simplement un indice des dommages structurels, mais elle consiste également une indication permettant d'évaluer si l'emplacement endommagé peut être identifié ou non. Par exemple, dans le cas d'une poutre simplement soutenue, les dommages sur élément adjacents au support sont toujours plus difficiles à détecter que sur les autres parties de la poutre. De plus, la caractéristique de sensibilité à la position de l'EDM offre également des informations utiles l'application des modes spécifiques à des emplacements particuliers.

La deuxième catégorie de technique CEDM améliorées tire profit des algorithmes d'optimisation populaires. En général, ces techniques se décomposent en deux étapes, le changement de l'énergie de déformation modale est pour obtenir des emplacements approximatifs des dommages. Ces prédictions sont ensuite utilisées dans la deuxième étape pour une localisation et une quantification plus précise des dommages à l'aide d'un algorithme d'optimisation, cette technique de fusion réduit considérablement les ressources et le temps de calcul, en particulier pour les structures à grande échelle. Es travaux similaire ont été réalisés par Kaveh et Zolghadr[5].

La dernière catégorie de méthodes CEDM repose sur la fusion de données ou la technologie de prise de décision. Une caractéristique notable de méthode CEDM est que lorsque des dommages surviennent dans un élément de structure, le PCEDM de cet endroit et de la zone environnement augmente. Ces augmentations supplémentaires du PCEDM peuvent entraver la reconnaissance correcte des emplacements endommagés.

Wei et al [29] ont introduit une méthode en deux étapes qui repose sur la variation de l'énergie de déformation modale pour détecter dommages dans les plaques minces. Cette approche utilise une technologie de prise de décision pour atténuer l'effet de proximité, ce qui contribue à réduire les fausses alertes lors de la localisation des dommages.

1.3.6 Méthode de l'énergie de déformation intermodale EDIM

Tant les méthodes d'énergie de déformation (ED) que celles basées sur changement d'énergie de déformation modale (CEDM) s'appuient sur l'énergie de déformation modale (EDM) calculée à partir des modes propres de la structure, qu'elle soit endommagée ou non. Cependant, la précision de

l'identification modale peut parfois être compromise en raison de diverses incertitudes pratiques, ce qui peut entraîner des difficultés supplémentaires dans la détection des dommages.

Comparativement à d'autres méthodes basées sur l'énergie de déformation modale (EDM), la méthode d'identification modale d'endommagement (EDIM) présente plusieurs avantages significatifs : 1) elle offre une solution exacte et non itérative, ce qui la distingue de la méthode basée sur le changement d'énergie de déformation modale Cumulée (CCEDM) qui nécessite une procédure de solution itérative. De plus, les indices de Stubbs et de CEMD reposent sur des présomptions grossières et des approximations significatives. 2) elle nécessite seulement des informations provenant de quelques modes mesurés de la structure endommagée, ce qui la rend moins exigeante en termes de collecte de données par rapport à d'autres méthodes. 3) elle ne nécessite pas que les informations des modes appariés proviennent du même mode pour la structure de base et la structure endommagée. De plus, elle n'exige pas les modes analytiques et mesurés soient cohérents en termes d'échelle ou normalisés d'une spécifique.

Initialement, la méthode ESIM était limitée dans le sens où elle nécessitait que les emplacements des endommagements structurels soient déjà identifiés. En d'autres termes, elle ne pouvait pas déterminer ces emplacements par elle-même. Pour remédier à cette lacune, deux méthodes de résolution EDIM ont été proposées. Par la suite, les caractéristiques intrinsèques de ces deux méthodes ont été discutées par XU et Wang[19]. Pour améliorer l'applicabilité de la méthode EDIM, une nouvelle procédure combinant ces deux méthodes a été développée.

En réalité, l'application de la méthode EDIM est restreinte aux cas où les distributions de masse des structures avant et après les dommages sont similaires. Pour tenir compte des modifications de la rigidité et des distributions de masse, la méthode EDIM a été élargie en une méthode appelée IMIM (inter-modèle inter-mode) pour la mise à jour des modèles structurels[36] dans le contexte de l'identification des dommages

1.4 Présentations des modèles d'endommagements

1.4.1 Présentation du modèle J.K.Sinha

La surveillance de l'état de santé des structures mécaniques à l'aide des données modales expérimentales est un domaine de recherche actif depuis de nombreuses années. La plupart des approches utilisent les données modales d'une structure avant l'apparition des dommages comme références, comparant tous les tests ultérieurs à ces données pour détecter toute déviation dans les propriétés modales. Cela permet d'estimer la taille de l'emplacement des fissures.

Doebbling et al[37], ont examiné la détection et la localisation des fissures et des dommages dans les structures en utilisant des données de vibrations. L'estimation de la taille et de l'emplacement des fissures nécessite généralement l'utilisation d'un modèle mathématique. Souvent un modèle d'éléments finis, combiné à des paramètres modaux expérimentaux, les méthodes d'estimation se basent principalement sur le changement des fréquences naturelles, des formes de modes ou de flexibilité dynamique mesurée, Salawu et al[38], ont également passé en revue les changements de fréquences naturelles.

Une autre approche de détection des fissures, également fondée sur les changements des paramètres modaux, utilise une méthode de mise à jour de modèles d'éléments finis.

Plusieurs méthodes de mise à jour de modèles basées sur le gradient ont été discutées par Friswell et Motteershead [39], De nombreuses études utilisant ces méthodes pour la surveillance de la santé des structures ont été rapportées [40, 41], la méthode proposé pour la détection de la taille et de l'emplacement des fissures utilise l'approche de mise a jour de modèle basée sur le gradient, bien que son application soit quelque peu différente dans l'étude actuelle.

La plupart des études antérieures ont identifié les changements dans les raideurs des éléments ou dans les matrices d'aideur du système. Ces méthodes estiment uniquement approximativement la taille et l'emplacement d'une fissure a un élément près, ce qui nécessite un maillage très fin de réduire cette charge computationnelle et d'améliorer la précision de localisation. Sinha et al [42], ont utilisé un concept similaire pour estimer les emplacements et les aideurs supports.

Les fréquences naturelles mesurées de la structure sont utilisées pour estimer la taille et l'emplacement des fissures. Des problèmes surviennent dans de nombreuses structures si seules les fréquences naturelles sont utilisées, car la symétrie de la structure signifie que l'emplacement des dommages est souvent non unique. L'utilisation des données de formes de modes permet d'obtenir une solution unique, bien que les fréquences naturelles soient relativement insensibles aux dommages. Cet article démontre l'utilisation du modèle simplifié de fissure en utilisant uniquement les données de fréquence naturelle, bien que le modèle puisse également être utilisé avec des algorithmes nécessitant des données de forme de mode de fréquence ou temps.

Une technique de mise à jour de modèle basée sur la sensibilité [39], basée sur un modèle d'élément finis corrélé, est utilisée. La méthode détecte une fissure en mettant à jour simultanément la position et la taille de la fissure dans le modèle d'éléments finis, en minimisant la différence entre les fréquences naturelles mesurées et calculées. Cette fonction de cout est une fonction très non linéaire par rapport aux paramètres de mise à jour, et une solution itérative est obtenue. Une telle approche nécessite la formation et calcul de la matrice de rigidité (première dérivé) de la fonction de cout par rapport aux paramètres de mise à jour.

Les fonctions de forme de la poutre sont utilisées pour générer la matrice de raideur du système en tant que fonction continue de ces paramètres de mise à jour, ainsi, la dérivée de la valeur propre par rapport aux paramètres de mise à jour peut être calculée analytiquement, produisant ainsi une matrice de sensibilité plus précise. La principale difficulté de l'approche de mise à jour du modèle est distinguée entre les dommages et les éventuelles erreurs de modélisation présentes dans la structure non endommagée.

Il existe deux approches pour démontrer ce problème, bien que les deux nécessitent des mesures de la structure non endommagée. La première consiste à mettre à jour le modèle de a structure non endommagée. Le premier consiste à mettre à jour le modèle de la structure non endommagée pour obtenir un modèle validé. Il est essentiel de veiller à ce que les paramètres du modèle validé. Il est essentiel de veiller à ce que les paramètres du modèle mise à jour aient un sens physique, plutôt que simplement d'améliorer la corrélation des données mesurées et prédites. La deuxième approche considère les changements de fréquence entre les structures endommagées et non endommagées, de sorte que les erreurs de modélisation soient éliminées au premier ordre. Aucune des deux approches ne parvient à faire face de manière satisfaisante aux effets environnementaux, tels que les variations de température ou d'humidité.

Les alternatives à l'approche inverse, basée sur un modèle d'éléments finis de la structure, sont les techniques de reconnaissance de motifs et de traitement du signal (par exemple, les références [43, 44], Ces méthodes déterminant si des dommages ont eu lieu ou non en se basant sur des vecteurs de caractéristiques qui codent les propriétés dynamiques importantes de la structure. La localisation est généralement effectuée en déterminant quel sous-ensemble candidat de sous-structures est endommagé. Cependant ces méthodes rencontrent encore des problèmes lorsque la dynamique change en raison d'effets environnementaux. A moins que ces effets ne soient explicitement incorporés dans les vecteurs de caractéristiques.

Souvent, les procédures de reconnaissance de motifs nécessitent un nombre significatif d'ensemble de données d'entraînement représentatif des scénarios non endommagés, et la seule source réaliste de ces données est la simulation. Le modèle simplifié présenté dans cet article peut également fournir des données d'entraînement pour algorithmes de reconnaissance de motifs.

La modélisation des fissures dans les structures de type poutre est abordée avec diverses méthodes dans la littérature. Les approches vont de l'utilisation d'une raideur pour simuler une fissure sur un élément complet à la division de la poutre en deux parties reliées par une articulation avec l'ajout d'un ressort rotatif à l'emplacement de la fissure.

En alternative, des modèles plus précis visent à reproduire la dynamique près de la fissure en utilisant des solutions analytiques pour les fréquences naturelles et les formes de modes ou en appliquant des équations différentielle avec les conditions aux limites adaptées. Des maillages d'élément être employés pour des modèles plus détaillés et précis bien que cela soit complexe et intensif en calcul pour des structures simples comme les poutres. Malgré la précision accrue de ces modèles détaillés, ils doivent composer avec des erreurs de modélisation et de mesure, ainsi qu'avec les effets lissants des vibrations a base fréquences. En conséquence, leur impact sur l'amélioration des résultats des algorithmes de détection et de localisation des fissures reste limité dans la pratique.

Le modèle décrit dans cet article concerne une fissure ouverte. Une fissure respirant, qui s'ouvre et se referme, génère des dynamiques non linéaire intéressantes est compliquées. Brandon [45], et kisa et brandon [46], ont donné un aperçu de certaines des technique qui peuvent être appliqué. De nombreuses techniques pour analysées les dynamiques non linières résultantes sont basées sur une approximation de raideur bilinéaire lorsque la fissure s'ouvre et se ferme. L'approche proposée dans cet article est capable d'approximée la matrice de rigidités pour la poutre avec une fissure ouverte. Une tel approche serra certainement plus efficace que celle basée sur des modèles FE 2-D ou 3-D pour l'intégration temporelle des équations du mouvement. Cependant, toute analyse non linière réaliste à plusieurs degrés de liberté devrait être basée sur un modèle a ordres réduit de la structure.

Cet article modélise des structures de poutre avec des fissures a différentes positions en utilisant des éléments de poutre Euler-Bernoulli avec une modification de la flexibilité locale a proximité de la fissure. L'approche de modélisation est basée sur le concept de Christides et barr [47], et utilise une approximation simple de la réduction de rigidité. D'autres auteurs ont utilisé des approches similaires [48, 49]. La formulation est plus simple que celle de la méthode de Lee et Chung [50], et présente l'avantage d'inclure directement la localisation et la profondeur de la fissure. La modélisation de la fissure sera discutée en premier, suivie de l'intégration du modèle de fissure dans le modèle FE de la structure et de l'estimation de la localisation et de la taille de la fissure à partir des données modales mesurées. Les résultats expérimentaux sont ensuite utilisés pour valider le modèle de fissure et pour

comparer les résultats avec ceux d'autres modèles de fissures. Cette comparaison vise à montrer que le modèle de fissure proposé peut offrir une précision similaire à celle des autres modèles, mais est plus simple à appliquer dans les applications de surveillance de la santé des structures. Enfin, la méthode proposée est démontrée à l'aide d'exemples expérimentaux.

1.4.2 Modèle Dimarogonas

Dimarogonas et Paipetis [51], ont développé un modèle de poutre fissurée en se basant sur le calcul de l'énergie de déformation élastique et du facteur d'intensité de contrainte. Ils ont ensuite utilisé cette approche pour calculer la constante du ressort rotatif de torsion qui représente la section fissurée dans leur modèle de poutre endommagée.

La poutre non endommagée est modélisée selon la théorie d'Euler –Bernoulli, avec des éléments finis de longueur L

La partie endommagée, avec une fissure de profondeur normalisée $\frac{a}{h}$ et d'emplacement normalisé x/L , est représentée par un ressort rotatif sans masse reliant les deux parties non fissurées I et II

Le calcul de la constante de ce ressort rotatif de torsion se base sur l'expression de l'énergie de déformation élastique en fonction du facteur d'intensité de contrainte, comme développée par Dimarogonas et Paipetis dans leurs travaux.

Cela permet de modéliser de manière simplifiée l'effet d'une fissure sur le comportement vibratoire de la poutre.

1.4.3 Réduction de la rigidité

Les plaques composites stratifiées sont largement étudiées dans les domaines du génie civil et mécanique en raison de leurs propriétés avantageuses telles que la légèreté, la résistance élevée et la durabilité. Dans ce contexte, une nouvelle approche innovante pour l'identification des fissures dans les composites à fibre de carbone renforcés de polymère (CFRP) a été présentée par Khatir et al [52]. Cette méthode repose sur l'analyse des vibrations couplée à une technique de réduction de modèle. L'approche proposée s'appuie sur la résolution d'un problème inverse en utilisant une matrice instantanée construite à partir de données expérimentales. Pour résoudre ce problème inverse, les auteurs ont employé deux algorithmes d'optimisation puissants ; l'algorithme génétique (AG) et l'algorithme de recherche de coucou.

Par ailleurs, Capozucca et al [53, 54], ont développé une solution analytique pour le cas d'une double entaille de fissure dans un matériau composite, en considérant différentes conditions aux limites. Leurs résultats théoriques ont été validés de manière expérimentale, démontrant ainsi la pertinence de cette approche pour l'étude du comportement mécanique des structures composites fissurées.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une recherche bibliographique sur les trois différentes méthodes d'identification d'endommagements. Ces méthodes se focalisent sur la détection et la localisation des dommages qu'une structure mécanique possède. Nous avons ensuite présenté une recherche sur les

Chapitre I : Recherche bibliographique

trois approches d'endommagement : l'approche proposée par J.K.Sinha et al, et celle de A.D.Dimarogonas et S.A.Paipetis.

Chapitre II : Etude théorique

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons traiter et parler de la théorie des éléments de poutres et de l'analyse vibratoire à partir desquels les algorithmes de la méthode de détection d'endommagement sont utilisés avec l'énergie de déformation modale.

Ainsi, nous allons présenter trois modèles mathématiques de poutres endommagées qui ont été développées pour l'application de ces méthodes et pouvoir faire une analyse dynamique d'une poutre endommagée. Enfin, nous allons mettre l'accent sur l'historique d'utilisation des différents modèles de détection des dommages dans les structures mécaniques.

2.1.1 Élément finis poutres

Une poutre est un solide engendré par un ensemble de surface S dites (sections droites), dont les deux dimensions sont petites par rapport à la troisième, on définit la ligne moyenne comme étant la succession des centres de gravités de chaque section droite, une poutre travaille généralement en flexion [55].

Autrement dit, la poutre est un solide constitué par un nombre indéterminés de nœuds dont la surface S constitue le décalage entre deux ou plusieurs nœuds qui se travaillent généralement en flexion. En effet, la surface existante entre deux ou plusieurs nœuds peut être différente.

2.1.2 La matrice élémentaire de raideur et de masse

2.1.2.1 Approximation des déplacements

A ce stade, chaque nœud possède deux degrés de liberté et un déplacement w normal à la poutre et une rotation θ autour de l'axe z . Par conséquent, le nombre total de degré de liberté de chaque élément est égal à quatre.

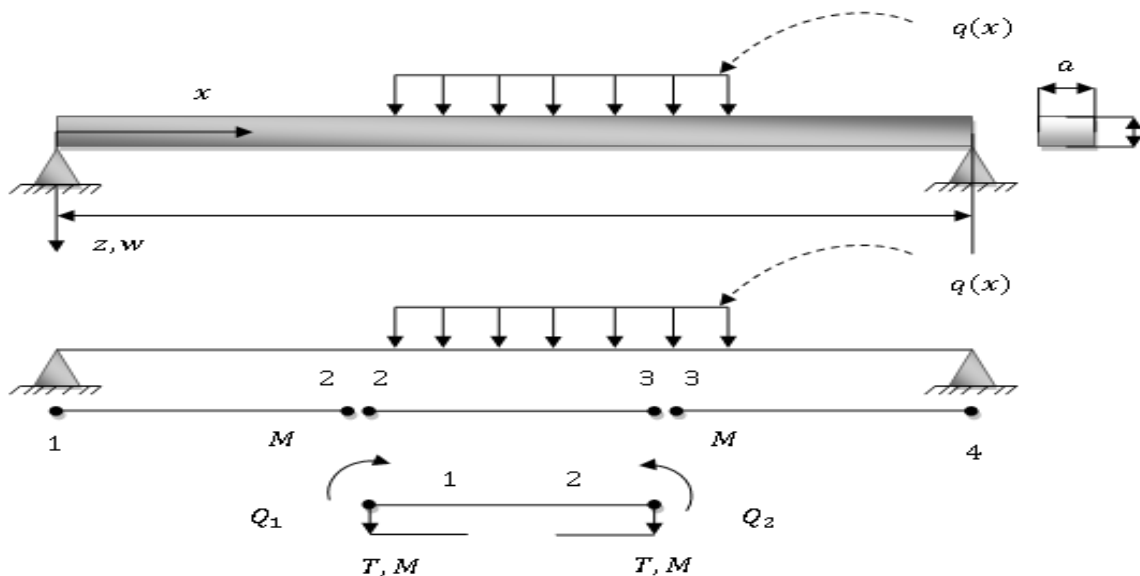


Figure 1 : la discrétisation d'une poutre en élément unidimensionnelle

Chapitre II : Etude théorique

Le nombre de degré de liberté de l'élément étant connu on peut déterminer le vecteur de déplacement nodal $\{\delta\}$ et le vecteur de charge nodal $\{p\}$. La matrice de rigidité $[K]$ pour cet élément.

$$\{p\} = [K].\{\delta\} \quad (1)$$

Avec :

$$P = \begin{Bmatrix} T_1 \\ M_1 \\ T_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} \{\delta\} = \begin{Bmatrix} w_1 \\ \theta_1 \\ w_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Et

Le vecteur possède quatre termes, La matrice $[K]$ est la matrice carrée de l'ordre quatre par quatre.

Sa fonction de déplacement qui satisfait l'élément de la poutre est:

$$w = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot x^2 + \alpha_4 \cdot x^3 \quad (3)$$

$$\theta = \frac{dw}{dx} = \alpha_2 + 2 \cdot \alpha_3 \cdot x + 3 \cdot \alpha_4 \cdot x^2 \quad (4)$$

A partir de ces deux équations, on obtient la forme matricielle suivante:

$$\{f(x)\} = \begin{bmatrix} 1 & x & x^2 & x^3 \\ 0 & 1 & 2 \cdot x & 3 \cdot x^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ou :

$$\{f(x)\} = [\Phi(x)].\{\alpha\} \quad (6)$$

Dans le cas où on exprime le coefficient de déplacement $\{\alpha\}$ en fonction des déplacements nodaux $\{\delta\}$ et en les intégrant dans l'équation, on obtient la liaison des déplacements aux déplacements nodaux, ainsi pour notre exemple de la figure 1 (Dernière figure) les coordonnées des nœuds sont 0 et 1, on aura :

$$\begin{aligned} x &= 0 \\ \text{Nœud 1 : } w_1 &= \alpha_1 \\ \theta_1 &= \alpha_2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} x &= l \\ \text{Nœud 2 : } w_2 &= \alpha_1 + \alpha_2 \cdot l + \alpha_3 \cdot l^2 + \alpha_4 \cdot l^3 \\ \theta_2 &= \alpha_2 + 2 \cdot \alpha_3 \cdot l + 3 \cdot \alpha_4 \cdot l^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Sa forme matricielle est :

$$\{\delta\} = [A].\{\alpha\} \quad (9)$$

Avec :

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & l & l^2 & l^3 \\ 0 & 1 & 2.l & 3.l^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

La matrice $[A]$ étant connue, le vecteur des coefficients $\{\alpha\}$ peut être obtenu en inversant l'expression de l'équation précédente (10)

$$\{\alpha\} = [A^{-1}].\{\delta\} \quad (11)$$

$$[A^{-1}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -3 & -2 & 3 & -1 \\ \frac{2}{l^3} & \frac{1}{l^2} & -\frac{2}{l^3} & \frac{1}{l^2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

En substituant l'expression de $\{\alpha\}$ dans la fonction 11, on aura :

$$\{f(x)\} = [\phi(x)].[A^{-1}].\{\delta\} \quad (13)$$

2.1.2.2 Le lien existant entre le déplacement et la déformation

Pour obtenir les déformations $\varepsilon(x)$ au différent points de l'élément, il suffit de faire une dérivé a la fonction de déplacement $f(x)$:

$$\{\varepsilon(x)\} = \{f(x)'\} \quad (14)$$

D'après la relation :

$$\{f(x)\} = [\phi(x)].[A^{-1}].\{\delta\} \quad (15)$$

donc :

$$\{\varepsilon(x)\} = \{[\phi(x)].[A^{-1}].\{\delta\}'\} \quad (16)$$

Soit $[B(x)]$ la matrice dérivée de $\phi(x)$:

$$M(x) = -E.I. \frac{D^2W}{dx^2} \quad (17)$$

$$\delta(x) = \frac{M(x).z}{I} \quad (18)$$

$$\varepsilon(x) = \frac{\delta(x)}{E} \quad (19)$$

$$= \frac{-z d^2 w}{dx^2} \quad (20)$$

D'autre part :

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = [0 \quad 0 \quad -2 \quad -6 \cdot x] \cdot \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{Bmatrix} \quad (21)$$

D'où

$$\{\varepsilon(x)\} = +z [0 \quad 0 \quad -2 \quad -6 \cdot x] \cdot \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{Bmatrix} \quad (22)$$

D'après l'expression N°(23), on obtient :

$$\{\varepsilon(x)\} = +z [0 \quad 0 \quad -2 \quad -6 \cdot x] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -3 & -2 & 3 & -1 \\ \frac{2}{l^3} & \frac{1}{l^2} & \frac{-2}{l^3} & \frac{1}{l^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ \theta_1 \\ w_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (23)$$

$$= +z \cdot \left[\frac{6}{l^2} - \frac{12 \cdot x}{l^3} \quad \frac{4}{l} - \frac{6 \cdot x}{l^2} \quad \frac{-6}{l^2} + \frac{12 \cdot x}{l^3} \quad \frac{2}{l} - \frac{6 \cdot x}{l^2} \right] \begin{Bmatrix} w_1 \\ \theta_1 \\ w_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (24)$$

D'après la relation (23) et (24) on remarque que :

$$[B(x)] \cdot [A^{-1}] = +z \cdot \left[\frac{6}{l^2} - \frac{12 \cdot x}{l^3} \quad \frac{4}{l} - \frac{6 \cdot x}{l^2} \quad \frac{-6}{l^2} + \frac{12 \cdot x}{l^3} \quad \frac{2}{l} - \frac{6 \cdot x}{l^2} \right] \quad (25)$$

2.1.2.3 Le lien existant entre la déformation et la contrainte

$$\{\delta(x)\} = [D] \cdot \{\varepsilon(x)\} \quad (26)$$

$$\{\delta(x)\} = +z \cdot [D] \cdot [B(x)] \cdot [A^{-1}] \cdot \{\delta\} \quad (27)$$

Le lien peut se résumer par la relation existantes entre les charges nodales et les déplacements nodaux :

Le travail externe produit par les charges nodales doit être égale au travail interne des contraintes.

Le travail externe Q_e des forces nodales du a un déplacement virtuel est :

Chapitre II : Etude théorique

$$Q_e = \{d\delta_1\} \cdot \{p_1\} + \{d\delta_2\} \cdot \{p_2\} + \dots + \{d\delta_n\} \cdot \{p_n\} = \{d\delta\}^T \cdot \{P\} \quad (28)$$

Le travail interne par unité de volume est donnée par :

$$dQ_i = \{d\varepsilon(x)\}^T \cdot \{\delta(x)\} \quad (29)$$

$$Q_i = \iiint_V \{d\varepsilon(x)\}^T \cdot \{\delta(x)\} \cdot dv \quad (30)$$

En utilisant les équations (29) et (30) on obtient :

$$Q_i = \iiint_V z^2 \cdot \{[B(x)] \cdot [A^{-1}] \cdot \{d\delta\}\}^T \cdot [D] \cdot [B(x)] \cdot [A^{-1}] \cdot \{\delta\} \cdot dv \quad (31)$$

$$= \iiint_V z^2 \cdot \{[B(x)] \cdot [A^{-1}] \cdot \{d\delta\}\}^T \cdot [D] \cdot [B(x)] \cdot [A^{-1}] \cdot \{\delta\} \cdot dA \cdot dx \quad (32)$$

Cependant :

$$\iint z^2 \cdot dA = I \text{ (Moment d'inertie)} \quad (33)$$

D'où :

$$\int_0^1 I \cdot \{[B(x)] \cdot [A^{-1}] \cdot \{d\delta\}\}^T \cdot [D] \cdot [B(x)] \cdot [A^{-1}] \cdot \{\delta\} \cdot dx \quad (34)$$

Egalisant les deux travaux :

$$\{d\delta\}^T \cdot \{p\} = \int_0^1 I \cdot \{[B(x)] \cdot [A^{-1}] \cdot \{d\delta\}\}^T \cdot [D] \cdot [B(x)] \cdot [A^{-1}] \cdot \{\delta\} \cdot dx \quad (35)$$

or:

$$\{P\} = [k] \cdot \{\delta\} \quad (36)$$

$$k = \int_0^1 \{[B(x)] \cdot [A^{-1}] \cdot \{d\delta\}\}^T \cdot [D] \cdot [B(x)] \cdot [A^{-1}] \cdot dx \quad (37)$$

En substituant : $[B(x)] \cdot [A^{-1}]$ et $[B(x)] \cdot [A^{-1}]$ dans on obtient :

$$[k] = \int_0^1 \begin{bmatrix} \frac{6}{l^2} & -\frac{12 \cdot x}{l^3} \\ \frac{4}{l} & -\frac{6 \cdot x}{l^2} \\ -\frac{6}{l^2} & +\frac{12 \cdot x}{l^3} \\ \frac{2}{l} & -\frac{6 \cdot x}{l^2} \end{bmatrix} \cdot \left[\frac{6}{l^2} - \frac{12 \cdot x}{l^3} \quad \frac{4}{l} - \frac{6 \cdot x}{l^2} \quad \frac{6}{l^2} + \frac{12 \cdot x}{l^3} \quad \frac{2}{l} - \frac{6 \cdot x}{l^2} \right] \cdot dx \quad (38)$$

En considérant que E et I sont des constants, et en effectuant le produit et on intégrant les constants on obtient la matrice de rigidité [k] d'un élément de la poutre.

$$[k] = \frac{E \cdot I}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6 \cdot l & -12 & 6 \cdot l \\ 6 \cdot l & 4 \cdot l^2 & -6 \cdot l & 2 \cdot l^2 \\ -12 & -6 \cdot l & 12 & -6 \cdot l \\ 6 \cdot l & 2 \cdot l^2 & -6 \cdot l & 4 \cdot l^2 \end{bmatrix} \quad (39)$$

2.1.2.4 La matrice élémentaire de masse par rapport au plan local (xy)

$$M_e = \int [N_{(x)}]^T \rho [N_{(x)}] dv \quad (40)$$

$$[M_e] = \frac{\rho A l_e}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l_e & 54 & -13l_e \\ 22l_e & 4l_e^2 & 13l_e & -3l_e \\ 54 & 13l_e & 156 & -22l_e \\ -13l_e & -3l_e^2 & -22l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix} \quad (41)$$

2.2 La matrice globale d'une poutre

Dans une poutre, il est nécessaire d'assembler tous les éléments de la matrice [K] afin de d'obtenir la matrice de rigidité.

La somme de forces appliquées sur ce nœud est égale à la somme des forces des nœuds des deux éléments, et les déplacements de ces nœuds sont identiques dans les deux éléments

Pour l'illustration de ce principe on considère l'exemple suivant dans nous nous sommes proposés d'assembler deux éléments d'une poutre :

$$[k^1] = \frac{E \cdot I}{L_1^3} \begin{bmatrix} 12 & 6 \cdot L_1 & -12 & 6 \cdot L_1 \\ 6 \cdot L_1 & 4 \cdot L_1^2 & -6 \cdot L_1 & 2 \cdot L_1^2 \\ -12 & -6 \cdot L_1 & 12 & -6 \cdot L_1 \\ 6 \cdot L_1 & 2 \cdot L_1^2 & -6 \cdot L_1 & 4 \cdot L_1^2 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$[k^2] = \frac{E \cdot I}{L_2^3} \begin{bmatrix} 12 & 6 \cdot L_2 & -12 & 6 \cdot L_2 \\ 6 \cdot L_2 & 4 \cdot L_2^2 & -6 \cdot L_2 & 2 \cdot L_2^2 \\ -12 & -6 \cdot L_2 & 12 & -6 \cdot L_2 \\ 6 \cdot L_2 & 2 \cdot L_2^2 & -6 \cdot L_2 & 4 \cdot L_2^2 \end{bmatrix} \quad (43)$$

Elément 1

$$T_1^1 = \frac{E.I}{L_1^3} (12w_1 + 6.L_1.\theta_1 - 12.w_2 + 6.L_1.\theta_2) \quad (44)$$

$$M_1^1 = \frac{E.I}{L_1^3} (6.L_1w_1 + 4.L_1^2.\theta_1 - 6.L_1.w_2 + 2.L_1^2.\theta_2) \quad (45)$$

$$T_2^1 = \frac{E.I}{L_1^3} (-12w_1 - 6.L_1.\theta_1 + 12.w_2 - 6.L_1.\theta_2) \quad (46)$$

$$M_2^1 = \frac{E.I}{L_1^3} (6.L_1w_1 + 2.L_1^2.\theta_1 - 6.L_1.w_2 + 4.L_1^2.\theta_2) \quad (47)$$

Elément 2

$$T_2^2 = \frac{E.I}{L_2^3} (12w_2 + 6.L_2.\theta_1 - 12.w_3 + 6.L_2.\theta_3) \quad (48)$$

$$M_1^2 = \frac{E.I}{L_2^3} (6.L_2w_2 + 4.L_2^2.\theta_2 - 6.L_2.w_3 + 2.L_2^2.\theta_3) \quad (49)$$

$$T_3^2 = \frac{E.I}{L_2^3} (-12w_2 - 6.L_2.\theta_2 + 12.w_3 - 6.L_2.\theta_3) \quad (50)$$

$$M_3^2 = \frac{E.I}{L_2^3} (6.L_2w_2 + 2.L_2^2.\theta_2 - 6.L_2.w_3 + 4.L_2^2.\theta_3) \quad (51)$$

Donc après avoir assemblée ces éléments la matrice d'assemblage d'une poutre s'écrit comme suit :

$$[Kg] = \begin{bmatrix} \frac{12.E.I}{L_1^3} & \frac{6.E.I}{L_1^2} & \frac{-12.E.I}{L_1^3} & \frac{6.E.I}{L_1^2} & 0 & 0 \\ \frac{6.E.I}{L_1^2} & \frac{4.E.I}{L_1} & \frac{-6.E.I}{L_1^2} & \frac{2.E.I}{L_1} & 0 & 0 \\ -\frac{12.E.I}{L_1^3} & \frac{-6.E.I}{L_1^2} & \frac{12.E.I}{L_1^3} + \frac{12.E.I}{L_2^3} & \frac{-6.E.I}{L_1^2} + \frac{6.E.I}{L_2^2} & \frac{-12.E.I}{L_2^3} & \frac{6.E.I}{L_2^2} \\ \frac{6.E.I}{L_1^2} & \frac{2.E.I}{L_1} & \frac{-6.E.I}{L_1^2} + \frac{6.E.I}{L_2^2} & \frac{4.E.I}{L_1} + \frac{4.E.I}{L_2} & \frac{-6.E.I}{L_2^2} & \frac{2.E.I}{L_2} \\ 0 & 0 & \frac{-12.E.I}{L_2^3} & \frac{-6.E.I}{L_2^2} & \frac{12.E.I}{L_2^3} & \frac{-6.E.I}{L_2^2} \\ 0 & 0 & \frac{6.E.I}{L_2^2} & \frac{2.E.I}{L_2} & \frac{-6.E.I}{L_2^2} & \frac{4.E.I}{L_2} \end{bmatrix} \quad (52)$$

2.3 Introduction des conditions d'appui

Pour fixer une structure mécanique et assurer sa stabilité globale, Les conditions aux limites sont introduites d'une manière à éliminer les degrés de liberté. Les conditions d'appui peuvent se manifester

Chapitre II : Etude théorique

sous diffèrent forme d'encastrement ou de contrainte spécifique sur les déplacements qu'ils soient nuls ou imposés.

Les déplacements connus liés aux appuis sont regroupées dans un vecteur Q_B tandis que les déplacements inconnus sont rassemblés dans un seul vecteur Q_L . En réorganisant le système d'équation pour distinguer les degré de liberté bloqués et libre, on peut efficacement résoudre les problèmes de stabilité et d'analyse structurelles en combinant les informations[56].

$$[\alpha].\{Q\} = \Leftrightarrow \begin{bmatrix} [Q_{LL}] & [Q_{LB}] \\ [Q_{BL}] & [Q_{BB}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_L \\ \alpha_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_{ext}\} \\ \{R\} \end{Bmatrix} \quad (53)$$
$$\{f(x) = [\phi(x)].\}$$

Avec :

K : c'est la matrice de rigidité élémentaire d'une poutre.

Q : Vecteur de déplacement

F : Vecteur force associé.

R : Vecteur réaction

$$[Q_{LL}].\{\alpha_L\} = \{F_{ext}\} - [Q_{LB}].\{\alpha_B\} \Rightarrow \{\alpha_L\} \quad (54)$$

NB :

$[K_{LL}]$ ne devra pas comporter de termes diagonaux nuls, ceux-ci ne pourront pas être négatifs du fait de son caractère défini positif ($\{Q_L\}^T [K_{LL}].\{Q_L\} > 0$)

D'un autre sans les réactions peuvent être calculées à partir de cette équation :

$$\{R\} = [Q_{BL}].\{\alpha_L\} + [Q_{BB}].\{\alpha_B\} \quad (55)$$

Exemple :

Soit une poutre encastree, possédent deux noeud et un seul élément :

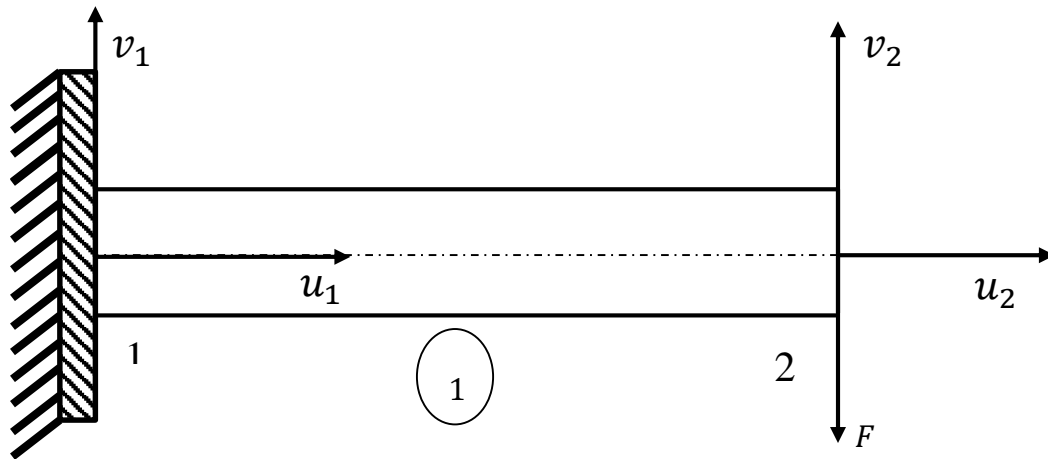


Figure 2 : poutre encastré-libre

Condition initiales pour ce système

Déplacement connus :

$$Q_L = \begin{cases} U_1 \\ V_1 \end{cases} = 0 \quad (56)$$

Déplacement inconnus :

$$Q_B = \begin{cases} U_2 \neq 0 \\ V_2 = -F \end{cases} \quad (57)$$

La matrice élémentaire de l'élément :

$$[K] \cdot \{Q\} = [K_1] \cdot \{Q\} = \frac{E \cdot I}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6.l & -12 & 6.l \\ 6.l & 4.l^2 & -6.l & 2.l^2 \\ -12 & -6.l & 12 & -6.l \\ 6.l & 2.l^2 & -6.l & 4.l^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ U_2 \\ V_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_{x1} \\ R_{y1} \\ 0 \\ -F \end{Bmatrix} \quad (58)$$

D'où :

$$\begin{cases} 12U_1 + 6lV_1 = \{R_{x1}\} \\ 12U_1 + 6.lV_1 = \{R_{y1}\} \end{cases} \quad (59)$$

$$\begin{cases} 12U_2 - 6.lV_2 = \{0\} \\ 4.l^2V_2 - 6.lU_2 = \{-F\} \end{cases} \quad (60)$$

D'où :

$$\begin{cases} U_2 = \frac{lV_2}{2} \\ V_2 = \frac{3.lU_2 - F}{2.l^2} \end{cases} \quad (61)$$

2.4 Méthode basée sur la variation des fréquences

La méthode qui repose sur la variation des fréquences naturelle est l'une des différentes méthodes clés de détection des endommagements au sein des structures dans le cas où une structure est endommagée, par conséquent sa rigidité diminue qui mène à une baisse de fréquences propres, cette approche offre l'avantage de trouver des mesures rapides et faciles de ses fréquences de plus les techniques expérimentales utilisées sont bien établies, ce qui mène à trouver des résultats efficacement et facilement sur de nombreux points avec une procédure expérimentale simple, malgré tout, les fluctuations environnementales peuvent fausser les mesures rendent la distinction entre les changements dus aux dommages et causés par l'environnement difficile, pour la résolution de ces problèmes, ainsi qu'on peut utiliser, la technique de traitement de signal avancées.

En résumé, bien que les méthodes basées sur la variation des fréquences soient pratiques, elles nécessitent une attention particulière pour garantir des résultats fiables.

De nombreux chercheurs ont essayé de détecter et localiser l'endommagement en se basant sur les variations des fréquences propres, une revue littéraire sur cette catégorie a été faite par Salawu[38]. Le trait le plus attrayant associé à l'utilisation des fréquences propres est que ces dernières sont relativement faciles à obtenir et à extraire. La mesure de la fréquence peut être menée rapidement et l'exactitude est souvent réalisable. Certains chercheurs à l'instar de [57, 58] ont comparé les fréquences naturelles des structures saines et endommagées (et la diminution des fréquences associées)

L'environnement tel que la T ou l'humidité constitue un défi pour détecter l'endommagement relié à la structure réelle.

D'après S.G GREED[59], le résultat de la détection doit être fiable si le changement de fréquences propres provoqué par l'endommagement est inférieur à 5%.

Toutefois, des variations importantes des seules fréquences ne signifient pas nécessairement la présence d'un endommagement car dans certains cas on a observé en une seule journée des variations de fréquence liées aux conditions ambiantes de plus de 5% pour les ponts en béton ou en acier, plusieurs écrivains ont étudié les changements de fréquences comme indice d'endommagement, selon cette approche les fréquences sont considérées comme des indicateurs sensibles de l'intégrité structurale, des modifications sur les fréquences propres de la structure sont causées par les changements des propriétés structurelles[60].

Les premières études principalement dans le domaine des méthodes de niveau de type MBM, se sont concentrées sur le calcul des changements en fréquence d'un type d'endommagement et on compare les fréquences mesurées aux fréquences prédites[61] [62]

Les paramètres modaux ne sont pas toujours les mêmes pour chaque mode, ils varient en fonction de la nature, la localisation et de la gravité de l'endommagement. Selon Duggan et al [62], étant donné que l'effet d'endommagement varie en fonction de l'ordre des modes, afin de suivre correctement les évolutions, il est essentiel de repérer des déformations spécifiques liées aux fréquences, une première méthode de perturbation a été proposée par Gudmundson[63], qui implique des modifications des fréquences propres d'une structure avec des fissures ou des modifications géométriques, on a utilisé cette méthode sur une poutre rectangulaire fissurée et ensuite on a comparé les résultats obtenus avec ceux d'autres auteurs.

Chapitre II : Etude théorique

Selon Mimovich[64], l'utilisation de fréquences naturelles peut être utilisé comme un indicateur de localisation d'endommagement.

Il a présenté un travail où il a utilisé une méthode des fréquences modèles afin de détecter de manière expérimentale les fissures dans des structures simples telles que les poutres on a démontré que les endommagements affectives directement la variation de fréquence et que à partir d'échantillons expérimentaux, on pouvait prédire les emplacements des endommagements avec une précision de 1%.

Selon Law et al[65] une méthode permet de mesurer les changements de rigidité structurelle et de position des défauts en se basant sur les variations mesurées des fréquences de résonance. Les éléments finis de la structure étaient utilisés dans la technique et la solution du problème d'identification nécessitant l'utilisation d'une méthode de programmation non linéaire, selon les auteurs, il était plus avantageux d'identifier les endommagements en incluant certaines parties de la structure dans la formation comme il n'y avait aucune information préalable sur les zones d'endommagement, il pourrait être difficile de déterminer les pièces à inclure.

D'après les résultats des expériences de vibration menées par Moradalizadah[66] et Salawu[38] sur des structures en béton, il a été constaté que la variation des fréquences varie en fonction de la localisation de l'endommagement.

Agardh[67] a observé sur une poutre en acier de 20m des endommagements qui ont entraîné une réduction significative environ 15% des fréquences propres.

Hearn et Testa[68] ont également prouvé que le rapport de variation des fréquences pour 2 modes est indépendant de l'ampleur des endommagements et donc de la localisation de la fissure, de cette manière, ce résultat permet de démontrer la localisation des endommagements cette propriété a été démontrée par Hasan[69], pour une poutre endommagée sur une fonction élastique.

Oseguedar [70] ses collègues démontrent que certaines fréquences de résonance diminuent en présence d'endommagement sur une plate-forme en mer et cette diminution était d'une grandeur supérieure à l'écart standard de la mesure selon ces auteurs, il est essentiel d'identifier correctement la déformation modale liée aux changements des fréquences de résonance afin de les distinguer correctement.

Selon Silva et Gomes [71], une autre technique proposée pour résoudre le problème de détection d'endommagement.

Cette technique exige un modèle analytique pour étudier la variation de fréquences en fonction de la taille et l'emplacement de l'endommagement ; le programme cherche des combinaisons finies de positions et de la taille d'endommagement et choisit la combinaison qui minimise la fonction coût définie dans leur article, il fait au moins 2 modes cette méthode et ils sont meilleurs si l'on en ajoute plus.

D'après Hassiotis et Jeong[72] une méthode permet d'identifier et localiser les réductions de la rigidité d'une structure en se basant uniquement sur des mesures de fréquence naturelle dans un problème d'optimisation la sensibilité des valeurs propres ont été utilisées afin de réduire les critères de modification de la rigidité des éléments et des résiduels, la formule générale suggérée étant pratique pour détecter les endommagements en utilisant un petit nombre de fréquences naturelles mesurées à partir d'une poutre en aluminium.

Plusieurs chercheurs ont essayé de déterminer et de localiser l'endommagement par la méthode vibratoire des fréquences propres. une révision littéraire a été faite sur cette catégorie a été faite par Salawu[38]. Le trait le plus attirant associé à l'utilisation des fréquences propre et que ces derniers sont relativement faciles à obtenir et à extraire. Et le résultat obtenu par les fréquences mène à l'exactitude.

Et d'autres chercheurs ont comparés les fréquences naturelles des structures saines et les fréquences des structures endommagées ainsi que la diminution des fréquences associée à ces deux structures. Et d'autres chercheurs comme Lee et al[50] et Sinou et al[73] ont proposé le pourcentage de variation de fréquences naturelles comme un indice pour la détection d'endommagement, pour pouvoir détecter la présence d'endommagement dans des structures saines, les fréquences propres doivent être soigneusement estimées pour pouvoir montrer avec exactitude la fiabilité des mesures que prévus, pour que les mesures de fréquences naturelles soient fiables le pourcentage doit être inférieur à 1% pour de petites fissures à des endroits spécifiques de la fissure, les incertitudes des fréquences naturelles au sein des structures saines peuvent cacher la faible quantité de variations de fréquences, et si la fissure se situe au près d'un nœud ses effets seront faibles.

Vestroni et Capecchi[74] ont défini l'endommagement comme une diminution variable de la rigidité. Ils se sont focalisés sur le principe fondamental du problème, en ce qui concerne exactement le nombre de fréquence nécessaire pour localiser et évaluer les dommages, ils ont utilisés deux méthodes, la première méthode s'est basée sur la méthode des éléments finis ce qui s'est évalué comme utile pour les structures trop complexes.

Dans ces dernières années, plusieurs chercheurs scientifiques ont convergés sur le développement de méthodes de localisation, indicateur des dommages en se basant sur les méthodes vibratoires. Kim et al[75] ont proposés une méthodologie pour détecter et quantifier de manière non destructive des dommages dans les structures en utilisant exclusivement certaines fréquences naturelles pour certains modes de vibration, ils ont d'abord pris une méthode basée sur fréquences naturelles pour la détection puis ils ont mis en œuvre un algorithme de localisation des dommages à partir des alternations de ces fréquences, ainsi ils se sont mis sur la méthode de détection des dommages basée sur les modes de vibration, ils ont testés les deux méthodes sur deux simulations numériques ou deux fréquences naturelles et modes étaient générées partir de modèle à élément finis. Les résultats ont montrés que les deux méthodes ont correctement identifiés les dommages mais celle basée sur les modes a présenté une précision supérieure dans cette identification des dommages.

2.4.1 Déformation modales

West[76] était le premier à localiser les endommagement sans recourir à un modèle éléments finis, au lieu de ça il a utilisé les déformation modales pour cette localisation, ainsi qu'il a utilisé les coefficients MAC pour déterminer la relation entre les déformation propres, sur les volets d'une navette spatiale avant est après subissions à un endommagement. Cette étude a mis en évidence l'utilisation des paramètres modaux pour la localisation ainsi que pour la détection des endommagements, pour renforcer les chercheurs à utiliser cette méthode de déformation modales à servir d'indicateurs d'endommagement, Plusieurs construction en états mis en œuvre est proposée[77].

Cette approche est souvent utilisée en conjonction pour l'analyse des fréquences propres, cette approche a attiré l'attention de beaucoup de chercheur spécialisé dans cette étude, Lorsqu'une structure subit un dommage, cela peut altérer sa raideur locale, provoquant ainsi des discontinuités dans le

Chapitre II : Etude théorique

milieu structural. La magnitude des changements observés dans les déformées propres dépend de la sévérité et l'emplacement des dommages.

De plus, ces changements diffèrent d'un mode à un autre, cette variation peut être utilisée comme un moyen de localisation des dommages potentiels, pour évaluer ces alternances, on utilise généralement le Modal Assurance Criterion (MAC) qui mesure le degré de corrélation entre deux modes, en utilisant une échelle qui varie entre 0 à 1, En résumé le MAC est un indicateur de présence de dommages dans des structures analysées.

Li et al [78], ont fait une étude sur des structures, cette étude a été basée sur la détection des dommages sur des structures en utilisant l'approche de déformation modales. Cette méthode repose sur l'analyse des déformations modales dans des plaques endommagées réalisée à partir de l'approche de Rayleigh-Ritz, suivie par l'obtention des données modales, en leur utilisation des résidus des modes de déformation, et en introduisant deux nouveaux paramètres sensibles pour localiser l'endroit exact où se situent les dommages ainsi qu'il est utilisé des indices correspondants. Ces paramètres sont considérés comme simples, intuitifs et pratiques par rapport aux indicateurs traditionnels, plusieurs tests numériques et expérimentaux ont été menés, démontrant la cohérence des résultats et la capacité robuste des indicateurs proposés à détecter les dommages avec précision.

En étudiant les variations des fréquences, Biswas et al [79] ont relevé une sensibilité importante des déformations modales en présence des dommages. Les études de Salane et Baldwin [80] Mazurek et Dewolf [81], ont abouti à des conclusions similaires. Alampali et al [82] mentionnent des situations où les variations fréquentielles sont plus sensibles que les variations des déformations propres. Il est important de ne pas négliger un aspect pratique, repérer les déformations propres est plus difficile que les fréquences, mais que les capteurs sont importants afin de garantir un maillage fin de la structure et l'identification de la déformation propre. Les mesures de vibration de torsion d'une poutre de section transversale rectangulaire avec une fissure transversale extérieure qui se prolonge uniquement le long de la largeur de la poutre ont été utilisées par Rizos et al [83] pour établir une corrélation entre les modes mesurés des vibrations et la localisation et la profondeur de la fissures. On peut utiliser cette méthode pour détecter les fissures dans des structures en étudiant leurs caractéristiques modales. Il s'agit d'une méthode non destructive pour détecter les fissures et elle est utilisable pour les structures dont une analyse suivante, elle, nécessite des mesures d'amplitude. Seulement dans deux positions elle nécessite des efforts informatiques, elle est précise et facile à utiliser. D'après Fox [84] a comparé quelques méthodes pour détecter et localiser les dommages. Les fréquences propres et les données de la déformation d'une poutre libre sont utilisées. Les résultats ont démontré que chacune des fréquences a subi un impact différent, il est essentiel d'utiliser cette information extraite des fréquences en même temps que l'information extraite des déformations propres, lorsque les emplacements des défauts étaient impossibles à trouver. L'auteur a traité l'information de la déformée différemment. La méthode la plus efficace pour localiser le lieu de l'endommagement est de comparer graphiquement le chargement relatif de la déformation lorsque seule la fréquence de résonance et les déformées ont été examinées.

Salawu et Williams [85] ont comparé les résultats d'utilisation de la variation relative de la déformée modales et de la variation de courbe de la déformée modale, afin de détecter l'endommagement. Ils montrent qu'en utilisant des déformées expérimentales, la différence relative de mesure n'est pas souvent une indication des données expérimentales, la différence relative de mesure n'est pas souvent une

indication précise des dommages, ils ont mis en évidence que le principe facteur est le choix des modes utilisées dans l'analyse. Les auteurs démontrent que les valeurs du MAC peuvent servir à identifier les modes touchés par l'endommagement. Selon Lam et al [86], une déformation nodale normalisée est définie comme une signature d'endommagement qui se manifeste par une variation de la fréquence normale d'un autre mode. La taille de fissure n'est pas déterminée par la signature d'endommagement mais par son endroit. Un ensemble de signature est calculé analytiquement en prenant en considération tous les états possibles d'endommagement, on a comparé les signatures mesurées à un état d'endommagement en choisissant des signatures analytiques qui donnent des meilleurs résultats par rapport aux mesures du MAC.

Les méthodes des mesures des déformations modales posent plusieurs inconvénients. Premièrement les grandes structures leurs tâches d'identification d'une déformation significative, n'est pas facile, le choix de position des capteurs nécessaire pour une identification efficace d'endommagement. Une autre inquiétude réside dans le fait que les dommages sont localisés et ne peuvent pas avoir un impact significatif sur les déformations modales des modes inférieurs, qui sont généralement mesurés par des essais aux chocs de grande structure. Les déformations extraites ont été impactées par le bruit de l'endommagement provenant de diverses sources telles que les charges ambiantes ou les emplacements des capteurs contradictoires. Il y a des situations où l'utilisation directe des paramètres modaux n'affecte pas les endommagements locaux. Les chercheurs ont fait des efforts importants pour trouver des indicateurs alternatifs pour repérer les endommagements. Quelques essais avec des informations provenant des paramètres modaux, comme la courbe et l'énergie modale des déformations.

2.5 Modélisation d'une structure fissurée

2.5.1 Les modèles des éléments poutres endommagées

Selon plusieurs auteurs il existe plusieurs modèles d'une poutre endommagée en fonction de la méthode de détection d'une fissure au sein d'une poutre. Ces diverses méthodes ont donné naissance à cinq principaux modèles d'une poutre endommagée qui sont

- Modèle de J.K.Sinha et al[43]
- Modèle de la réduction de E (module de Young) d'un élément poutre[51].
- Modèle de S.A.Paipitis et A.D.Dimarogonas[51]
- Modèle de M.H.F.Dado et al[87]
- Modèle d'Ostachowicz et Krawkczuk[88]

Dans ce chapitre nous présenterons les trois premiers modèles pour détecter les éléments fissurés qui est basée sur la réduction de rigidité E d'un élément finis.

2.5.1.1 Le modèle de J.K. Sinha et al

La lecture de l'ouvrage de Sinha et al[43] nous montre que ces auteurs ont cherché à modéliser la fissure située au sein de la poutre à travers la variation linéaire de la rigidité en flexion. Puis, ils ont calculé la matrice de rigidité d'un élément poutre fissurée en utilisant la matrice de rigidité de l'élément poutre sain et la matrice de rigidité endommagée due à la fissure.

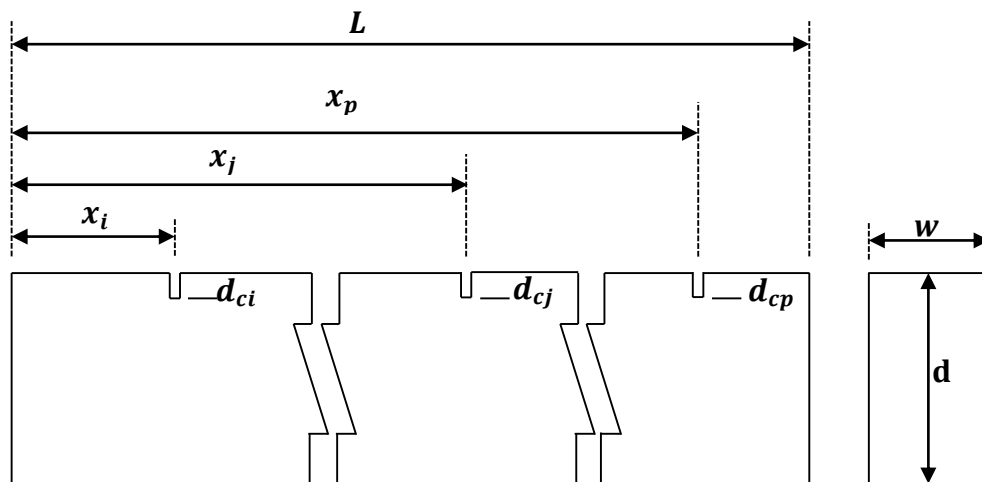


Figure 3. Modèle de poutre à plusieurs fissures

Avec :

- d_{c1} , d_{cj} et d_{cp} : La profondeur des fissures ;
- x_i , x_p et x_j : la longueur des fissures respectivement ;
- L : la longueur de la poutre ;
- w : la largeur de la poutre

2.5.1.1.1 La modélisation de la fissure

Lors de la présentation d'une fissure dans une poutre, elle cause des changements au bord de la fissure comme la flexibilité locale, le mécanisme précise par lequel se présente et complexe, en évaluer que la variation de la flexibilité est locale dans la réalité la poutre sera modifier au bord de la l'axe de la fissure, mais c'est modification ne sont pas prise en compte dans cette analyse.

Selon Christide et Barr[47], ont considéré l'effet d'une fissure dans une poutre continue à section droite rectangulaire et ont déterminé la rigidité en flexion (EI) qui varie exponentiellement allant de la section droite non endommager à celle endommager.

$$EI(x) = \frac{EI}{1 + Ce^{\left(\frac{-2a|x-x_j|}{h}\right)}} \quad (62)$$

Chapitre II : Etude théorique

Avec :

$$C = \frac{(I - I_{cj})}{I_{cj}}, I = \frac{bh^3}{12} \text{ et } I_{cj} = \frac{b(h - a_j)^3}{12} \quad (63)$$

Respectivement, le moment quadratique des zone non fissurées et celui au niveau de la $i^{\text{ème}}$ fissure ;

b, h : la largeur et la hauteur de la poutre ;

x : la position d'un point le long de la poutre ;

x_j : La position de la $i^{\text{ème}}$ fissure ;

α : La longueur transversale de la fissure ;

L'inclusion de la diminution de la rigidité de Christide et Barr[47], dans un modèle élément poutre est compliquée, car la flexibilité ne se limite pas à un ou deux élément, cela inclue l'intégration numérique pour crée la matrice de rigidité dans la poutre et cela inclue le changement de positons de la fissure.

Christide et Barr, J.K.Sinha et Al[43, 47], utilise la forme simplifiée ou la variation de la rigidité en flexion (EI) est linéaire allant de la position de la pointe de la fissure entièrement ouverte vers les deux côtés de la longueur effective l_c ou commence la réduction de la rigidité.

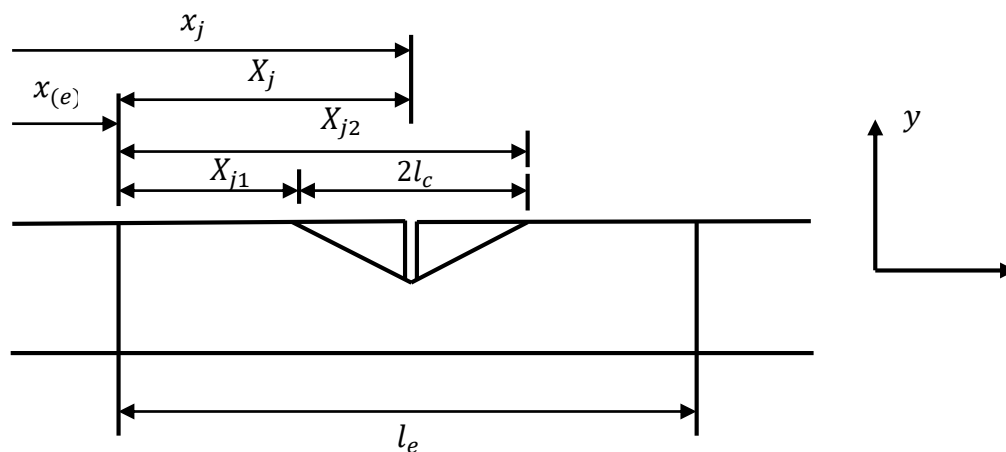


Figure 4. Variation linéaire de la rigidité en flexion (EI) d'aspect triangulaire utilisée par J. K. Sinha et

La rigidité en flexion s'écrit

$$EI_e(x) = \begin{cases} EI - E(I - I_{cj}) \frac{(X - X_{j1})}{(X_j - X_{j1})} \text{ si } X_{j1} \leq X \leq X_j \\ EI_0 - E(I - I_{cj}) \frac{(X_{j2} - X)}{(X_{j2} - X_j)} \text{ si } X_j \leq X \leq X_{j2} \end{cases} \quad (64)$$

avec :

$$X_{j1} = X_j - l_c \quad (65)$$

$$X_{j2} = X_j + l_c \quad (66)$$

D'où :

X : La position d'un point appartenant à la zone où la rigidité est réduite $X_{j1} \leq X \leq X_{j2}$

X_j : La position locale de la $j^{\text{ème}}$ éléments ;

X_{j1} Et X_{j2} : Les positions de chaque coté de la fissure où commence la réduction de la rigidité.

2.5.1.1.2 Détermination de la longueur effective l_c

Pour déterminer la longueur effective, il suffit de rendre l'intégrale de la réduction de la rigidité dans les équations (0.8) et (0.9)

De l'équation (0.8) :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} (EI - EI(x)) dx = EI \frac{h}{\alpha} \log(1 + C) \approx EI \frac{hC}{\alpha} \quad (67)$$

De l'équation (0.9) :

$$\int_{x_{j1}}^{x_{j2}} (EI - EI_e(x)) dX = EI \cdot l_c \frac{c}{1+c} \approx EI l_c C \quad (68)$$

Donc l'approximation de la longueur effective l_c est donné par :

$$l_c = \frac{h}{\alpha} = 1.5h \quad (69)$$

Chapitre II : Etude théorique

On conclut que la profondeur de la fissure n'est rattachée à la longueur effective de la réduction de la rigidité

Une poutre endommagée qui opère exclusivement sur la flexion simple dans un seul plan, Est modélisée selon la théorie de d'Euler-Bernoulli. Chaque nœud de l'élément poutre possède deux degré de liberté, et cela s'opère selon son déplacement en translation et la rotation en flexion, on considère une $j^{\text{ème}}$ fissure située à une position x_j dans le $e^{\text{ème}}$ élément de la poutre, lorsque une fissure localiser a une position spécifique dans l'élément poutre la réduction de la rigidité n'affecte qu'un seul élément, si la réduction de la rigidité s'étend sur plusieurs éléments cette approche peut être facilement étendue à l'ensemble des éléments, la matrice de rigidité de l'élément poutre fissuré et définie selon cette matrice suivante :

$$[k_e^f] = [k_e] - [k_{cj}] \quad (70)$$

Avec :

$[k_e]$: La matrice de rigidité de l' $e^{\text{ème}}$ élément sain $[k_{cj}]$;

$[k_{cj}]$: La réduction de la matrice de rigidité due a la $j^{\text{ème}}$ fissure

Par l'intégration habituelle basée sur la variation de la rigidité en flexion on obtient :

$$[K_e^f] = \int_0^{l_e} E I_e(X) \{N''(X)\}^T \{N''(X)\} dX \quad (71)$$

D'où :

$$\{N''(X)\} = \left\{ 1 - \frac{3X^2}{l_e^2} + \frac{2X^3}{l_e^3} \quad X - \frac{2X^2}{l_e} + \frac{X^3}{l_e^2} \quad \frac{3X^2}{l_e^2} - \frac{2X^3}{l_e^3} \quad -\frac{X^2}{l_e} + \frac{X^3}{l_e^2} \right\}^T \quad (72)$$

Avec :

l_e : La longueur d' $e^{\text{ème}}$ élément

En utilisant les équations (6) (7) (13) (14) la matrice de rigidité $[K_{cj}]$ pour une poutre qui travaille en flexion seule est donnée comme suit :

$$[K_{cj}] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & -k_{11} & k_{14} \\ k_{12} & k_{22} & -k_{12} & k_{24} \\ -k_{11} & -k_{12} & k_{11} & -k_{14} \\ k_{14} & k_{24} & -k_{14} & k_{44} \end{bmatrix} \quad (73)$$

Avec :

$$[K_{cj}] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & -k_{11} & k_{14} \\ k_{12} & k_{22} & -k_{12} & k_{24} \\ -k_{11} & -k_{12} & k_{11} & -k_{14} \\ k_{14} & k_{24} & -k_{14} & k_{44} \end{bmatrix} \quad (74)$$

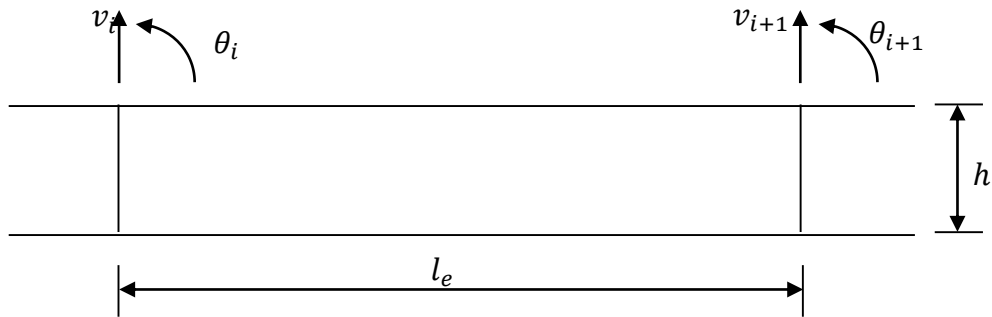
$$k_{11} = \frac{12(I-I_{cj})}{l_e^4} \left[\frac{2l_c^3}{l_e} + 3l_c \left(\frac{2X_j}{l_e} - 1 \right)^2 \right] \quad k_{12} = \frac{12(I-I_{cj})}{l_e^3} \left[\frac{l_c^3}{l_e} + l_c \left(2 - \frac{7X_j}{l_e} + \frac{6X_j^2}{l_e^2} \right) \right]$$

$$k_{14} = \frac{12(I-I_{cj})}{l_e^3} \left[\frac{l_c^3}{l_e} + l_c \left(1 - \frac{5X_j}{l_e} + \frac{6X_j^2}{l_e^2} \right) \right] \quad k_{22} = \frac{12(I-I_{cj})}{l_e^2} \left[\frac{3l_c^3}{l_e} + 2l_c \left(\frac{2X_j}{l_e} - 2 \right)^2 \right]$$

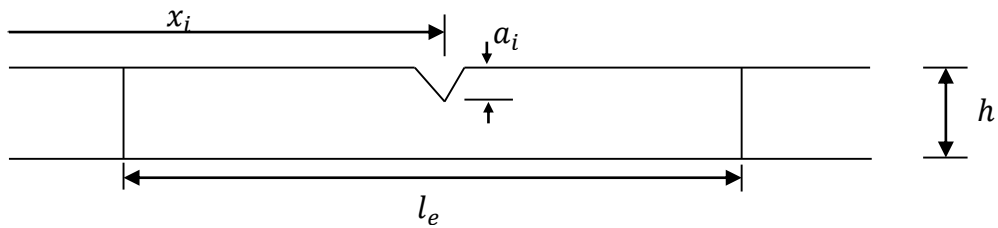
$$k_{24} = \frac{12(I-I_{cj})}{l_e^2} \left[\frac{3l_c^3}{l_e} + 2l_c \left(2 - \frac{9X_j}{l_e} + \frac{9X_j^2}{l_e^2} \right) \right] \quad k_{44} = \frac{12(I-I_{cj})}{l_e^2} \left[\frac{3l_c^3}{l_e} + 2l_c \left(\frac{3X_j}{l_e} - 1 \right)^2 \right]$$

2.5.2 Modèle de A.D.Dimarogonas et S.A.Paipitis

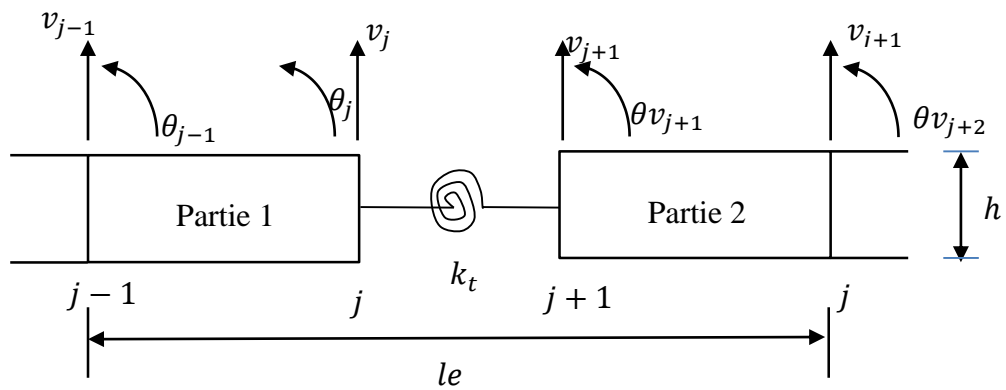
A.D.Dimarogonas et S.A.Paipitis[51], ont déterminé la variable du ressort rotatif de torsion d'une poutre a section droite rectangulaire en se basant sur le taux de récupération de l'énergie de déformation.



(a) Déplacements nodaux d'un élément poutre non endommagé.



(b) caractéristique géométrique de la fissure et de l'élément poutre.



(c) Déplacements nodaux des deux parties non endommagées I et II.

Figure 5• Modèle poutre endommagée proposé par Dimarogonas et Paipitis.

Avec :

Les différents vecteurs de déplacement sont donnés comme suit :

$$\{v_e\}^T = \{v_i, \theta_i, v_{i+1}, \theta_{i+1}\} \text{ vecteur déplacement de l'élément poutre non endommagé} \quad (75)$$

$$\{v_e\}_I^T = \{v_{j-1}, \theta_{j-1}, v_j, \theta_j\} \text{ vecteur déplacement de la partie I} \quad (76)$$

$$\{v_e\}_{II}^T = \{v_{j+1}, \theta_{j+1}, v_{j+2}, \theta_{j+2}\} \text{ vecteur déplacement de la partie II} \quad (77)$$

Voici l'expression matricielle du problème pour l'une des deux parties saines de l'élément poutre :

$$[M_e][\ddot{v}_e] + [K_e][v_e] = \{F_e\} \quad (78)$$

Avec :

$\{F_e\}$: Vecteur de force nodale.

v_e : Vecteur de déplacement de l'élément poutre qui est donnée en équation

La matrice élémentaire de rigidité est donnée comme suit :

$$[K_e] = \frac{EI_z}{l_e^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_e & -12 & 6l_e \\ 6l_e & 4l_e^2 & -6l_e & 2l_e^2 \\ 12 & -6l_e & 12 & -6l_e \\ 6l_e & 2l_e^2 & -6l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix} \quad (79)$$

Chapitre II : Etude théorique

La matrice élémentaire de masse est donnée comme suit :

$$[M_e] = \frac{\rho l_e}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l_e & 54 & -13l_e \\ 22l_e & 4l_e^2 & 13l_e & -3l_e^2 \\ 54 & 13l_e & 156 & -22l_e \\ -13l_e & -3l_e^2 & -22l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix} \quad (80)$$

Lorsque le ressort rotatif qui n'a pas de masse relie deux nœuds adjacents, les déplacements de ces deux nœuds sont identiques.

Cependant, les rotations des deux nœuds sont quant à elles distincte et couplé par la matrice de rigidité de la partie fissurée au niveau de l'endommagement, cette matrice est donnée comme suit :

$$[K_f] = \begin{bmatrix} k_t & -k_t \\ -k_t & k_t \end{bmatrix} \quad (81)$$

Avec :

$$k_t = \frac{EI}{5.346hF_2(\bar{a})} \quad (82)$$

D'où :

k_t : La constante de torsion de la section endommagée

$$F_2(\bar{a}) = 1.8624\bar{a}^2 - 3.95\bar{a}^3 + 16.375\bar{a}^4 - 37.226\bar{a}^5 + 76.81\bar{a}^6 - 126.9\bar{a}^7 + 172\bar{a}^8 - 143.97\bar{a}^9 + 66.56\bar{a}^{10}$$

Après l'assemblage des matrices $[K_e]$, $[M_e]$, $[K_f]$ on obtient la matrice de rigidité $[K]$ et de masse $[M]$.

Ainsi l'équation du mouvement de la structure poutre qui est du deuxième degré est donnée comme suit :

$$[M]\{\ddot{V}\} + [K]\{V\} = \{F_{(t)}\} \quad (83)$$

Avec :

$\{F_{(t)}\}$: Le vecteur de force nodale global

Donc, finalement la matrice de rigidité pour parti endommagée qui est comme suis :

$$[K_e] = \frac{EI_Z}{l_e^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_e & -12 & 6l_e \\ 6l_e & 4l_e^2 + k_t & -6l_e & 2l_e^2 - k_t \\ 12 & -6l_e & 12 & -6l_e \\ 6l_e & 2l_e^2 - k_t & -6l_e & 4l_e^2 + k_t \end{bmatrix} \quad (84)$$

2.5.3 Model de réduction de la raideur E

Lorsqu'une poutre endommagée, la matrice de rigidité globale [K] de la structure non endommagée est différente, soit $[K_e^f]_j$ la matrice de rigidité élémentaire de l'élément fissuré.

Une approche simple pour prendre en compte la fissuration qui consiste de réduire le module de Young E d'un élément non fissuré.

$$[K_e^f]_j = ((1 - \bar{\alpha})E) * [K_e]_j \quad (85)$$

Avec :

$\bar{\alpha} = \frac{a}{h}$: La profondeur normalisée de la fissure

$[K_e^f]_j$: C'est la matrice élémentaire de la partie saine

La matrice élémentaire de la partie saine est donnée comme suit :

$$[K_e^f]_j = K_e = \begin{bmatrix} \frac{12I}{l_e^3} & \frac{6I}{l_e^2} & -\frac{12I}{l_e^3} & \frac{6I}{l_e^2} \\ \frac{6I}{l_e^2} & \frac{4I}{l_e} & -\frac{6I}{l_e^2} & \frac{2I}{l_e} \\ -\frac{12I}{l_e^3} & -\frac{6I}{l_e^2} & \frac{12I}{l_e^3} & -\frac{6I}{l_e^2} \\ \frac{6I}{l_e^2} & \frac{2I}{l_e} & -\frac{6I}{l_e^2} & \frac{4I}{l_e} \end{bmatrix} \quad (86)$$

Avec :

I : Moment d'inertie de la section droite de la poutre.

La matrice de rigidité élémentaire de la fissurée est donnée par :

$$[K_e^{endo}] = \alpha [K_e] \quad (87)$$

Avec :

α : Le facteur de rigidité en pourcentage(%) .

2.6 Utilisation des modèles d'endommagement

2.6.1 Utilisation du modèle J.K.Sinha

Selon MM.Alamdari[89], Le dommage dans la poutre est modélisé en utilisant une approche simplifiée de fissuration proposée par JK Sinha et al[43]. Ce modèle consiste à réduire localement la rigidité en flexion de la poutre sur une longueur de 1.5 fois la hauteur de la section, de part et d'autre de l'emplacement de la fissure.

La réduction maximale de la rigidité se produit directement à l'endroit de la fissure.

Chapitre II : Etude théorique

L'équation mathématique qui décrit la variation de rigidité en flexion $EI(\xi)$, le long de la poutre en fonction de la position relative ξ par rapport à la fissure[43], Cette expression permet de représenter la diminution locale de la rigidité due à la présence de la fissure.

Ce modèle simplifié de fissuration offre une manière efficace de simuler l'endommagement de la poutre dans le cadre de l'analyse par élément finis, en modifiant les propriétés des éléments concernés par la fissure

L'équation mathématique est comme suit :

$$EI_e(\xi) = \begin{cases} EI_0 - E(I_0 - I_c) \frac{\xi - \xi_1}{\xi_c - \xi_1} & \xi_1 \leq \xi \leq \xi_c \\ EI_0 - E(I_0 - I_c) \frac{\xi_2 - \xi_1}{\xi_2 - \xi_c} & \xi_c \leq \xi \leq \xi_2 \end{cases} \quad (88)$$

[90], Parmi les différentes approche simplifiées de modélisation des fissure dans les poutres, l'étude de Sinha et al[43], Se distingue par l'utilisation d'une fente de forme triangulaire pour représenter la fissure. La diminution du moment d'inertie de la section fissurée a été mesurée dans le cas de la fente triangulaire. Cette mesure expérimentale de la réduction du moment d'inertie local permet de capturer simplement l'effet de la fissure sur la rigidité de la poutre.

La formule est écrite comme suit :

$$f(x, y) = \left[y - \frac{I}{I_c} y_H \left(\frac{h}{2} - a - |y| \right) \right] e^{\left[-\frac{2\alpha|x-L_c|}{h} \right]} \quad (89)$$

Dans ce modèle, E représente le module de Young de la poutre, I_0 le moment d'inertie de la section non endommagée, ξ la coordonnée spatiale et ξ_c l'emplacement de la fissure le long de la poutre. Les positions ξ_1 et ξ_2 correspondant aux points sur les côtés gauche et droit de la fissure ou débute la réduction de rigidité.

Le moment d'inertie réduit I_c dû a la présence de la fissure est donnée par l'équation

$$I_c = (b(h - a)/12) \quad (90)$$

2.6.2 Utilisation de S.A.Paipetis A.D.Dimarogonas

L'étude des fissures et de l'endommagement structurel est un sujet de recherche capital dans le domaine de l'ingénierie des structures. Dimarogonas et Paipetis [91] ont proposé une approche théorique avancée pour caractériser la constante de ressort de torsion k_t au voisinage d'une section fissure d'une poutre présenter une fissure latérale de profondeur uniforme. Leur modèle s'appuie sur l'exploitation de la fonction d'énergie de fissure qui dépend de plusieurs paramètres clés : le module d'élasticité E , le moment d'inertie I , la profondeur de fissure a , la hauteur de la poutre h , la conformité locale adimensionnelle $f(a/h)$. Cette approche permet d'évaluer de manière précise les propriétés mécaniques d'une structure fissurée au niveau de la section endommagée.

Par ailleurs, de nombreuses études ont montré que la présence d'une fissure ou d'un endommagement dans une structure a un impact significatif sur ses caractéristiques dynamiques. Comme l'ont souligné Adams et al[92], la rigidité de la structure diminue tandis que son amortissement augmente lorsqu'elle est fissurée. Ces modifications des propriétés mécaniques se répercutent directement sur les fréquences naturelles de la structure, ouvrant ainsi la voie à des techniques de détection des dommages basées sur l'analyse des vibrations de fréquence, communément appelées FBDD (frequency- Based damage detection).

De nombreux chercheurs ont exploré l'approche du ressort rotatif pour établir des relations quantitatives entre la rigidité du ressort K_t , la localisation de la fissure et les fréquences naturelles de modes spécifiques de la structure. Parmi, on peut citer les travaux de Chondros et Dimarogonas[93] ainsi que ceux de Liang et al [94, 95]. Ces études fournissant les outils théoriques et analytiques permettant de relier les propriétés mécaniques fissurées à ses caractéristiques dynamiques. Elles constituent une base solide pour le développement de la technique avancée de surveillance et du diagnostic des dommages structuraux, basée sur l'analyse des fréquences naturelles. a

$$f\left(\frac{a}{h}\right) = 1.8624\left(\frac{a}{h}\right)^2 - 3.95\left(\frac{a}{h}\right)^3 + 16.375\left(\frac{a}{h}\right)^4 - 37.226\left(\frac{a}{h}\right)^5 + 76.81\left(\frac{a}{h}\right)^6 - 126.9\left(\frac{a}{h}\right)^7 + 172\left(\frac{a}{h}\right)^8 - 143.97\left(\frac{a}{h}\right)^9 + 66.56\left(\frac{a}{h}\right)^{10} \quad (91)$$

Selon P.F.Rizos et N.Aspragathos[83], pour un chargement général, une matrice de flexibilité locale relie les déplacements aux forces. Dans cette analyse, puisque seules la vibration de flexion sont considérées, la complaisance de rotation de la fissure est supposée être dominante dans la matrice de flexibilité locale.

Dimarogonas et Paipetis[51], ont calculée la constante de raideur du ressort de flexion K_t au voisinage de la section fissurée d'une poutre de section transversale orthogonale de la largeur b et de la hauteur h , lorsqu'une fissure latérale de profondeur uniforme a existait, à partir de la fonction d'énergie de déformation de la fissure.

La raideur du ressort de flexion K_t s'exprime comme suit :

$$K_t = \frac{1}{c} \quad (92)$$

Avec :

$$c = \left(\frac{5.346h}{EI}\right)I\left(\frac{a}{h}\right) \quad (93)$$

Où c est la conformité, E est le module de Young du matériau de la poutre, I est le moment d'inertie de la section transversale de la poutre et la conformité locale sans dimension.

Moment d'inertie de la section transversale de la poutre et la fonction de conformité locale sans dimension $I(a/h)$ est calculé à partir de la fonction de densité de l'énergie de déformation $J(a/h)$

$$I\left(\frac{a}{h}\right) = 1.86245\left(\frac{a}{h}\right)^2 - 3.95\left(\frac{a}{h}\right)^3 + 16.375\left(\frac{a}{h}\right)^4 - 37.226\left(\frac{a}{h}\right)^5 + 76.81\left(\frac{a}{h}\right)^6 - 126.9\left(\frac{a}{h}\right)^7 + 172\left(\frac{a}{h}\right)^8 - 143.97\left(\frac{a}{h}\right)^9 + 66.56\left(\frac{a}{h}\right)^{10} \quad (94)$$

Dimarogonas et Paipetis[51], ont modélisé une fissure comme une flexibilité locale par l'approche des méthodes de la mécanique des fractures. Ils ont développé une méthode spectrale.

Méthode spectrale pour identifier les fissures et relier la profondeur de la fissure à la modification des fréquences naturelles. Changement des fréquences naturelles. En utilisant la méthode de l'énergie avec la théorie de la poutre fissurée continue, Chondros et Dimarogonas [] ont étudié les vibrations transversales des poutres fissurées.

Le paramètre J est calculé comme suit :

$$J = 1.86245\left(\frac{d_c}{h}\right)^2 - 3.95\left(\frac{d_c}{h}\right)^3 + 16.375\left(\frac{d_c}{h}\right)^4 - 37.226\left(\frac{d_c}{h}\right)^5 + 76.81\left(\frac{d_c}{h}\right)^6 - 126.9\left(\frac{d_c}{h}\right)^7 + 172\left(\frac{d_c}{h}\right)^8 - 143.97\left(\frac{d_c}{h}\right)^9 + 66.56\left(\frac{d_c}{h}\right)^{10} \quad (95)$$

2.6.3 Utilisation de la réduction de rigidité E

2.6.3.1 Teste numérique

A titre de vérification[96], la robustesse de l'indicateur proposée e été testée sur les structure composite plus complexes, notamment une poutre et une plaque en composite stratifié a plis croisée [0° 90° 0°]. Dans ces simulations numériques, les éléments endommagées sont représentée par une réduction locale de la rigidité du matériau, comme l'illustre l'équation suivante :

$$K_e^d = (1 - \alpha)K_e^e \quad (96)$$

Selon[97] l'indice d'endommagement du $j^{ème}$ élément est ici exprimé comme le changement local de la rigidité de cet élément. Plus précisément, l'indice d'endommagement est défini comme la variation relative de l'élément endommagée par rapport à sa valeur initiale.

$$\alpha_j[k]_j^e = ([k]_j^e - [k]_{aj}^e) \quad (97)$$

2.7 Détection d'endommagement par la méthode vibratoire

2.7.1 Méthode de l'énergie de déformation modale

LUKE.S.LEE et al[98], « déformation modal (2000, 1998, 1998) la déformation nodale proposent une méthode de déformation nodale pour détecter les fissure au niveau des éléments avec une attention particulière pour les données nodale mesuré incomplète et bruyantes, trois étapes sont appliqué dans l'approche :

- 1- expansion des données modales mesurées pour estimer les paramètres nodaux a des paramètres a des degrés de liberté non connue

Chapitre II : Etude théorique

- 2- la localisation du domaine du dommage en utilisant la différence quotient d'énergie élémentaire pour identifier un groupe d'éléments formant un domaine de dommage possible.
- 3- Quantification des dommages basée sur la sensibilité de la fréquence nodale.

On combinant les trois composantes :

-Les données modales mesurées « doivent être étendues pour correspondre au modèle d'éléments finis »

-L'énergie de déformation nodale de chaque élément normalisées « pour localiser le domaine du dommage»

- Les changements nodaux des fréquences nodales mesurées « pour déterminer l'ampleur des dommages »

Les fissures sont supposées affecter à la matrice de rigidité, c'est- à-dire que les dommages dans une structure entraînent la réduction d'un paramètre de conception, telle que le module de Young ou l'aire de section d'un élément.

La détection des dommages et la localisation de la structure sont développées en partant de l'hypothèse que les dommages à la structure entraînent des petits changements dans fréquences nodales et dans les modes».

Les modes propres représentent les déplacements nodaux de la structure en vibration, par cella l'énergie de déformation stockée dans les éléments associés à ces déplacements peuvent être définie comme suite

$$MSE_j^i = \frac{1}{2} \varphi_j^{iT} K^i \varphi_j^i \quad (98)$$

Avec :

Q_j^i : Le vecteur de déplacement nodale qui correspond l' $i^{ème}$ mode de vibration du $i^{ème}$ élément

La somme des énergies de déformation modale des éléments donne l'énergie de déformation modale totale de mode j qui est comme suite :

$$MSE_j = \sum_{i=1}^{Ne} MSE_j^i \quad (99)$$

Par la normalisation de de l'énergie de déformation modale (**MSE**) des éléments par rapport à la **MSE** totale on obtient :

$$NnMSE_j^i = \frac{MSE_j^i}{MSE_j} \quad (100)$$

La moyenne des valeurs normalisées sur les m premier mode de vibration peut être utilisée comme une variation efficace pour détecter les endommagements de la structure :

$$mnMSE^i = \frac{\sum_{m=1}^i mnMSE_j^i}{m} \quad (101)$$

avec :

m: les pulsation propres du système.

L'apparition d'un dommage dans un élément structurelle entraine une réduction de sa rigidité et les déplacements modaux correspondants sont censés augmenter, par contre la $mnMSE$ définie si dessus augmente par rapport à l'état sain, et ceci peut être utilisé comme une moyenne d'identification des éléments endommagés.

En définissant l'indice suivant basé sur l'énergie de déformation nodale (**MSEBI**) qui est comme suite :

$$MSEBI^i = \max \left[0, \frac{(mnMSE^i)^d (mnMSE^i)^h}{(mnMSE^i)^h} \right] \quad (102)$$

avec :

d: structure endommagé.

h: structure saine

Les valeurs de l'indice ci-dessus sont positives pour l'élément potentiellement endommagés et nulles pour les éléments saines. Cette hypothèse soit généralement valide, nous supposant dans la section suivante qu'elle peut poser des problèmes lorsque l'étendue des fissures varie considérablement entre les éléments. Alors dans ce cas les valeurs de MSE pour les éléments fissurés peuvent être négatifs.

2.7.2 Détection d'endommagement structurel basée sur l'énergie de déformation modale

Dans ce sou titre nous présentent une approche de détection des fissure structurels base sur l'énergie de déformation modale qui utilise les données d'énergie de déformation modale des éléments de la structure qui guide le processus de recherche.

La première étape de cette méthode, nous déterminant les valeurs moyenne de l'énergie de contrainte modale normalisé pour les éléments saines et endommagées à la fois, la relation de l'indice MSEBI pour chaque éléments i est comme suit :

$$MSEBI^i = \frac{(mnMSE^i) - (mnMSE^i)^h}{(mnMSE^i)^h} \quad (103)$$

D'après Seyedpoor[99], Lorsque les fissures sont similaires entre les éléments d'une structure, la majorité des éléments fissurés présentent des résultats supérieurs à zéro de l'indice MSEBI. Cela permet de régler le souci des d'optimisation en suspendre les éléments avec des valeurs inférieurs a MSEBI. Néanmoins, dès que les fissures varient considérablement entre les éléments de la structure,

il est possible de voir des résultats négatives de MSEBI pour certains éléments fissurés. Dans ce cas, on suppose que les éléments fissurés font une partie des résultats positifs de MSEBI, les éléments qui a des valeurs positives sont considérés comme des éléments saines ou légèrement endommagés. L'inclusion de ces éléments dans le processus d'optimisation se fait avec une probabilité, pour que la contribution ne soit pas négligeable.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisé sur la présentation de la méthode de détection d'endommagements par la méthode de déformation énergétique. Ainsi nous avons utilisé diverses approches de détection d'endommagements de J.K.Sinha et Dimarogonas et Paipetis qui consiste à réduire la rigidité E , ensuite nous avons présenté les différents modèles qui ont été déjà présentés précédemment entre (2012-2024).

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter les différents essais et les résultats des trois modèles étudiés précédemment sur les trois différentes poutres.

Chapitre III : Applications Numériques

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons appliquer les différents problèmes abordés dans le chapitre précédent. Nous allons valider le programme de notre modélisation par élément finis de la structure poutre saine, en comparant nos résultats à la littérature. Puis, nous allons faire une étude comparative des trois modèles de poutres endommagées en comparant les fréquences naturelles de ces modèles à ceux issues de l'expérimentale. Ensuite, nous allons faire une étude comparative de ces modèles endommagés en leurs appliquant la méthode d'identification d'endommagement.

3.2 Validation et Modélisation par éléments finis de la poutre sans endommagement

Pour bien valider nos modélisations qui sont présentées précédemment par éléments finis, nous distinguons trois poutres issues des articles [29] et [51] dont leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant. Pour cela, nous allons comparer les fréquences propres obtenues par nos modélisations à celles calculées dans la littérature [50] et [51]. Les résultats de la comparaison sont présentés dans les tableaux N° 4,5 et 6.

Les conditions des bords de ces poutres étudiées sont différentes, elles sont simplement appuyées, encadrées sur les deux côtés et flexibles-libres

3.2.1 Poutre encadrée-encadrée :

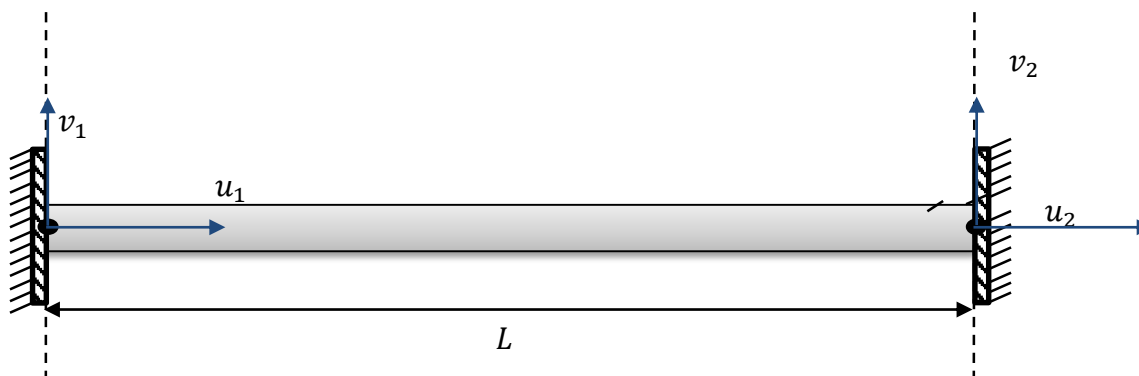


Figure 6- Poutre encadrée-encadrée

Tableau 1: propriétés géométriques de la poutre encadrée-encadrée en aluminium

Conditions aux limites	Encadrée-Encadrée		
Matériaux	Aluminium	Longueur L	1832 mm
Module de Young	69,79 GN/m ²	La largeur b	50 mm
Densité volumique ρ	2600 Kg/m ³	La hauteur h	25 mm
Coefficient de poisson	0,33		

3.2.2 Poutre flexible-libre :

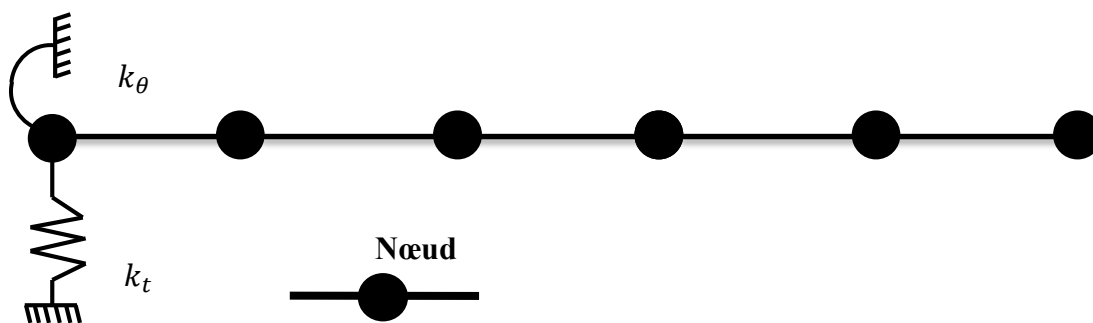


Figure 7- Poutre flexible-libre à 6 nœuds

Tableau 2 propriétés géométriques de la poutre flexible-libre en aluminium

Conditions aux limites	Flexible-libre
Matériaux	Aluminium
Module de Young	69,79 GN/m ²
Densité volumique ρ	2600 Kg/m ³
Coefficient de poisson	0,33
Longueur L	996 mm
La largeur b	50 mm
La hauteur h	25 mm
Raideur aux limites	K t=26,5 MN/m K $_{\theta}$ =150 KNm/rad

3.2.3 Poutre simple

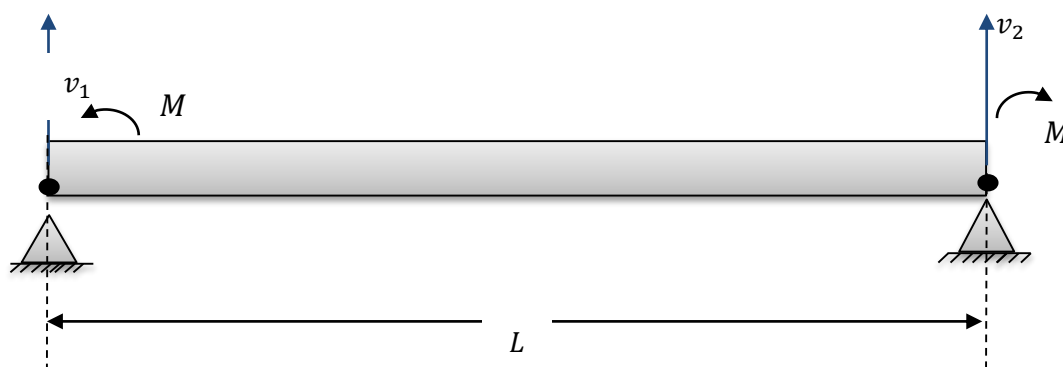


Figure 8 : poutre à deux appuis

Tableau 3: propriétés géométriques de la poutre simple

Conditions aux limites	Poutre simple		
Matériaux	Acier	Longueur L	1900 mm
Module de Young	2.10 ⁵ N/m ²	La largeur b	142,5 mm
Densité volumique ρ	7850 Kg/m ³	La hauteur h	20 mm
Coefficient de poisson	0,33		

3.3 Comparaison des résultats

Dans cette section, nous allons faire une comparaison entre les différentes structures mécaniques. En ce qui concerne la comparaison des fréquences mesurées et les fréquences calculées, nous avons pris comme exemple de matériaux l'acier et l'aluminium.

Tableau 4 Comparaison entre les fréquences mesurées et les fréquences calculées

Mode	Mesurées (Hz)[43]	Calculées (Hz)	Ecart(%)
1	20.000	21,0765	5.07
2	124,500	131,1193	4.93
3	342.188	361,8413	5.43
4	664,375	690,61	3.79

Après avoir déterminé les fréquences calculées des poutres saines, nous allons faire une petite comparaison entre les fréquences mesurées expérimentalement et les fréquences calculées :

Nous constatons dans le **tableau N°04** que les fréquences calculées sont proches de celles mesurées expérimentalement, ce qui indique que les résultats obtenues sont satisfaisants avec une erreur qui varie entre 3% et 9%. Ce résultat nous permet de dire que notre modélisation est validée.

3.3.1 Comparaison entre les fréquences mesurées et les fréquences calculées dans le cas d'une poutre saine encastree-encastree en aluminium qui est discrétisée en 27 éléments

Tableau 5 : Comparaison entre les fréquences mesurées et les fréquences calculées

Mode	Mesurée (Hz)[43]	Calculée (Hz)	Ecart(%)
1	40.00	39,6697	0,8500000
2	109,688	109,3514	0,48459883
3	215,000	214,3756	0,29876568
4	355,000	354,3851	0,17000000

3.3.2 Comparaison entre les fréquences mesurées et les fréquences calculées dans le cas d'une poutre appuis simple saine en acier qui est discrétisée en 30éléments

Tableau 6 : Comparaison entre les fréquences mesurées

Mode	Mesurées(Hz)[101]	Calculées(Hz)	Ecart(%)
1	12,68	12.6804	0,003
2	50,72	50.7216	0,003

Afin de comparer les fréquences mesurées expérimentalement et les fréquences calculées des poutres saines, nous avons fait varier différents paramètres : le nombre d'éléments, les conditions aux limites, les longueurs des poutres et le matériau.

Comme on peut le constater dans le tableau N°6, les fréquences calculées sont très proche de celles mesurées expérimentalement.

Chapitre III : Applications Numériques

Les résultats obtenus sont donc satisfaisants, avec une erreur moyenne variant entre 0 et 0,003. Cela nous permet de valider notre modélisation.

3.4 Tableaux de localisation des éléments endommagés

Après avoir comparé les fréquences naturelles calculées et les fréquences mesurées, nous utilisons la méthode de détection d'endommagement qui est basée sur l'indicateur MSEBI pour trouver et localiser les éléments endommagés ainsi que le taux d'endommagement.

Alors, nous allons présenter les trois tableaux des différentes poutres (simples, flexible-libre et encastree-encastree).

Tableau 7 : les différents cas d'endommagements de la structure poutre encastree-encastree

	Eléments endommagés	Réduction du module de Young (E)
Cas 01	Eléments 8	15%
Cas 02	Elément 9	14.52%
	Elément 12	59.67%

Tableau 8 : les différents cas d'endommagement sde la structure poutre flexible-libre

	Eléments endommagés	Réduction du module de Young (E)
Cas 01	Eléments 8	15%
Cas 02	Elément 9	14.52%
	Elément 12	59.67%

Tableau 9 : les différents cas d'endommagements de la structure poutre simple

	Eléments endommagés	Réduction du module de Young (E)
Cas 01	Eléments 8	32%
Cas 02	Elément 9	14.52%
	Elément 12	14.52%

3.5 Etude comparative des modèles de poutres endommagées en termes de fréquences

Les tableaux qui suivent 10,11,12,13 et 14 présentent les fréquences propres mesurées expérimentalement [56] ainsi que les fréquences calculées pour les trois modèles différents de poutres endommagées :

- 1- Le modèle de J.K.Sinha et al [5]
- 2- Le de Dimarogonas et Paipetis[12]
- 3- Le modèle basée sur la réduction de la rigidité E d'un élément poutre[52]

Ces différents modèles ont été testés et comparés en faisant varier les paramètres de la poutre (longueur, conditions aux limites, matériau, etc.) ainsi que les caractéristiques de l'endommagement.

3.5.1 Cas d'une poutre a une seule fissure

- les différents modèles ont été testés en faisant varier la profondeur de la fissure affectant la poutre

Chapitre III : Applications Numériques

Le tableau 5-7 présente les fréquences propres mesurées expérimentalement [43], et calculer à l'aide des différents modèles de poutres en configuration encasté-encasté. Ces résultats sont donnés en fonction de la variation de la profondeur de la fissure, qui est entre de 4 à 8mm

Les caractéristiques géométriques et mécaniques de chaque modèle sont identiques à celle de poutre 1, détaillées dans le tableau 1.

La position de la fissure, à $x = 595\text{mm}$, reste constante malgré la variation de sa profondeur, indiquée dans le tableau 5-7

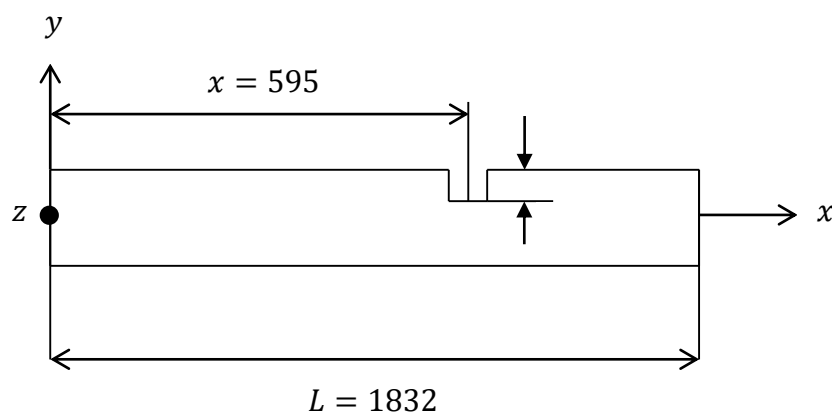


Figure 9 : poutre encastée-encastée à une seule fissure

Tableau 10 : Fissuré en aluminium encasté-encasté discrétisé en 27 éléments de la poutre 1

a=4mm X=595mm L=1832mm						
M	S	E	DE	E	P&D	E
39,688	39,666	0,00857	39,475	0,49055	39,980	0,78397
109,063	109,32	0,02752	107,12	2,03417	113,27	3,58587
215,000	214,36	0,00303	213,44	0,43610	216,04	0,77909
354,688	354,33	0,01523	352,13	0,63478	358,12	1,05571
a=6mm X=595mm L=1832mm						
M	S	E	DE	E	P&D	E
39,375	39,665	0,012	39,445	0,56	39,981	0,78
108,125	109,30	0,038	106,80	2,33	113,28	3,47
214,688	214,36	0,003	213,30	0,50	216,05	0,78
354,438	354,31	0,02	351,80	0,73	358,13	1,05
M : Mesuré[43]				E : Erreur en (%)		
P&D : Paipetis & Dimarogonas				S : Sinha		

- Changement des conditions aux limites
- Changement des conditions aux limites

Dans cette partie, les auteurs vont faire varier d'autres paramètres, tout en gardant les mêmes valeurs de profondeur de fissure que précédemment, ils vont notamment changer la longueur $L=996$

Chapitre III : Applications Numériques

Et $X = 275\text{mm}$ et ça dans le but d'étudier l'influence de ces différents paramètres sur les fréquences propres calculées par les modèles, toujours en le comparant aux valeurs mesurées expérimentalement.

Tableau 11 : Fissuré en aluminium flexible-libre discrétisé en 16 éléments

a=12mm X=275mm L=996						
M	S	E	DE	E	P&D	E
19	21.0765	9.85220506	20.9632	9.365	21.46	11.46
123	131.22	6.26428898	127.428	3.475	140.47	12.44
326.563	363.128	10.0694521	360.728	9.46	366.9736	11.01
660.313	690.661	4.3940515	677.478	2.534	756.83	12.75
a=8mm X=275mm L=996						
M	S	E	DE	E	P&D	E
19.750	21,0768	0,0001	20,9104	0,79	21,322	1,1678
124.063	131,1449	0,0490	125,817	4,04	140,46	6,6562
336.875	362,2359	0,2263	360,243	0,44	364,27	0,6681
662.313	690,8014	0,0044	672,017	2,69	727,20	5,0328

M : Mesuré[101] E : Erreur en (%)

S : Sinha

P&D : Paipetis & Dimarogonas

- **Changement des conditions aux limites**
-Cas d'une poutre simple

Dans cette partie, les auteurs ont proposé d'autres caractéristiques d'une poutre simple d'une longueur $L=1900$ et d'une position de la fissure qui est désormais à $X=430$ qui est discrétisée en 30 éléments e d'une longueur de la fissure $a=8\text{mm}$

Tableau 12 : Poutre simple fissurée discrétisée en 30 éléments et de longueur total $L=1900$

a=8mm x=430mm						
M	S	E	DE	E	P&D	E
12,68	11,9661	5,63	12,6819	0,012	12,8958	1,67
50,72	45,9412	9,42	50,7259	0,008	52,5409	3,46

M : Mesuré [101] S : Sinha E : Erreur en (%) P&D : Paipetis & Dimarogonas

- **Cas de deux fissures**

D'après ce que nous allons étudier pour chaque modèle de poutre endommagé avec deux fissures. Les propriétés mécaniques et géométriques de chaque modèle de poutre endommagée sont identiques à la poutre 1.

Les profondeurs et les positions des deux fissures sont données comme suit :

Pour la fissure 1, la profondeur $a_1=12\text{mm}$ et la position $x_1=595\text{mm}$ restent constantes.

Pour la fissure 2, la profondeur a_2 varie entre 4 et 8 et la position $x_2=800\text{mm}$ reste constante.

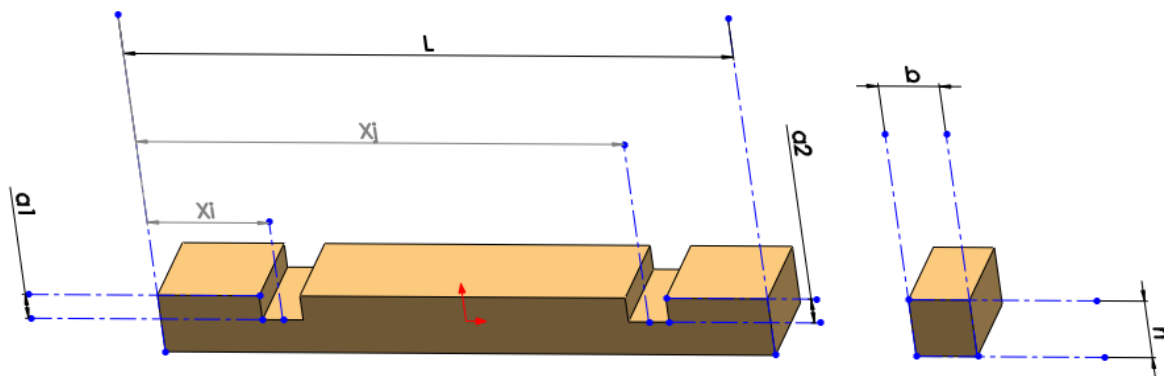


Figure 10 : poutres à deux endommagements

Tableau 13 : Poutre fissurée en aluminium encastrée-encastrée discrétisée en 27 éléments et de longueur total $L=1832$

$a_1=12\text{mm}$ $X_1=595\text{mm}$ $a_2=4\text{mm}$ $X_2=800\text{mm}$						
M	S	E	DE	E	P&D	E
38.75	35.7702	7.6898	39.6782	2.3954	39.7911	2.616
105.938	103.541	2.2626	109.363	3.2330	112.993	6.244
213.75	198.268	7.2430	214.547	0.3729	219.342	2.549
350	326.166	6.8097	354.698	1.3423	354.388	1.238
$a_1=12\text{mm}$ $X_1=275\text{mm}$ $a_2=8\text{mm}$ $X_2=800\text{mm}$						
M	S	E	DE	E	P&D	E
38.437	3700.910	0.0371491	3967.840	0.032297	41.0358	6.761
105.938	9615.660	0.09233136	10936.200	0.0323208	115.147	8.693
212.813	19906.300	0.06461071	21455.000	0.0081621	219.682	3.228
349.063	33232.900	0.04793977	35468.600	0.0161088	372.065	6.590
M : Mesuré [43] ; S : Sinha ; E : Erreur en (%) P&D : Paipetis & Dimarogonas						

• **Changement des conditions aux limites :**

Dans cette étape, nous allons modifier les conditions aux limites, la longueur de la poutre, le nombre d'éléments, et la position de la fissure, on gardant les mêmes valeurs des profondeurs de la fissure

Tableau N°11 : poutre simple deux endommagement discrétisée en 30 éléments

$a_1=12\text{mm}$ $x_1=595\text{mm}$ $a_2=12\text{mm}$ $x_2=800\text{mm}$						
M	S	E	DE	E	P&D	E
12,6804	8,0368	36,62	12,6818	0,011	13,3486	5,01
50,7216	40,143	20,86	50,7228	0,002	53,5429	5,27
M : mesuré [43] ; S : Sinha ; E : Erreur en (%) ; P&D : Paipetis & Dimarogonas						

➤ **Dans le cas d'une seule fissure**

- Pour une poutre en aluminium flexible-libre, le modèle Sinha donne des fréquences propres relativement satisfaisantes avec une erreur de 0.0044.
- Pour une poutre en aluminium encastrée-encastrée, le modèle Sinha donne des fréquences propres relativement satisfaisantes avec une erreur de 0,02752.
- Pour une poutre simple en acier, le modèle de réduction de rigidité donne des fréquences propres relativement satisfaisantes avec une erreur de 0.08.

➤ Dans le cas de deux fissures

- Pour une poutre en aluminium encastrée-encastrée, le modèle de réduction de rigidité donne des fréquences propres relativement satisfaisantes avec une erreur de 2.3954
- Pour une poutre simple en acier, le modèle de réduction de rigidité donne des fréquences propres relativement satisfaisantes avec une erreur de 0,011.

3.6 Localisation des dommages basé sur l'indicateur MSEBI

Dans cette section, l'indicateur MSEBI est utilisé pour détecter et localiser les éléments endommagés dans des structures poutres en 2D avec endommagement unique ou multiple.

- **Structure poutre encastrée –encastrée en 2D**

Scénario N°1 :

Dans ce premier scénario, un endommagement localisé de 15% sur l'élément 8. Un histogramme illustrant les valeurs de MSEBI pour chaque élément est présenté sur les figures ci-dessous. Cet histogramme indique l'endroit exact du défaut et sa taille.

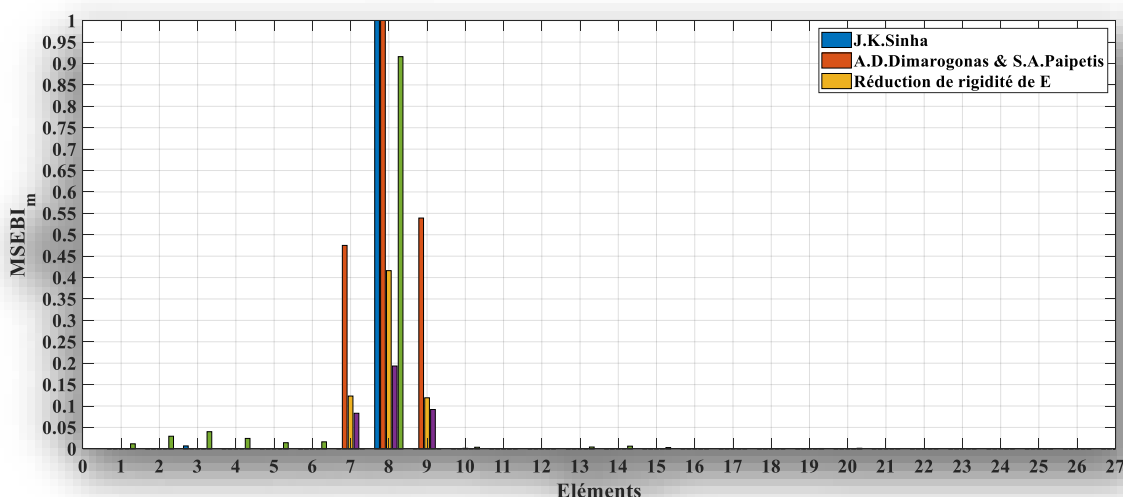


Figure 11 : Histogramme des valeurs MSEBI d'endommagement de l'élément

- **Poutre flexible-libre**

Scénario N°2 :

Dans ce deuxième scénario, nous avons remarqué une fissure de 15% sur l'élément 8, un histogramme illustrant les valeurs MSEBI pour chaque élément est représenté sur la figure suivante

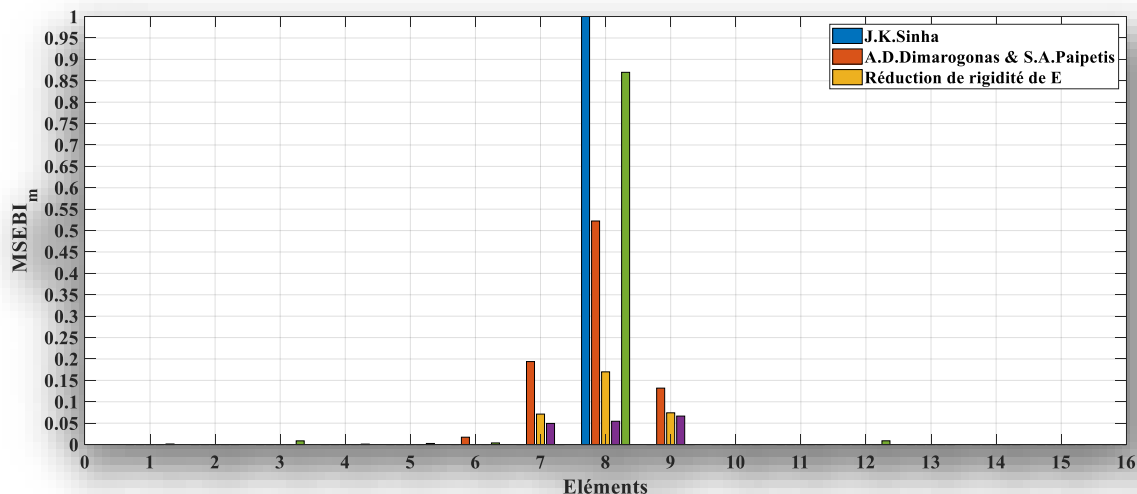


Figure 12 : Histogramme des valeurs MSEBI d'endommagement de l'élément 8

Structure poutre simple 2D

Scenario 03

Dans ce troisième scenario, nous avons remarqué une fissure de 32% sur l'élément 8, un histogramme illustrant les valeurs MSEBI pour chaque élément est représenté sur la figure suivante.

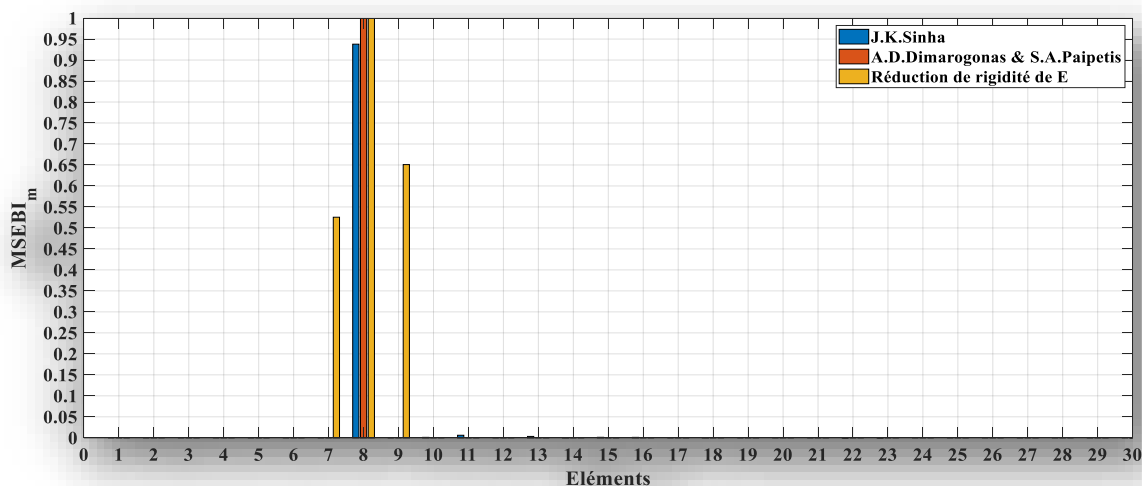


Figure 13 : Histogramme des valeurs MSEBI d'endommagement de l'élément 8

- Cas de deux fissures

Scénario N°01

Dans ce premier scénario, nous avons remarqué la présence d'un endommagement au niveau des éléments 9 et 12 avec le pourcentage d'endommagement sont respectivement de 15% et 59.67%.

Chapitre III : Applications Numériques

Un histogramme illustrant les valeurs de MSEBI pour chaque élément est présenté sur la figure N°14.

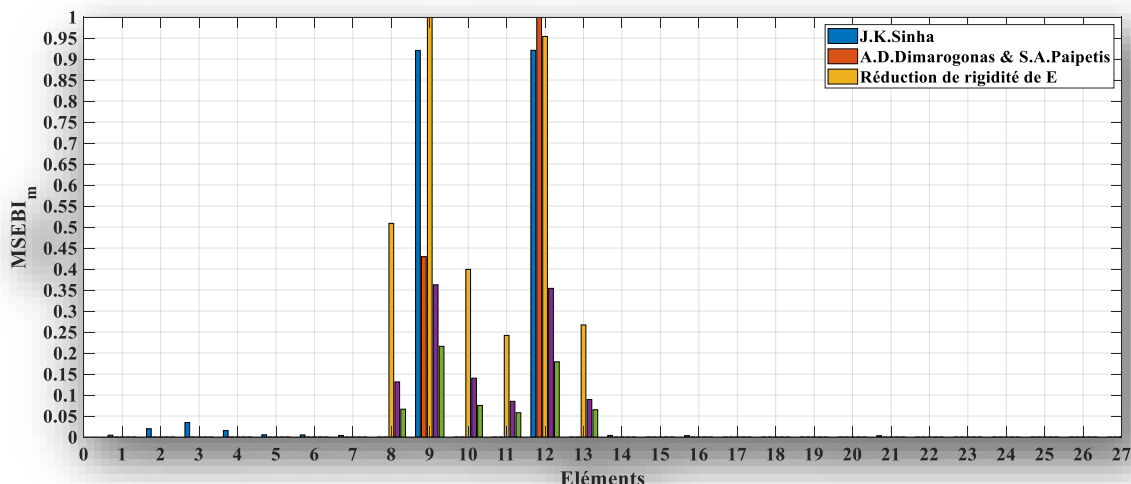


Figure 14 : Histogramme des valeurs MSEBI d'endommagement des éléments 9 et 12

- Poutre simple

Scenario 02

Dans ce deuxième scenario, nous avons remarqué deux fissures de 15% pour les deux éléments 9 et 12, un histogramme illustrant les valeurs MSEBI pour chaque élément est représenté sur la figure suivante

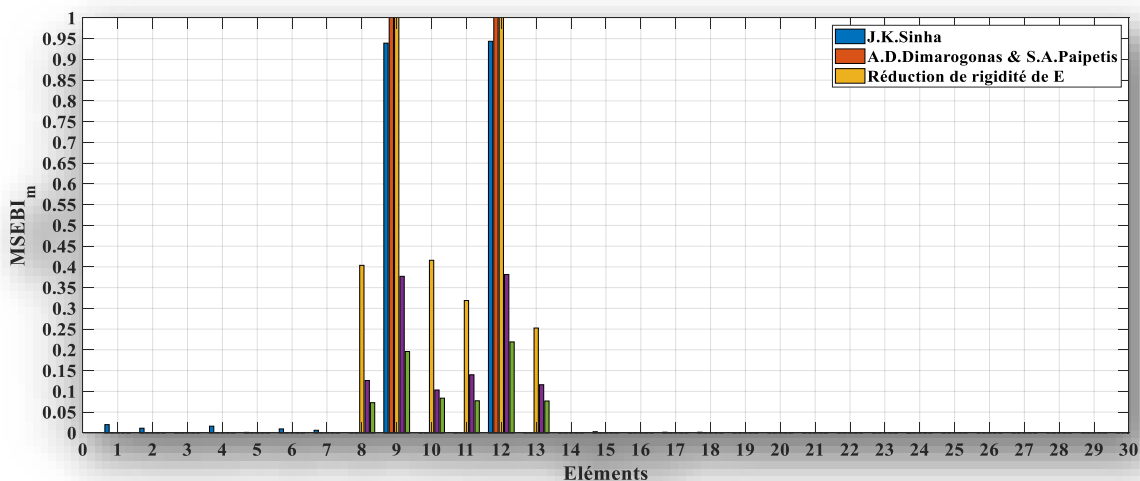


Figure 15 : Histogramme des valeurs MSEBI d'endommagement des éléments 9 et 12

- Poutre flexible-libre

Scénarios 03

Chapitre III : Applications Numériques

Dans ce troisième scénario, nous avons vu deux fissures de 15% et 59.67% au niveau des éléments 9 et 12, un histogramme illustrant les valeurs MSEBI pour chaque élément est représenté sur la figure suivante

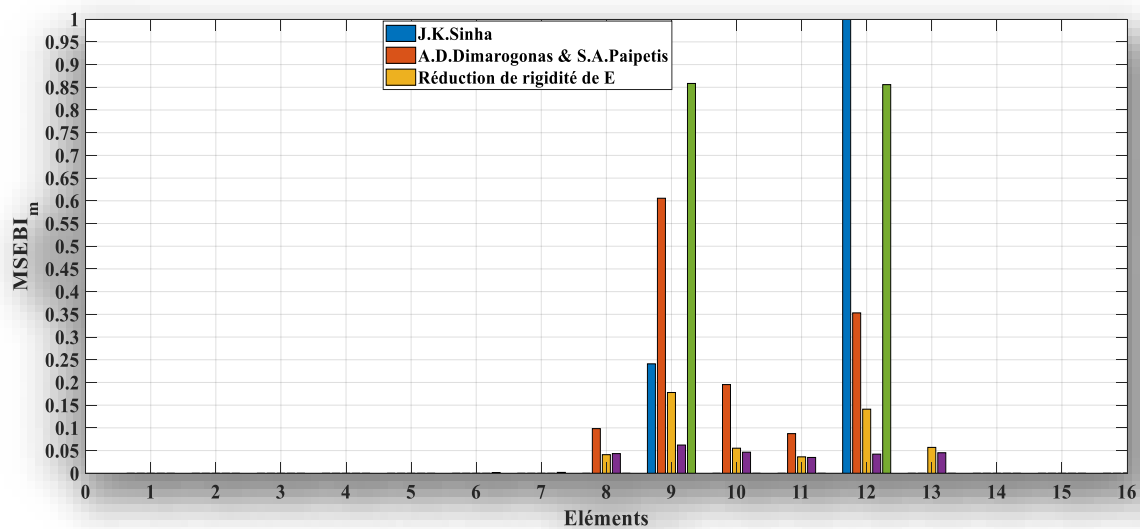


Figure 16 : Histogramme des valeurs MSEBI d'endommagement des éléments 9 et 12

3.7 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de calculer les fréquences naturelles pour les quatre premiers modes de vibrations pour les différents poutres encastées et flexibles, ainsi que les deux fréquences propres pour la poutre simple, ce qui nous a permis d'extraire les fréquences propres pour chaque modèles, J.K.Sinha et al, le modèle de A.D.Dimarogonas&S.A.Paipetis et celui qui est basé sur la réduction de la raideur E d'un élément poutre.

Les fréquences calculées pour ces modèles de fissuration ont été, ensuite, comparées aux fréquences naturelles mesurées, [75], on faisant varier les différents paramètres caractérisant l'endommagement (la rigidité, emplacement et nombre d'endommagements) et ceux caractérisant la poutre (longueur type de matériaux, conditions aux limites et le nombre d'éléments).

Nous constatons que dans les quatre premières fréquences propres calculées pour le modèle d'A.D.Dimarogonas&S.A.Paipetis n'est pas très satisfaisant par rapport aux fréquences naturelles réelles obtenues expérimentalement avec une erreur moyenne variant entre 1.238 à 8.68.

Quant aux fréquences propres des modèles de fissuration sont satisfaisantes comparativement à celles mesurées avec une erreur moyenne qui varie entre 0.012 et 0,047, après, nous avons appliqué ces modèles d'endommagement sur les méthodes de détection d'endommagements existant dans la littérature. Nous avons choisi une méthode qui est basée sur la méthode énergétique ou bien sur l'indicateur MSEBI pour la localisation des éléments endommagés ainsi que le nombre d'éléments endommagés dans nos structures mécaniques, ce qui nous a permis de faire les tableaux des éléments endommagés et de voir le pourcentage d'endommagement.

Chapitre III : Applications Numériques

MSEBI pour la localisation des éléments endommagés ainsi le nombre des éléments endommagés dans nos structures mécanique, ce qui nous as permis de faire les tableaux des éléments endommagés, et de voir le pourcentage d'endommagement.

Chapitre IV : Optimisation et quantification

4.1 Introduction :

Après avoir détecté l'endommagement dans une structure, l'ingénieur cherche à optimiser le temps nécessaire du niveau d'endommagement à travers l'amélioration de la précision et de l'efficacité des techniques de calcul. En effet, les techniques d'optimisation peuvent aussi avoir d'autres objectifs notamment la classification et la prédiction des endommagements. Cette section servira à déterminer et à expliquer les différentes techniques d'optimisation existantes.

Les techniques d'optimisations se réalisent à travers la présence d'un ensemble d'algorithmes nommés des algorithmes d'optimisation. En effet ces algorithmes ont pour objectif de réaliser une conception optimale à travers la comparaison des solutions alternatives créés en utilisant une connaissance priori du problème. Le schéma suivant constitue les différentes étapes pour enfin arriver à obtenir les solutions du problème.

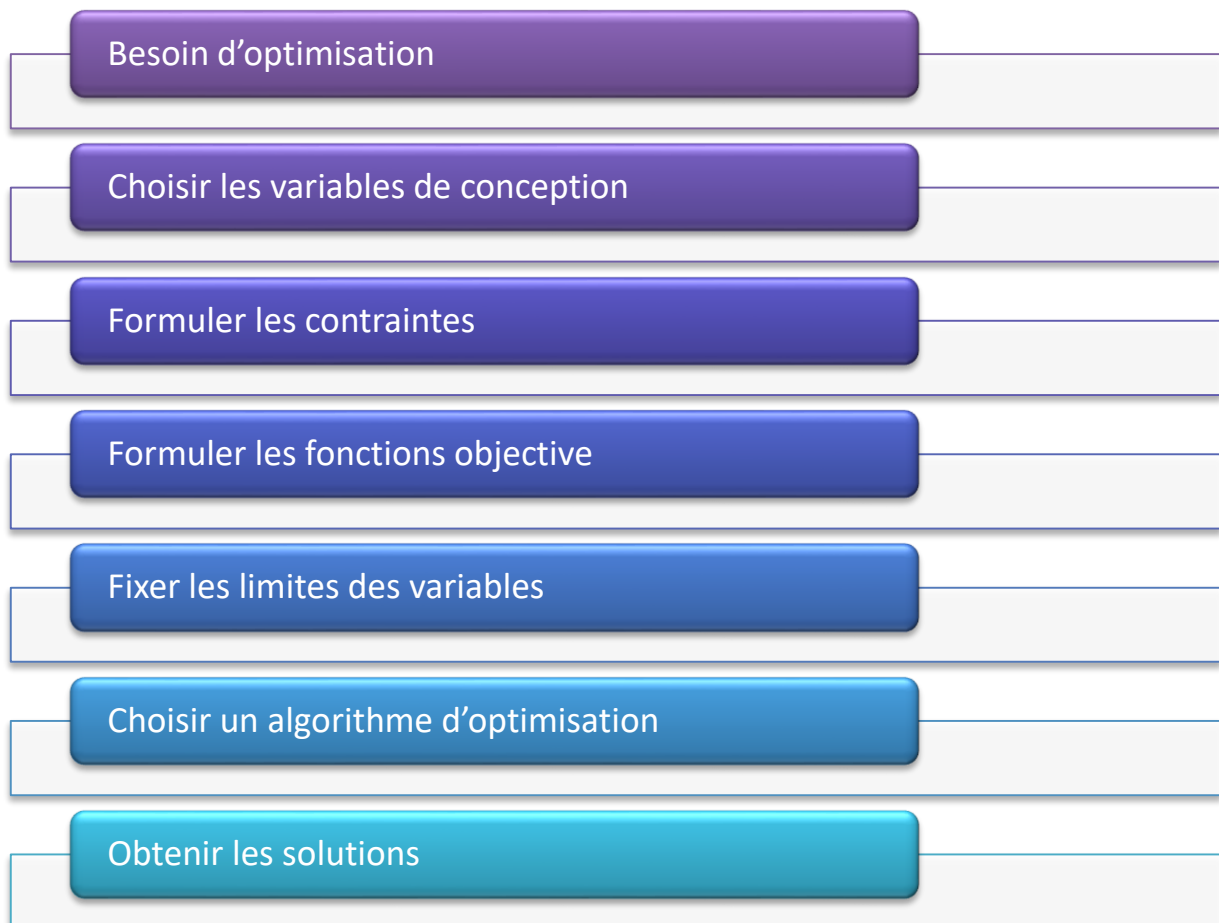


Figure 17: les étapes de résolution du problème

4.2 Optimisation de la recherche de nourriture de l'anguille électrique

4.2.1 Introduction

Les problèmes d'optimisation sont omniprésents dans notre vie et notre travail quotidiens. La recherche de méthodes efficaces et efficientes pour résoudre ces problèmes devient progressivement un sujet de recherche important (Melman&Evsutin,2023 ; Hu et al,2022a).

L'optimisation consiste à trouver la meilleure solution ou une solution approximative acceptable parmi de nombreuses solutions sous certaines conditions.

Avec le développement rapide des nouvelles technologies, de nombreux problèmes d'optimisation deviennent de plus en plus fréquents et complexes dans une grande variété de domaines d'ingénierie, notamment :

- Le traitement d'image [102]
- L'intelligence artificielle [103]
- La modélisation hydrologique et hydraulique [104]
- L'ordonnancement de la production [105]

4.2.2 Méthode d'interpolation quadratique :

La méthode d'interpolation carrée est une méthode fréquemment employée pour ajuster des courbes [106, 107] et elle est souvent employée pour les fonctions unaires pour trouver le point minimum dans un intervalle initial spécifié. Pour approximer la fonction $f(x)$, on utilise un polynôme d'interpolation quadratique, $L(x)$, afin de déterminer le point minimum de la fonction $f(x)$.

On peut obtenir le point minimum approximatif de la fonction $f(x)$, en trouvant la valeur minimale du polynôme $L(x)$.

On peut décrire la formulation initiale de l'interpolation quadratique comme suit :

L'interpolation quadratique de $f(x)$, $L(x)$, peut être représentée de la manière suivante :

$$L(x) = \alpha x^2 + \beta x + \delta \quad (4.1)$$

$$\text{Avec } \alpha, \beta, \delta \in R \quad (4.2)$$

Avec α , β et δ sont des fonctions indéterminés. Supposons que $f(x)$, ait trois points

$$P_i(x_i, f(x_i)), P_j(x_j, f(x_j)) \text{ et } P_k(x_k, f(x_k)) \text{ soit } \alpha \leq x_i \leq x_j < x_k \leq b \quad (4.3)$$

Selon les conditions d'interpolation, la valeur de $f(x)$ est égale à celle de $L(x)$ aux points d'interpolation x_i , x_j et x_k ce qui s'exprime comme suit :

$$\begin{cases} L(x_i) = \alpha x_i^2 + \beta x_i + \delta = f(x_i) \\ L(x_j) = \alpha x_j^2 + \beta x_j + \delta = f(x_j) \\ L(x_k) = \alpha x_k^2 + \beta x_k + \delta = f(x_k) \end{cases} \quad (4.4)$$

Chapitre IV : Optimisation et quantification

Pour trouver le minimum de $L(x)$, prenez la dérivée de l'équation (1) et fixez-la à 0.

Le minimiseur x^* peut être obtenu par :

$$x^* = -\frac{\beta}{2\alpha} \quad (4.5)$$

avec :

$$\begin{cases} \alpha = \frac{(x_j - x_k)f(x_i) + (x_k - x_i)f(x_j) + (x_i - x_j)f(x_k)}{(x_j - x_k)(x_k - x_i)(x_i - x_j)} \\ \beta = \frac{(x_j^2 - x_k^2)f(x_i) + (x_k^2 - x_i^2)f(x_j) + (x_i^2 - x_j^2)f(x_k)}{(x_j - x_k)(x_k - x_i)(x_i - x_j)} \end{cases} \quad (4.6)$$

Selon l'équation (6), la valeur minimale de $L(x)$ s'écrit comme suit :

$$x^* = \frac{(x_j^2 - x_k^2)f(x_i) + (x_k^2 - x_i^2)f(x_j) + (x_i^2 - x_j^2)f(x_k)}{2((x_j - x_k)f(x_i) + (x_k - x_i)f(x_j) + (x_i - x_j)f(x_k))} \quad (4.7)$$

Par ailleurs, le polynôme d'interpolation quadratique $L(x)$ peut être facilement obtenu comme suit :

$$L(x) = \frac{(x - x_j)(x - x_k)}{(x_i - x_j)(x_i - x_k)}f(x_i) + \frac{(x - x_i)(x - x_k)}{(x_j - x_i)(x_j - x_k)}f(x_j) + \frac{(x - x_i)(x - x_j)}{(x_k - x_i)(x_k - x_j)}f(x_k) \quad (4.8)$$

Le schéma de l'interpolation quadratique est présenté à la figure N°23

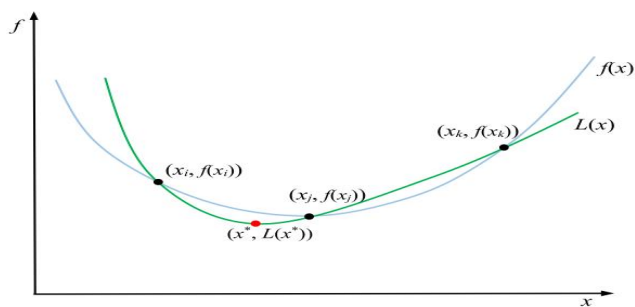


Figure 18 : schéma quadratique interpolation

En réduisant l'intervalle de recherche sur la base du point minimum estimé précédemment, x^* , un nouvel intervalle de recherche est formé avec trois points. L'interpolation quadratique est ensuite appliquée à nouveau en utilisant la technique susmentionnée jusqu'à ce que l'exigence de précision spécifiée soit satisfaite. Ce processus itératif permet de trouver le point minimal approximatif final.

4.2.3 Interpolation quadratique généralisée (GQI)

L'interpolation quadratique est largement utilisée en optimisation pour approximer le minimum d'une fonction $f(x)$ [108, 109]. Cependant, dans les applications pratiques, il n'y a pas toujours d'exigences spécifique pour le choix des trois utilisés pour construire la parabole.

Lorsque les points sont mal choisis, il est possible de construire une parabole s'ouvrant vers le haut, ce qui conduit à une valeur maxi plutôt qu'à un minimiseur. De plus, si une exigence spécifique pour le choix des trois points est nécessaire (pour obtenir une parabole s'ouvrant vers le bas), cela peut poser des problèmes en termes de temps de calcul et d'efficacité.

Pour résoudre ces problèmes et proposer une approche plus universelle, une méthode d'interpolation quadratique généralisée (FQI) est proposée. Cette méthode commence par une analyse complète de tous les cas possible pour le choix des trois points, lorsque :

$$f(x_i) < f(x_j) < f(x_k) \quad (4.9)$$

Il existe six cas essentiels qui sont comme suite

Cas 01 :

Lorsque :

$$x_j < x_i < x_k \text{ si : } f(x_j) \ll f(x_k) \quad (4.10)$$

Alors :

$$\begin{aligned} x^* &= \frac{(x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_k)} + (x_k^2 - x_i^2) \frac{f(x_j)}{f(x_k)} + (x_i^2 - x_j^2)}{2((x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_k)} + (x_k - x_i) \frac{f(x_j)}{f(x_k)} + (x_i - x_j))} = \frac{(x_i^2 - x_j^2)}{2(x_i - x_j)} \\ &= \frac{(x_i + x_j)}{2} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Si

$$f(x_j) \rightarrow f(x_k) \quad (4.12)$$

Alors :

$$x^* = \frac{(x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k^2 - x_i^2) + (x_i^2 - x_j^2) \frac{f(x_k)}{f(x_j)}}{2((x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k - x_i) + (x_i - x_j) \frac{f(x_k)}{f(x_j)})} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k^2 - x_i^2)}{2 \left((x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k - x_i) \right)} \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{(x_j^2 - x_k^2) \left(\frac{f(x_i)}{f(x_j)} - 1 \right)}{2((x_k - x_j) \left(\frac{f(x_i)}{f(x_j)} - 1 \right))} \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$= \frac{(x_k^2 - x_j^2)}{2(x_k - x_j)} \quad (4.16)$$

$$= \frac{(x_j + x_k)}{2} \quad (4.17)$$

Ainsi, la valeur mini est comme suit :

$$\text{Minime} = \left\{ x^* \mid x_i + x_i \leq x^* \leq \frac{x_j + x_k}{2} \right\} \quad (4.18)$$

Cas 02

Lorsque

$$x_k < x_i < x_j \quad (4.)$$

Si

$$f(x_j) \ll f(x_k) \quad (4.20)$$

Alors

$$x^* = \frac{(x_i^2 - x_j^2) + (x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_k)} + (x_k^2 - x_i^2) \frac{f(x_j)}{f(x_k)}}{2((x_i - x_j) + (x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_k)} + (x_k - x_i) \frac{f(x_j)}{f(x_k)})} = \frac{(x_i^2 - x_j^2)}{2(x_i - x_j)} = \frac{x_i + x_j}{2} \quad (4.21)$$

Le cas ou

$$f(x_j) \rightarrow f(x_k) \quad (4.22)$$

Alors

$$x^* = \frac{(x_i^2 - x_j^2) \frac{f(x_k)}{f(x_j)} + (x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k^2 - x_i^2)}{2 \left((x_i - x_i) \frac{f(x_k)}{f(x_j)} + (x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k - x_i) \right)} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} & (x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k^2 - x_j^2) & (4.24) \\ = & \frac{(x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k^2 - x_j^2)}{2 \left((x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k - x_j) \right)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{(x_j^2 - x_k^2) \left(\frac{f(x_i)}{f(x_j)} - 1 \right)}{2 \left((x_j - x_k) \left(\frac{f(x_i)}{f(x_j)} - 1 \right) \right)} & (4.25) \end{aligned}$$

$$= \frac{(x_j^2 - x_k^2)}{2(x_j - x_k)} \quad (4.26)$$

$$= \frac{(x_j + x_k)}{2} \quad (4.27)$$

Ainsi les valeurs minimales est comme suit

$$\text{Minimises} = \left\{ x^* \mid \frac{x_j + x_k}{2} \leq x^* \leq \frac{x_i + j}{2} \right\} \quad (4.28)$$

Cas 03

Lorsque

$$x_i < x_j < x_k \quad (4.29)$$

Si

$$f(x_j) \ll f(x_k) \quad (4.30)$$

Alors

$$\begin{aligned} x^* &= \frac{(x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_k)} + (x_k^2 - x_i^2) \frac{f(x_j)}{f(x_k)} + (x_i^2 - x_j^2)}{2 \left((x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_k)} + (x_k - x_i) \frac{f(x_j)}{f(x_k)} + (x_i - x_j) \right)} = \frac{(x_i^2 - x_j^2)}{2(x_i - x_j)} & (4.31) \\ &= \frac{(x_i + x_j)}{2} \end{aligned}$$

Si

$$f(x_j) \rightarrow f(x_k) \quad (4.32)$$

Alors

$$x^* = \frac{(x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k^2 - x_i^2) + (x_i^2 - x_j^2) \frac{f(x_k)}{f(x_j)}}{2 \left((x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k - x_i) + (x_i - x_j) \frac{f(x_k)}{f(x_j)} \right)} \quad (4.33)$$

$$= \frac{(x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k^2 - x_j^2)}{2 \left((x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k - x_j) \right)} \quad (4.34)$$

$$= \frac{(x_j^2 - x_k^2) \left(\frac{f(x_i)}{f(x_j)} - 1 \right)}{2(x_j - x_k) \left(\frac{f(x_i)}{f(x_j)} - 1 \right)} \quad (4.35)$$

$$= \frac{(x_j^2 - x_k^2)}{2(x_j - x_k)} \quad (4.36)$$

$$= \frac{(x_j + x_k)}{2} \quad (4.37)$$

Ainsi

Les valeurs minimales est comme suit

$$\text{Mini} = \left\{ x^* \mid x^* \leq \frac{x_i + x_j}{2} \right\} \quad (4.38)$$

Et les valeurs maxi est comme suit

$$\text{Maxi} = \left\{ x^* \mid x^* \geq \frac{x_j + x_k}{2} \right\} \quad (4.39)$$

Cas 04

Lorsque

$$x_k < x_j < x_i, \quad (4.40)$$

Si

$$f(x_j) \ll f(x_k) \quad (4.41)$$

Alors

$$x^* = \frac{(x_i^2 - x_j^2) + (x_k^2 - x_i^2) + (x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)}}{2 \left((x_i - x_j) \frac{f(x_k)}{f(x_j)} + (x_k - x_i) + (x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} \right)} \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned} & (x_k^2 - x_j^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_j^2 - x_k^2) & (4.43) \\ = & \frac{(x_k^2 - x_j^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_j^2 - x_k^2)}{2 \left((x_k - x_j) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_j - x_k) \right)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{(x_j^2 - x_k^2) \left(\frac{f(x_i)}{f(x_j)} - 1 \right)}{2 \left((x_j - x_i) \left(\frac{f(x_i)}{f(x_j)} - 1 \right) \right)} & (4.44) \\ = & \frac{(x_j^2 - x_k^2) \left(\frac{f(x_i)}{f(x_j)} - 1 \right)}{2 \left((x_j - x_i) \left(\frac{f(x_i)}{f(x_j)} - 1 \right) \right)} \end{aligned}$$

$$= \frac{x_j^2 - x_k^2}{2(x_j - x_i)} = \frac{x_j + x_i}{2} \quad (4.45)$$

Ainsi les valeurs mini et maxi est comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Mini} &= \left\{ x^* \mid x^* \leq \frac{x_i + x_k}{2} \right\} & (4.46) \\ \text{Maxi} &= \left\{ x^* \mid x^* \geq \frac{x_j + x_i}{2} \right\} \end{aligned}$$

Cas 05

Lorsque

$$x_i < x_k < x_j, \text{ si } f(x_j) \ll f(x_k) \quad (4.47)$$

Alors

$$x^* = \frac{(x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_i^2 - x_j^2) + (x_k^2 - x_i^2) \frac{f(x_j)}{f(x_k)}}{2 \left((x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_k)} + (x_i - x_j) + (x_k - x_i) \frac{f(x_j)}{f(x_k)} \right)} \quad (4.48)$$

$$= \frac{x_i^2 - x_j^2}{2(x_i - x_j)} \quad (4.49)$$

$$= \frac{x_j + x_i}{2} \quad (4.50)$$

Si

$$f(x_j) \rightarrow f(x_k) \quad (4.51)$$

Alors

$$x^* = \frac{(x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_i^2 - x_j^2) \frac{f(x_k)}{f(x_j)} + (x_k^2 - x_i^2)}{2 \left((x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_i - x_j) \frac{f(x_k)}{f(x_j)} + (x_k - x_i) \right)} \quad (4.52)$$

$$\begin{aligned} & (x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k^2 - x_j^2) \\ &= \frac{(x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k^2 - x_j^2)}{2 \left((x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k - x_j) \right)} \end{aligned} \tag{4.53}$$

$$= \frac{(x_j^2 - x_k^2) \left(\frac{f(x_i)}{f(x_k)} - 1 \right)}{2 \left((x_j - x_k) \left(\frac{f(x_i)}{f(x_k)} - 1 \right) \right)} \tag{4.54}$$

$$= \frac{(x_j^2 - x_k^2)}{2(x_j - x_k)} = \frac{(x_j + x_k)}{2} \tag{4.55}$$

ainsi les valeurs mini et maxi sont comme suit

$$\begin{aligned} \text{Mini} &= \left\{ x^* \mid \frac{x_i + x_j}{2} \leq x^* \leq \frac{x_k + x_j}{2} \right\} \\ \text{Maxi} &= \left\{ x^* \mid x^* \geq \frac{x_j + x_i}{2} \right\}. \end{aligned} \tag{4.56}$$

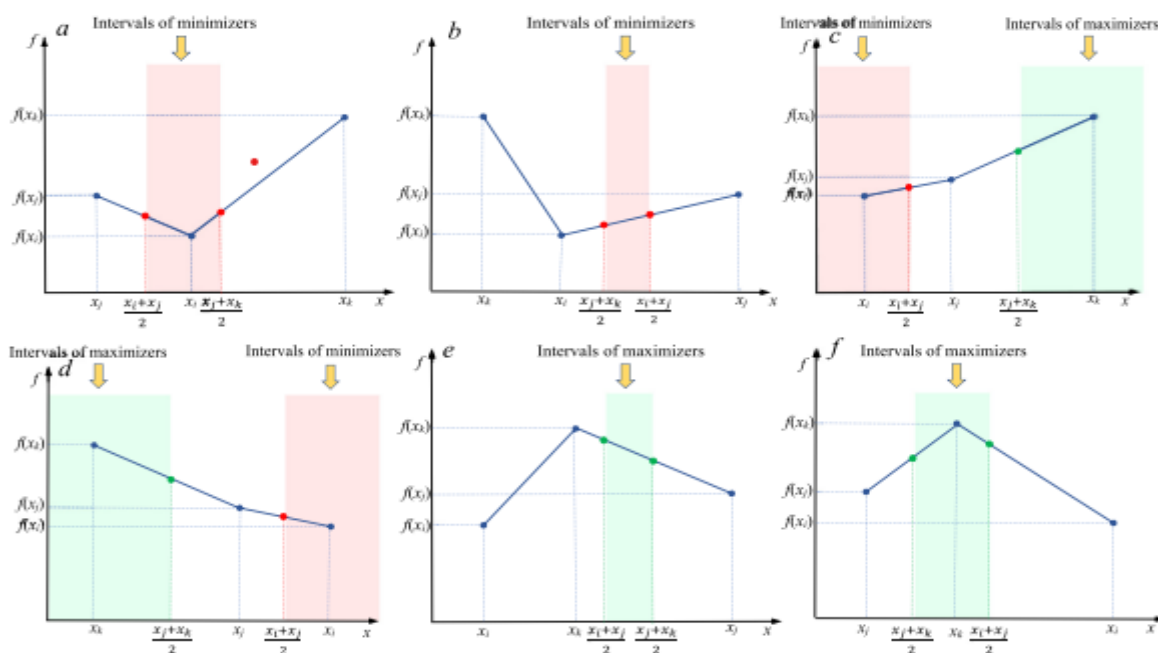


Figure 19: minimiser et maximiser intervalle quadratique interpolation pour les différents cas

Cas 06
Lorsque

$$\begin{aligned} & x_j < x_k < x_i \\ & \text{Si } f(x_j) \ll f(x_k) \end{aligned} \tag{4.57}$$

Alors

$$x^* = \frac{(x_k^2 - x_i^2) \frac{f(x_j)}{f(x_k)} + (x_i^2 - x_j^2) + (x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_k)}}{2 \left((x_k - x_i) \frac{f(x_j)}{f(x_k)} + (x_i - x_j) + (x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_k)} \right)} \quad (4.58)$$

$$= \frac{x_i^2 - x_j^2}{2(x_i - x_j)} \quad (4.59)$$

$$= \frac{x_j + x_i}{2} \quad (4.60)$$

Si

$$f(x_j) \rightarrow f(x_k) - \quad (4.61)$$

$$x^* = \frac{(x_k^2 - x_i^2) + (x_i^2 - x_j^2) \frac{f(x_k)}{f(x_j)} + (x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)}}{2 \left((x_k - x_i) + (x_i - x_j) \frac{f(x_k)}{f(x_j)} + (x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} \right)} \quad (4.62)$$

$$= \frac{(x_j^2 - x_k^2) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k^2 - x_j^2)}{2 \left((x_j - x_k) \frac{f(x_i)}{f(x_j)} + (x_k - x_j) \right)}$$

$$= \frac{(x_j^2 - x_k^2) \left(\frac{f(x_i)}{f(x_j)} - 1 \right)}{2((x_j - x_k) \left(\frac{f(x_i)}{f(x_j)} - 1 \right))} \quad (4.63)$$

$$= \frac{(x_j^2 - x_k^2)}{2(x_j - x_k)} \quad (4.64)$$

$$= \frac{(x_j + x_k)}{2} \quad (4.65)$$

Ainsi la valeur mini est comme suit

$$\text{Mini} = \left\{ x^* \mid \frac{x_k + x_j}{2} \leq x^* \leq \frac{x_i + x_j}{2} \right\} \quad (4.66)$$

La méthode d'interpolation quadratique généralisée (GQI) présente différents cas de figure pour la localisation des minimiseurs et maximiseurs :

Chapitre IV : Optimisation et quantification

- Pour $f(x_i) < f(x_j) < f(x_k)$ avec $x_i < x_j < x_k$ ou $x_k < x_i < x_j$, le minimiseur de la fonction d'interpolation quadratique correspondante existe et se trouve dans l'intervalle des minimiseurs
- Pour $f(x_i) < f(x_j) < f(x_k)$ avec $x_i < x_j < x_k$ ou $x_k < x_j < x_i$, la fonction d'interpolation quadratique a un minimiseur ou maximiseur
- Pour $f(x_i) < f(x_j) < f(x_k)$ avec $x_i < x_k < x_j$ ou $x_j < x_k < x_i$, la fonction d'interpolation quadratique n'a qu'un maximiseurs et pas de minimiseurs

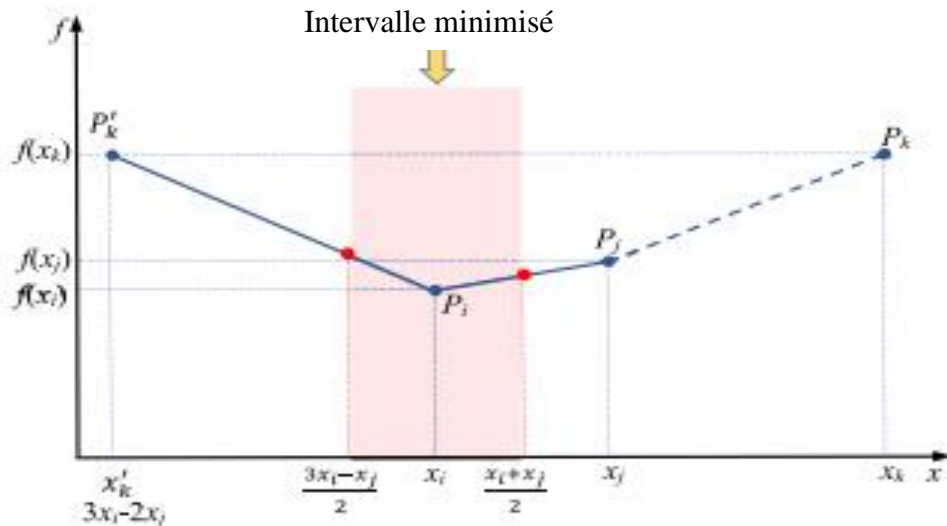


Figure 20: schéma pour l'obtention de l'intervalle minimisé

Une méthode d'interpolation quadratique généralisée (GQI) est développée, dans laquelle les fonctions d'interpolation de quatre cas pour la figure 25 sont reconstruites.

Pour le cas où $f(x_i) < f(x_j) < f(x_k)$ avec $x_i < x_j < x_k$, le minimiseur est calculé par l'équation 18. Si la valeur du minimiseurs est inférieure à x_j , le mini calculé à l'aide de l'équation 4 est accepté, sinon, la fonction d'interpolation quadratique est reconstruite comme le montre la figure 25

Pour le cas de la figure 25, étant donné que la région prometteuse pour exploiter la solution optimale pour $f(x)$ peut se situer autour de x_i , cette région est considérée comme l'intervalle du minimiseur de la fonction d'interpolation quadratique. Ainsi, pour le minimiseur tombe des deux côtés de P_i , P_k est déplacé à gauche de P_i le long de l'axe des x , ce qui rend les intervalles du minimiseur de la fonction d'interpolation quadratique formée par P_j, P_i et P_k' , symétriques par rapport à $x = x_i$ avec sont intervalle de $(x_j - x_i)$

Par conséquent, l'intervalle minimiser de la fonction d'interpolation quadratique formée par P_j, P_i et P_k est fourni par la fonction d'interpolation quadratique formée par P_j, P_i, P_k' . Comme le montre la figure 25, le minimiseur pour le cas de la figure 3(c) peut être exprimé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{(x_j^2 - x_k^2)f(x_i) + (x_k^2 - x_i^2)f(x_j) + (x_i^2 - x_j^2)f(x_k)}{2 \left((x_j - x_k)f(x_i) + (x_k - x_i)f(x_j) + (x_i - x_j)f(x_k) \right)} \\ x^* = x' \end{array} \right\} \text{ si } x' < x_j \quad (4.67)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x'_k = 3x_i - 2x_j \\ x^* = \frac{(x_j^2 - x_k'^2)f(x_i) + (x_k'^2 - x_i^2)f(x_j) + (x_i^2 - x_j^2)f(x_k)}{2 \left((x_j - x_k)f(x_i) + (x_k' - x_i)f(x_j) + (x_i - v)f(x_k) \right)} \end{array} \right\} \quad (4.68)$$

Pour $f(x_i) < f(x_j) < f(x_k)$ lorsque $x_k < x_j < x_i$, de la même manière que ci-dessus, l'intervalle minime de la fonction d'interpolation quadratique formée par P_i, P_j et P_k dans la figure 26 est fourni par la fonction d'interpolation quadratique formée par P_i, P_j et P_k' dans la figure 26. Ainsi, le minime pour le cas de figure 26 peut être exprimée comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{(x_j^2 - x_k^2)f(x_i) + (x_k^2 - x_i^2)f(x_j) + (x_i^2 - x_j^2)f(x_k)}{2 \left((x_j - x_k)f(x_i) + (x_k - x_i)f(x_j) + (x_i - x_j)f(x_k) \right)} \\ x^* = x' \end{array} \right\} \text{ si } x' > x_j \quad (4.69)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x'_k = 3x_i - 2x_j \\ x^* = \frac{(x_j^2 - x_k'^2)f(x_i) + (x_k'^2 - x_i^2)f(x_j) + (x_i^2 - x_j^2)f(x_k)}{2 \left((x_j - x_k)f(x_i) + (x_k' - x_i)f(x_j) + (x_i - v)f(x_k) \right)} \end{array} \right\} \quad (4.70)$$

Dans le cas de la figure 3(e), lorsque $f(x_i) < f(x_j) < f(x_k)$, lorsque $x_i < x_k < x_j$, la région prometteuse pour exploiter la solution optimale pour $f(x)$ peut se situer autour du côté gauche de x_i . Ainsi, P_j est déplacé à gauche du x_i le long de l'axe x , ce que entraîne une minimisation des intervalles de la fonction d'interpolation carrée formée par P_i, P_j' et P_k à $\frac{x_k - x_i}{2}$

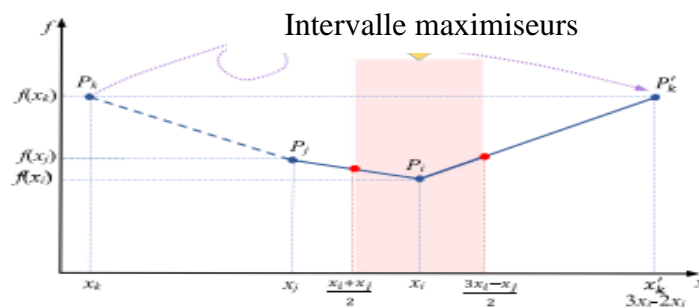


Figure 21 : schéma pour l'obtention de l'intervalle minimiseurs

Par conséquent, l'intervalle mini de la fonction d'interpolation quadratique formée par P_i, P_j, P_k dans la figure 26 est fourni par la fonction d'interpolation quadratique formée par P_i, P_j' et P_k dans la figure 26.

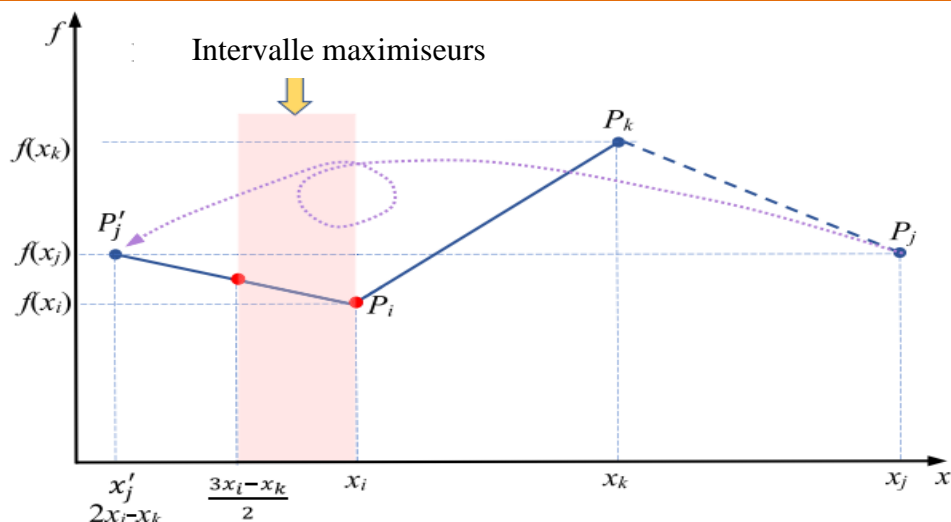


Figure 22: schéma pour l'obtention de l'intervalle mini

Pour le mini de la figure 5 peut être exprimé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_j' = 2x_i - x_k \\ x^* = \frac{(x_i^2 - x_j'^2)f(x_k) + (x_k^2 - x_i^2)f(x_j) + (x_j'^2 - x_k^2)f(x_i)}{2 \left((x_i - x_j')f(x_k) + (x_k - x_i)f(x_j) + (x_j' - x_k)f(x_i) \right)} \end{array} \right. \quad (4.71)$$

De même, pour

$$f(x_i) < f(x_j) < f(x_k) \quad (4.72)$$

Lorsque

$$x_j < x_k < x_i, \quad (4.73)$$

L'intervalle mini de la fonction d'interpolation quadratique formée par P_i, P_j et P_k dans la 27 est fourni par la fonction d'interpolation quadratique formée par P_i, P_j' et P_k . Le mini de la figure 28 peut être exprimé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_j' = 2x_i - x_k \\ x^* = \frac{(x_i^2 - x_j'^2)f(x_k) + (x_k^2 - x_i^2)f(x_j) + (x_j'^2 - x_k^2)f(x_i)}{2 \left((x_i - x_j')f(x_k) + (x_k - x_i)f(x_j) + (x_j' - x_k)f(x_i) \right)} \end{array} \right. \quad (4.74)$$

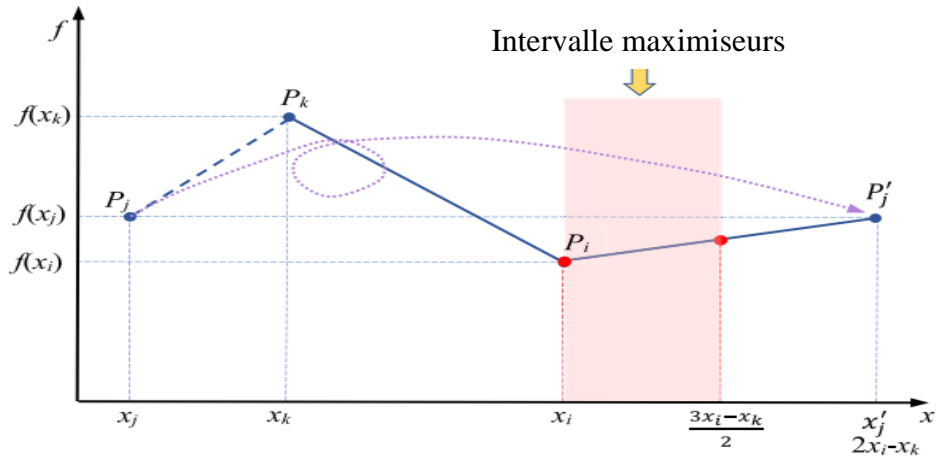


Figure 23 : Schéma pour l'obtention de l'intervalle minimiser

Chapitre IV :Optimisation et quantification

Par conséquent, la méthode GOI permettant d'obtenir les valeurs mini de la fonction d'interpolation dans tous les cas s'exprime comme suit

$$\left. \begin{array}{l}
 x^* = \frac{(x_j^2 - x_k^2)f(x_i) + (x_k^2 - x_i^2)f(x_j) + (x_i^2 - x_j^2)f(x_k)}{2 \left((x_j - x_k)f(x_i) + (x_k - x_i)f(x_j) + (x_i - x_j)f(x_k) \right)} \quad \text{si } x_j < x_i < x_k \text{ ou } x_k < x_i < x_j \\
 x' = \frac{(x_j^2 - x_k^2)f(x_i) + (x_k^2 - x_i^2)f(x_j) + (x_i^2 - x_j^2)f(x_k)}{2 \left((x_j - x_k)f(x_i) + (x_k - x_i)f(x_j) + (x_i - x_j)f(x_k) \right)} \left. \begin{array}{l} \text{si } x' < x_j \\ x^* = x' \\ x'_k = 3x_i - 2x_i \end{array} \right\} \\
 x^* = \frac{(x_j^2 - x_k'^2)f(x_i) + (x_k'^2 - x_i^2)f(x_j) + (x_i^2 - x_j^2)f(x_k)}{2 \left((x_j - x'_k)f(x_i) + (x'_k - x_i)f(x_j) + (x_i - x_j)f(x_k) \right)} \left. \begin{array}{l} \text{else} \\ x'_k = 3x_i - 2x_i \end{array} \right\} \\
 x' = \frac{(x_j^2 - x_k^2)f(x_i) + (x_k^2 - x_i^2)f(x_j) + (x_i^2 - x_j^2)f(x_k)}{2 \left((x_j - x_k)f(x_i) + (x_k - x_i)f(x_j) + (x_i - x_j)f(x_k) \right)} \left. \begin{array}{l} \text{si } x' > x_j \\ x^* = x' \\ x'_k = 3x_i - 2x_i \end{array} \right\} \\
 x^* = \frac{(x_j^2 - x_k'^2)f(x_i) + (x_k'^2 - x_i^2)f(x_j) + (x_i^2 - x_j^2)f(x_k)}{2 \left((x_j - x'_k)f(x_i) + (x'_k - x_i)f(x_j) + (x_i - x_j)f(x_k) \right)} \left. \begin{array}{l} \text{else} \\ x'_k = 3x_i - 2x_i \end{array} \right\} \\
 x^* = \frac{(x_j'^2 - x_k^2)f(x_i) + (x_k^2 - x_i^2)f(x_j) + (x_i^2 - x_j'^2)f(x_k)}{2 \left((x'_j - x_k)f(x_i) + (x_k - x_i)f(x_j) + (x_i - x'_j)f(x_k) \right)} \left. \begin{array}{l} \text{si } x_i < x_k < x_j \\ \text{ou } x_j < x_k < x_i \end{array} \right\}
 \end{array} \right\} \text{si } x_i < x_j < x_k \quad (23)$$

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

L'efficacité de la méthode GQI en matière d'optimisation est démontrée par l'application de la fonction de minimisation. Cette fonction présentée ci-dessous

$$f(x) = x^2 - 10 \cos(2\pi x) + 10 \quad (4.76)$$

$$x \in [0.6, 2] \quad (4.77)$$

Avec

4.2.4 Stratégie d'exploitation

L'exploitation fait référence à la capacité d'un algorithme à rechercher minutieusement l'ensemble de l'espace variable afin d'identifier les zones prometteuses susceptible des contenir les solutions optimale globale, en évitant les optimums locaux ou les convergences prématurées. En recherchant différences régions, l'exploitation permet d'éviter de négliger des zones potentielles et de découvrir les solutions diverses et améliorées. La méthode GQI est employée pour déterminer la stratégie d'exploitation dans le QIO proposée.

Pour identifier les régions prometteuses, deux individus choisis au hasard dans la population actuelle et l'individu actuel sont utilisée conjointement dans la méthode GQI, et le minimiser de la fonction d'interpolation formée par les trois positions est obtenu. Parallèlement, le troisième individu choisi au hasard dans la population actuelle est utilisée pour produire la nouvelle solution candidate. Cela permet d'améliorer la diversité de la population. Lors de l'exploration à l'aide de la méthode GQI, la position de l'individu actuel est mise à jour comme suit :

$$v_i(t+1) = x_{i,rand1,rand2}^*(t) + w_1 \cdot (x_{rand1,rand2}(t) - x_{i,rand1,rand2}^*(t)) + round(0.5) \cdot (0.05 + r_1) \cdot \log \frac{r_2}{r_3} \quad (4.78)$$

$$x_{i,rand1,rand2}^*(t) = GQI(x_i(t), x_{rand1}(t), x_{rand2}(t), fit(x_i(t)), fit(x_{rand1}(t)), fit(x_{rand2}(t))) \quad (4.79)$$

Dans l'approche, trois individus x_{rand1} , x_{rand2} et x_{rand3} sont choisis aléatoirement dans la population courante. La fonction fitness $fit(\cdot)$ permet d'évaluer la qualité de chaque individu

La fonction GQI utilise ces trois individus aléatoires ainsi que l'individu courant x_i pour calculer le mini d'une fonction d'interpolation quadratique. Cela permet d'orienter la recherche vers des régions prometteuses de l'espace

Pour équilibrer exploration et exploitation au cours de l'optimisation, un paramètre de poids d'exploration w_1 est introduit. Ce poids peut être adapté dynamiquement à l'aide d'un coefficient b , afin de guider l'algorithme depuis l'exploration initiale jusqu'à la convergence vers l'optimum.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Le coefficient adaptif b , est exprimé comme suit

$$w_1 = 3n_1b \quad (4.80)$$

$$b = 0.7\alpha + 0.15\alpha\left(\cos\left(\frac{5\pi t}{T}\right) + 1\right) \quad (4.81)$$

$$\alpha = \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \quad (4.82)$$

Avec

n_1 : La distribution normale standard

t : le nombre d'itérations

T : le nombre maximum d'itérations

4.2.5 Stratégie d'exploitation :

L'exploration et l'exploitation sont souvent opposées dans l'algorithme d'optimisation. L'exploitation vise à perfectionner la meilleure solution trouvée jusqu'à présent par des recherches locales, dans le but d'accélérer la convergence vers l'optimum global.

Lors de l'étape d'exploitation de QIO, deux individus sont sélectionnés aléatoirement dans la population courante, et le meilleur individu trouvé jusqu'à présent est utilisée dans la méthode GQI pour créer une nouvelle solution améliorée

La recherche de la solution optimale globale dans la région entourant ce minimiseur est une piste prometteuse pour l'algorithme. Ainsi, durant l'exploitation par QIO, la position de l'individu courant est mise à jour de la manière suivante :

$$v_i(t+1) = x_{best,rand1,rand2}^*(t) + w_2 \cdot (x_{best}(t) - \text{round}(1 + \text{rand}) \frac{U_b - L_b}{U_b^{rD} - L_b^{rD}} \cdot x_i^{rD}(t)) \quad (4.83)$$

4.3 Méthode d'optimisation de la recherche de nourriture pour l'anguille électrique EEFO

Les anguilles électriques sont des prédateurs remarquables sans le monde animal. Elles proviennent d'Amérique du sud dans la famille Gymnotidae et sont connues pour leur capacité de décharge électrique frappante dans les eaux douces. Les adultes peuvent libérer une tension de 300-800V pour étourdir leurs proies et les manger, les faisant surnommer "fils haute tension" dans l'eau. Elles possèdent trois paires d'organe électrique contenant des milliers de cellules génératrices d'électricité appelées électrocytes[110].

Les anguilles utilisent des décharges électriques à faible tension pour se repérer et localiser rapidement leurs proies malgré leur mauvaise vue. Elles utilisent également ces décharges à haute tension comme moyen de défense et de communication entre elles. Lorsqu'elles repèrent une proie, elles émettant rapidement une décharge électrique plus importante pour l'étourdir, ce qui est une stratégie de prédation très efficace.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Les nouvelles études suggèrent que les anguilles électriques sont des créateurs basées sur l'essaim. Comme les mammifères, elles emploient une prédation sociale pour chasser.

Lorsqu'elles chassent en groupe, elles ont tendance à se rassembler, à nager en cercle et à rassembler les bancs de poissons en une "boule de proies" avant de lancer conjointement une attaque prédatrice à haute tension.[111] Cette stratégie de chasse collective augmente les chances d'obtenir davantage de proies, en particulier lorsqu'il y a une abondance de poissons. C'est ce comportement optimisé qui a inspiré la conception de l'algorithme EEFO.[110]

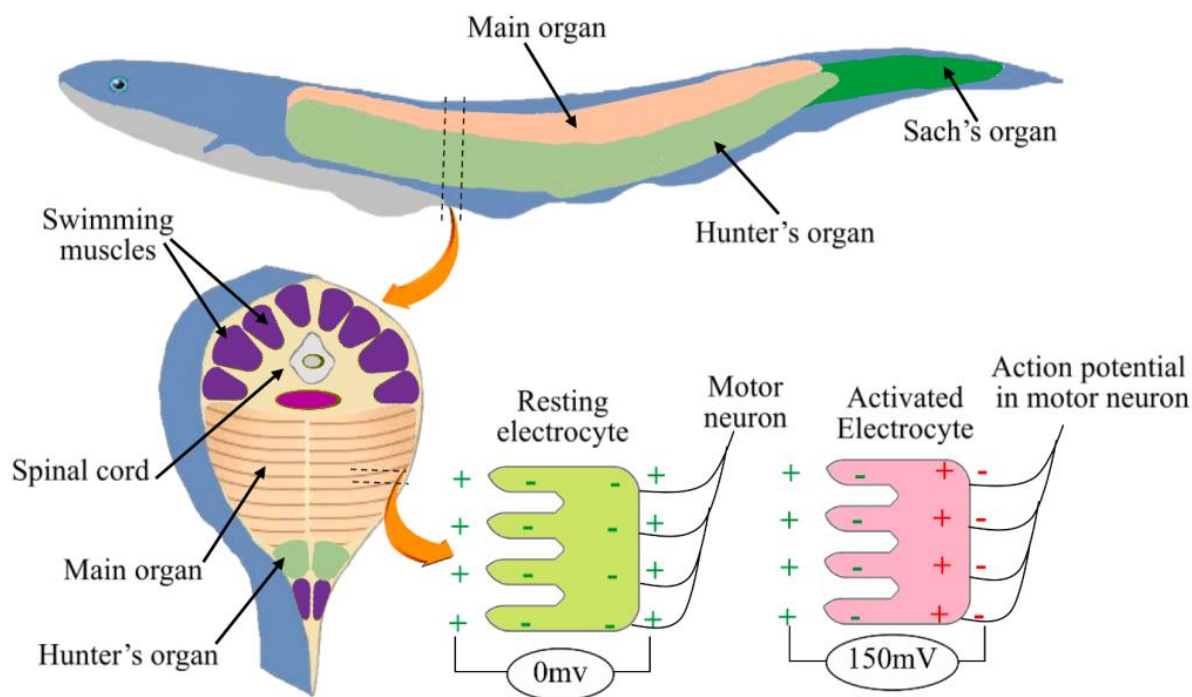


Figure 24: structure et organe de production des anguilles électrique

4.3.1 Modèle mathématique et algorithme

L'algorithme EEFO (Exploitive-Exploratory Firefly Optimisation) s'inspire directement du comportement de prédation sociale des anguilles électrique pour modéliser ses phases d'exploitation

La phase d'exploitation d'EEFO imite le comportement de chasse en groupe des anguilles, ou elles se coordonnent pour encercler leurs proies. La phase d'exploitation s'inspire quant à celle des comportements de migration et d'itération des anguilles.

Les modèles mathématiques sous-jacents aux comportements de recherche de nourriture d'EEFO sont donc directement tirés de l'observation approfondie des stratégies de prédation sophistiquées des anguilles électrique.

4.3.2 Interaction

Selon les observations, lorsque les anguilles électriques rencontrent un ban de poissons, elles interagissent en nageant et en se retournant les unes contre les autres Smithsonian et al[112]. Ensuite, elles commencent à nager dans un cercle géant électrifié pour piéger de nombreux petit poissons au centre du cercle.

Dans l'algorithme EEFO, chaque l'anguille électrique est représentée comme une solution candidate et la meilleurs solution candidate obtenue à chaque étape est considérée comme la proie de visée. L'interaction dans EEFO indique que chaque anguille interagit de manière coopérative avec d'autres individus en utilisant les informations sur les positions des anguilles. Ce comportement peut être assimilé à la phase d'exploration globale.

Plus précisément, une anguille électrique interagir avec une anguille choisie aléatoirement dans la population en utilisant les informations de position tous les individus. La mise a jour de la position d'une anguille consiste à comparer la disparité entre l'anguille choisie au hasard et le centre de la population.

De plus, une aguille électrique peut interagir avec d'autre anguilles sélectionnées au hasard au sein de la population en utilisant les informations relatives à leur position dans l'espace de recherche. La position de l'anguille est alors mise à jour en déterminent la différence entre une anguille choisie au hasard et une anguille aléatoirement dans l'espace de recherche.

L'interaction entre les anguilles est marque par un mouvement aléatoire dans diverses directions, appelé "rotation" dans le modèle[111]

$$C = n_1 \times B \quad (4.84)$$

$$n_1 \sim N(0,1) \quad (4.85)$$

$$B = [b_1, b_2, \dots, b_k, \dots, b_d] \quad (4.86)$$

$$b(k) = \begin{cases} 1 & \text{si } K == g\{l \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4.87)$$

$$g = \text{randperm}(d) \quad (4.88)$$

$$l = 1, \dots, \left\lceil \left(\frac{T-t}{T} \times r_1 \times (d-2) + 2 \right) \right\rceil \quad (4.89)$$

D'où

T : le nombre maximum d'itération.

$$\begin{cases} \begin{cases} V_{i(t+1)} = x_i(t) + C \times (\bar{x}(t) - x_i(t)) p_1 > 0.5 \\ V_{i(t+1)} = x_j(t) + C \times (x_r(t) - x_i(t)) p_1 \leq 0.5 \end{cases} & \text{fit}(x_j(t)) < \text{fit}(x_i(t)) \\ \begin{cases} V_{i(t+1)} = x_i(t) + C \times (\bar{x}(t) - x_j(t)) p_2 > 0.5 \\ V_{i(t+1)} = x_j(t) + C \times (x_r(t) - x_j(t)) p_2 \leq 0.5 \end{cases} & \text{fit}(x_j(t)) \geq \text{fit}(x_i(t)) \end{cases} \quad (4.90)$$

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t) \quad (4.91)$$

$$x_r = \text{Low} + r \times (\text{Up} - \text{Low}) \quad (4.92)$$

$$j \neq i \quad (4.93)$$

Avec

p_1 et p_2 : Les nombres aléatoires compris entre 0 et 1.

$fit(x_i)$: L'amplitude de la position candidate de la $i^{ème}$ anguille électrique.

x_j : La position d'une anguille choisie au hasard dans la population actuelle

n : est la taille de la population ;

r_1 : Le nombre aléatoire compris entre 0 et 1.

Low et Up sont les limites inférieure et supérieure, respectivement.

Selon l'équation (89), l'interaction des comportements permet aux anguilles électrique de se déplacer vers différentes positions dans l'espace de recherche, ce qui peut contribuer de manière significative à l'exploration de l'EEFO dans l'ensemble de l'espace de recherche.

4.3.3 La zone de repos

Dans l'EEFO, la zone de repos doit être établie avant que les anguilles électriques n'adoptent un comportement de repos.

Pour améliorer l'efficacité de la recherche, une zone de repos est établie dans la région où l'une des dimensions du vecteur de position d'une anguille est projetée sur la diagonale principale de l'espace de recherche. Pour identifier une zone de repos pour une anguille, l'espace de recherche et la position de l'anguille sont normalisés dans une fourchette de 0 et 1. Une dimension de la position de l'anguille

Dimension de la position de l'anguille choisie au hasard est projetée sur la diagonale principale de l'espace de recherche normalisé. La position projetée est considérée comme le centre de la zone de repos de l'anguille.

Pour déterminer la zone de repos d'une anguille dans l'espace 2D et 3D respectivement s'écrit comme suit :

$$\{X | X - Z(t) \leq \alpha_0 \times |Z(t) - x_{prey}(t)|\} \quad (4.94)$$

$$\alpha_0 = 2 \cdot (e - e^{\frac{1}{T}}) \quad (4.95)$$

$$Z(t) = \text{low} + z(t) \times (\text{Up} - \text{Low}) \quad (4.96)$$

$$Z\{t\} = \frac{x_{rand\{n\}}^{rand\{d\}}\{t\} - Low^{rand\{d\}}}{Up^{rand\{d\}} - Low^{rand\{d\}}} \quad (4.97)$$

Avec :

x_{prey} : Le vecteur position de la meilleure solution obtenue jusqu'à présent ;

α_0 : L'échelle initiale de la zone de repos

Le terme $a_0 \times |Z(t) - x_{prey}(t)|$ indique la portée de l'aire de repos,

$x_{rand\{n\}}^{rand\{d\}}$: La position aléatoire d'un individu choisi au hasard dans l'aire de repos d'un individu choisi au hasard dans la population actuelle.

Z : le nombre normalisé.

La position de repos d'une anguille est obtenue à l'intérieur de son aire de repos avant d'effectuer le comportement de repos s'exprime comme suit :

$$R_i(t + 1) = Z(t) + a \times |Z(t) - x_{prey}(t)| \quad (4.98)$$

$$a = a_0 \times \sin 2\pi r_2 \quad (4.99)$$

Avec :

a : L'échelle de l'aire de repos

r_2 : Le nombre aléatoire compris entre 0 et 1

L'échelle a permet de réduire l'étendu de la zone de repos au fur et a mesure des itérations. Cela signifie qu'une anguille met à jour sa position vers la zone de repos avec sa position de repos dans sa zone de repos. Le comportement de repos peut être représenté comme suit :

$$v_i(t + 1) = R_i(t + 1) + r_2 \times (R_i(t + 1) \text{round}(\text{rand}) \times x_i(t)) \quad (4.100)$$

$$n_2 \sim N(0,1) \quad (4.101)$$

4.3.4 La chasse

Lorsque les anguilles trouvent une proie, elles ne se contentent pas d'essaimer pour le chasseur. Au contraire, elles ont tendance à nager de manière coopérative en formant un grand cercle et encercler la proie. Pendant ce temps, elle communique et coopèrent constamment avec leurs paires par le bais de faibles décharges électrique des organes.

Au fur et à mesure que l'interaction entre les anguilles s'intensifie, le cercle électrifié diminue. Enfin, les anguilles poussent les poissons de la partie la plus profond :

$$X|X - x_{prey}(t) \leq \beta_0 \times |\bar{x}(t) - x_{prey}(t)| \quad (4.102)$$

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Avec :

$$\beta_0 = 2 \times (e - e^{\frac{1}{T}}) \quad (4.103)$$

Avec :

β_0 : L'échelle initiale de la zone de chasse.

D'après l'équation 18, l'anguille se concentre sur la proie x_{prey} , son aire de chasse étant déterminée par le terme :

$$\beta_0 \times |\bar{x}|(t) - x_{prey}(t). So . \quad (4.104)$$

Ainsi, une nouvelle position du gris par rapport à sa position précédente dans la zone de chasse peut être générée comme suit :

$$H_{prey}(t + 1) = x_{prey}(t) + \beta \times |\bar{x}(t) - x_{prey}(t) \quad (4.105)$$

D'où :

$$\beta = \beta_0 \times \sin 2\pi r_3 \quad (4.106)$$

Avec :

β : L'échelle de la zone de chasse.

r_3 : Nombre aléatoire compris entre 0 et 1.

Lorsque l'anguille a déterminé la zone de la chasse, elle commence à chercher sa proie. Quand elle repère la nouvelle de la proie, elle s'enroule de manière à ce que sa tête et sa queue se rapprochent avec la proie entre les deux. L'anguille émet alors un courant de haute tension autour de la proie [113, 114],

Le comportement d'enroulement présenté par les anguilles pendant le chasse peut être décrit comme suit

$$v_i(t + 1) = H_{prey}(t + 1) + \eta \times (H_{prey}(t + 1) - \text{round}(\text{rand}) \times x_i(t) \quad (4.107)$$

Avec

$$\eta = e^{r_4(1-t)} \times \cos(2\pi r_4) \quad (4.108)$$

η : Le facteur d'enroulement.

r_4 : Le nombre aléatoire compris entre 0 et 1

4.3.5 Migration

Lorsque les anguilles trouvent une proie, elles ont tendance à migrer de la zone de repos vers la zone de chasse. Pour modéliser mathématiquement le comportement migratoire des anguilles, on utilise l'équation suivante :

$$v_i(t + 1) = r_5 \times R_i(t + 1) + r_6 \eta + \times H_r(t + 1) - L \times H_r((t + 1) - x_i(t)) \quad (4.109)$$

Avec

$$H_r((t + 1) = x_{prey}(t) + \beta \times |\bar{x}(t) - x_{prey}(t)| \quad (4.110)$$

$$L = 0.01 \times \left| \frac{u \cdot \sigma}{|v|^{\frac{1}{b}}} \right| \quad (4.111)$$

$$u, v \sim N(0,1) \quad (4.112)$$

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1+b) \times \sin(\frac{\pi b}{2})}{\Gamma(\frac{1+b}{2}) \times b \times 2^{\frac{b-1}{2}}} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (4.113)$$

D'où

H_r : peut être considérée comme n'importe quelle position dans la zone de la chasse.

$H_r(t + 1) - x_i(t)$: Indique que les anguilles se déplacent vers la zone de la chasse.

L : La fonction de vol de Levy qui est introduite dans la phase d'exploitation de l'EEFO

Γ : La fonction Gamma standard

b=1,5

Une anguille peut percevoir la position de sa proie par le biais d'une fiable décharge électrique et peut donc ajuster sa propre position à tout moment. Si l'anguille sent l'approche de la proie dans le processus de recherche de nourriture, elle se déplace vers la position candidate ; dans le cas contraire, elle reste à sa position actuelle. Les positions des anguilles sont mises à jour par [115] :

$$x_i(t + 1) = \begin{cases} x_i(t) & \text{if } fit(x_i(t)) \leq fit(v_i(t)) \\ v_i(t + 1) & \text{if } fit(x_i(t)) \geq fit(v_i(t + 1)) \end{cases} \quad (4.114)$$

4.3.6 Transition entre l'exploration et l'exploitation

Dans l'EEFO, les comportements de recherche sont déterminés par le facteur énergétique. Ce facteur permet à l'anguille de gérer efficacement la transition entre l'exploration et l'exploitation afin d'optimiser ses performances de recherche. La valeur de ce facteur énergétique est utilisée par l'anguille pour décider entre adopter un comportement d'exploration ou d'exploitation. Lorsque le facteur énergétique est élevé, l'anguille aura tendance à explorer des nouvelles zones. Lorsqu'il est faible, elle se concentrera plutôt sur l'exploitation de zones connues.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Ce mécanisme permet à l'EEFO de trouver un équilibre optimal entre l'exploitation et l'exploration afin de maximiser ses chances de capture de proies, comme les soulignent les travaux de [116]et[117].

Le facteur énergétique s'écrit comme suit :

$$E(t) = 4 \times \sin\left(1 - \frac{t}{T}\right) \times \ln \frac{1}{r_7} \quad (4.115)$$

Avec

r_7 : Le nombre aléatoire compris entre 0 et 1.

D'après l'équation 30, le facteur énergétique diminue au fur et à mesure que les itérations augment, mais il montre également une tendance à l'oscillation. Lorsque $E(t)$ est supérieur à 1, les anguilles effectuent une recherche globale dans l'espace des solutions ce qui correspond à un comportement d'exploration. Lorsque $E(t)$ est inférieur ou égal à 1, les anguilles adoptent un comportement de recherche locale dans une sous-région prometteuse, à travers des comportements de migration, de repos ou de chasse, ce qui correspond à un comportement d'exploitation.

Pour étudier le comportement de recherche de l'EEFO, la probabilité $E > 1$ est évaluée tout au long d'optimisation. Soit

$$\theta = 1 - \frac{t}{T} \quad (4.116)$$

Dans ce cas :

$$E(t) = \sin(\theta) \ln \frac{1}{r_7} \quad (4.117)$$

La probabilité de $E > 0$ est obtenue par :

$$P\{E > 1\} = \frac{\int_0^1 \int_0^{\frac{-1}{4\sin(\theta)}} dr d\theta}{1} = - \int_{-\alpha}^{\frac{-1}{4\sin(1)}} \frac{e^x}{x\sqrt{16x^2 - 1}} \approx 0.5035 \quad (4.118)$$

D'après le résultat de (33), il existe une probabilité d'environ 50% de choisir entre l'exploration et l'exploitation au cours du processus d'optimisation.

4.3.7 Procédure l'EEFO :

Initialisation : l'algorithme commence par initialiser les paramètres de contrôle, la taille de la population d'anguilles électrique et le nombre maximum d'itération.

Exploration vs Exploitation : à chaque itération, le facteur énergétique E est évalué :

-Si $E > 1$, chaque anguille effectue une exploration en utilisant le comportement d'interaction.

-Si $E > 1$: chaque anguille exploite en utilisant aléatoirement l'un des trois comportements suivant : repos, migration ou chasse

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Mise à jour des solutions : les nouvelles solutions candidate produite sont comparées aux solutions actuelles, et la meilleurs solution trouvée jusqu'à présent est mise à jour {Zhao, 2024 #2557}

Diminution du facteur énergétique : au fur et à mesure des itérations, le facteur énergétique E diminue.

Condition à l'arrêt : cette procédure itérative se poursuit jusqu'à ce que la condition d'arrêt soit atteinte. (Par exemple, jusqu'à la dernier itération)

4.4 Fonction objective

La méthode traditionnelle consiste à minimiser une fonction, définie en termes d'écart entre les paramètres de réponse mesurés (fréquences naturelles, etc.) et ceux calculés.

Ces paramètres de réponse sont obtenus soit par des essais expérimentaux, soit par des simulations de scénario de fissuration. Ils dépendent des variables de décision que sont la profondeur de la fissure a et de l'emplacement de la fissure x_j .

Le nombre total de variable de décision est égal à deux fois le nombre de fissures supposées dans la structure. Ainsi, même pour le cas d'une seule fissure, le problème est formulé en considérant trois fissures potentielles.

La fonction objectif a minimisé s'écrit alors :

$$F(a, x_j) = \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{f_i^*}{f_i} \right) - 1 \right)^2 \right\}}$$

Ou

f_i^* : La fréquence de la structure fissurée mesuré expérimentalement

f_i : La fréquence calculée à partir de la simulation du comportement dynamique de la structure.

Selon la section précédente, l'indicateur MSEBI a pu prédire correctement l'emplacement des éléments endommagée dans les trois poutres étudiées, deux techniques d'optimisation sont utilisées pour identifier les dommages. L'algorithme QIO et EEFO, la fonction de fitness est définis comme la différence entre la valeur de MSEBI mesuré et la valeur de MSEBI calculé. Cette fonction est calculée a laides de l'équation suivante

$$OF = \sum_{j=1}^N |(DI_{MSEBI})^{Mesuré} - (DI_{MSEBI})^{Calculé}|$$

4.5 Résultat d'optimisation

4.5.1 Quantification des dommages

Cette étude a proposé une approche innovante pour la quantification des dommages structurels, en utilisant deux techniques d'optimisation implantés dans MATLAB R2023-b avec un Pc DELL d'un processeur Intel(R) Core (TM) i5-6300 U CPU @ 2.40GHz 2.50 GHz. La méthode commence par trouver la profondeur de la fissure des éléments endommager de la structure à l'aide de l'indicateur MSEBI. Deux méthodes d'optimisation sont ensuite employées pour quantifier précisément.

Alors nous présentant les résultats des deux techniques d'optimisations qui sont EEFO et QIO pour les trois poutres encastré des deux côtés à 27 élément, ainsi que pour la poutre flexible libre a 16 éléments et finalement poutre simple a 30 éléments.

4.6 Résultats d'applications

En raison de leur importance pratique, le problème d'identification d'endommagement dans les structure a fait l'objet d'une enquête approfondie et nombreuse méthodes ont été proposé. Dans ce travaille la méthode de détection d'endommagement qui est basée sur la méthode énergétique MSEBI a été utilisé.

4.6.1 Application sur une poutre Encastré-Encastré

Après avoir détecté des fissures dans la structure d'une poutre encastrée-encastrée, deux techniques d'optimisation, QIO et EEFO, ont été appliquées pour quantifier les dommages. Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux suivants. Dans le premier cas, en fixant le nombre d'itérations à 100 et en variant les populations, trois essais ont été réalisés avec 30, 100 et 200 populations respectivement. Pour le deuxième cas, en maintenant la population constante à 50 et en modifiant le nombre d'itérations, les simulations ont été conduites avec 100, 500 et 1000 itérations. Les tableaux illustrent les performances respectives de QIO et EEFO pour ces configurations, fournissant ainsi une comparaison détaillée des résultats obtenus pour chaque combinaison de paramètres.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

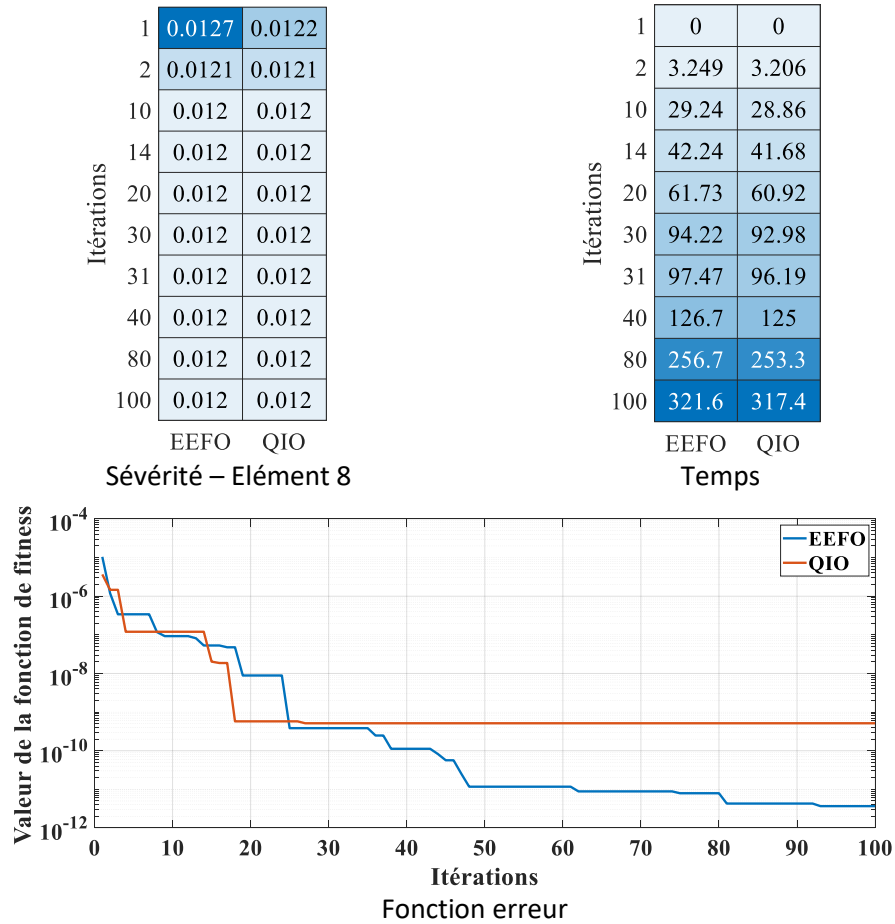


Figure 25: Poutre encasté-encasté – un seule endommagement – Paipetis & Dimarogonas avec 30population et 100 itération.

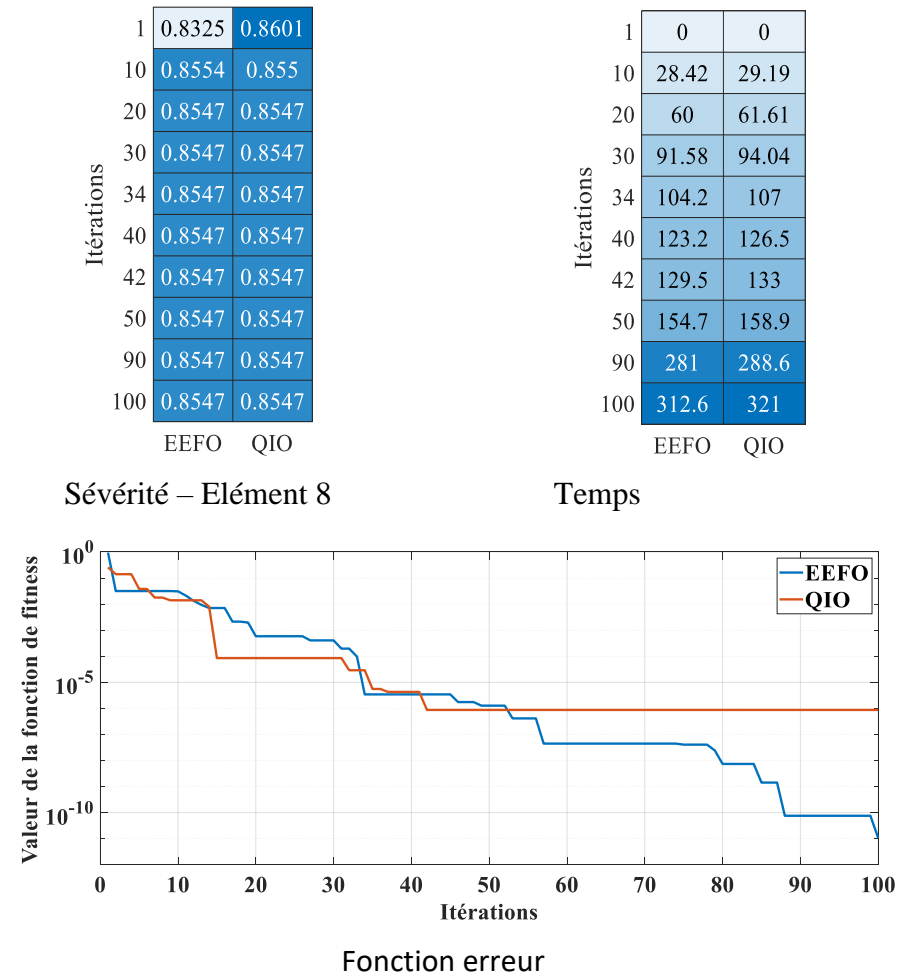


Figure 26 : Poutre encasté-encasté – un seule endommagement – Réduction de rigidité avec 30population et 100 itération.

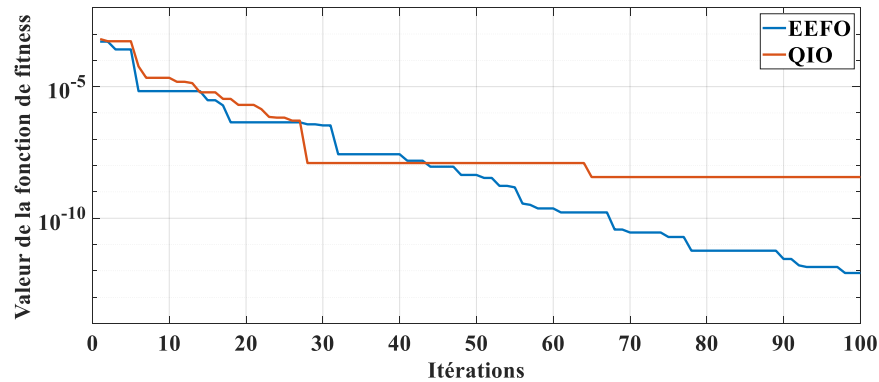
Chapitre IV : Optimisations et quantifications

1	0.0122	0.0122
10	0.012	0.012
18	0.012	0.012
20	0.012	0.012
22	0.012	0.012
30	0.012	0.012
70	0.012	0.012
100	0.012	0.012
	EEFO	QIO

1	0	0
10	29.72	29.48
18	56.14	55.68
20	62.75	62.23
22	69.35	68.78
30	95.77	94.98
70	227.9	226
100	327	324.2
	EEFO	QIO

Sévérité – Elément 8

Temps



Fonction erreur

Figure 27 : Poutre encastré-encastré – un seule endommagement – J.K.Sinha– 30population et 10

1	0.01126	0.01077
10	0.02333	0.01179
50	0.012	0.01195
60	0.01202	0.01201
72	0.012	0.01201
80	0.012	0.012
90	0.012	0.012
91	0.012	0.012
100	0.012	0.012
	EEFO	QIO

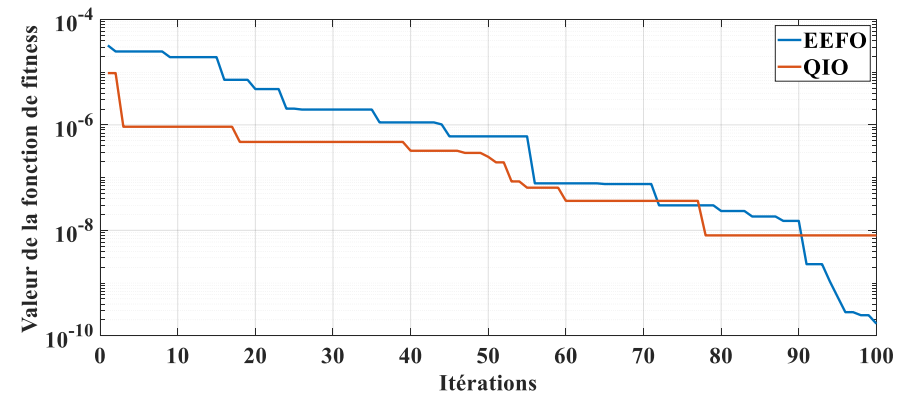
1	0.00392	0.00408
10	0.00383	0.00401
50	0.004	0.004
60	0.004	0.004
72	0.004	0.004
80	0.004	0.004
90	0.004	0.004
91	0.004	0.004
100	0.004	0.004
	EEFO	QIO

1	0	0
10	31.72	31.48
50	57.14	57.68
60	64.75	64.23
72	71.44	71.79
80	97.77	97.98
90	230.1	230.1
91	331	329.2
100	440.4	440.3
	EEFO	QIO

Sévérité – Elément 9

Sévérité – Elément 12

Temps



Fonction erreur

Figure 28 : Poutre encastré-encastré – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 30population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

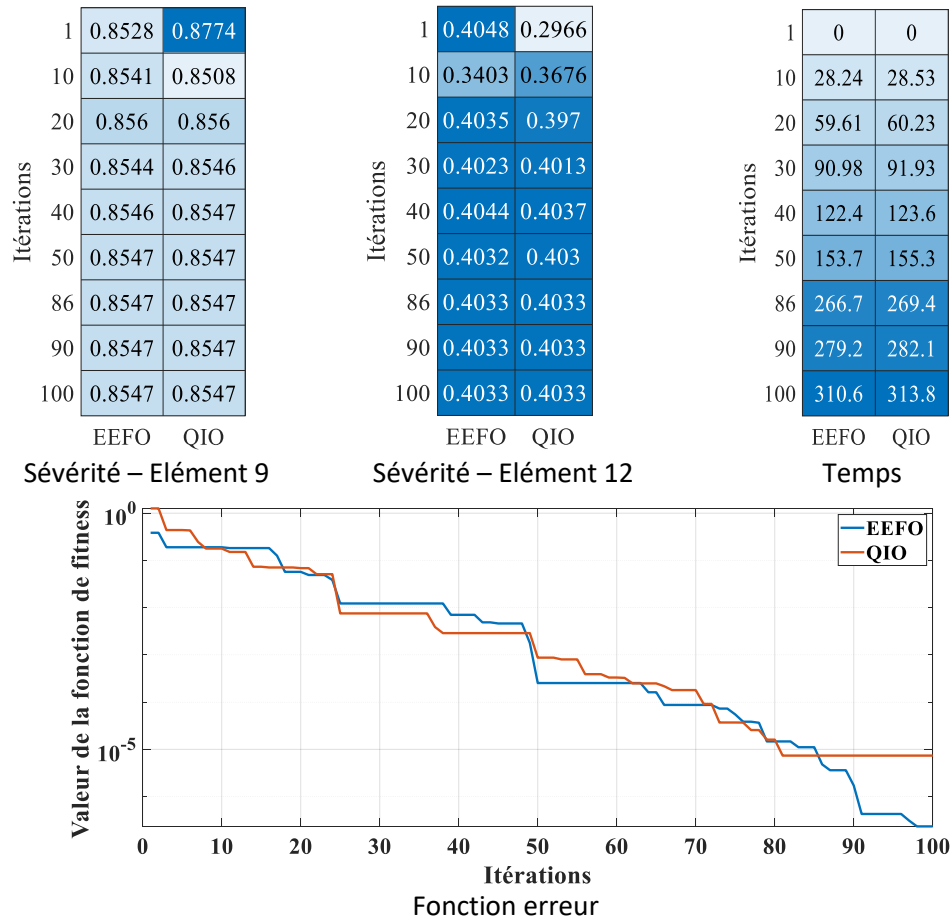


Figure 29 : Poutre encastré-encastré – Deux endommagement – Réduction de rigidité de E– 30population et 100 itération.

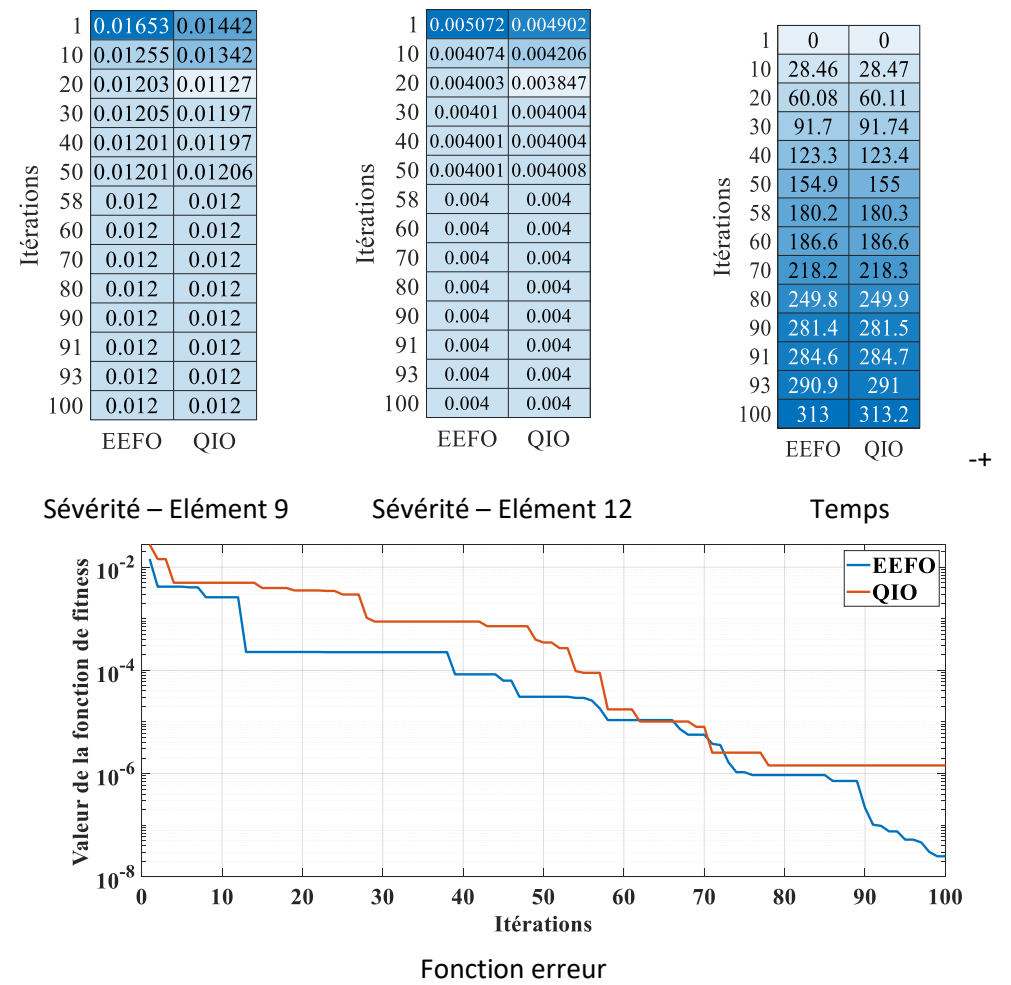


Figure 30: Poutre encastré-encastré – Deux endommagement – J.K .Sinha– 30population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

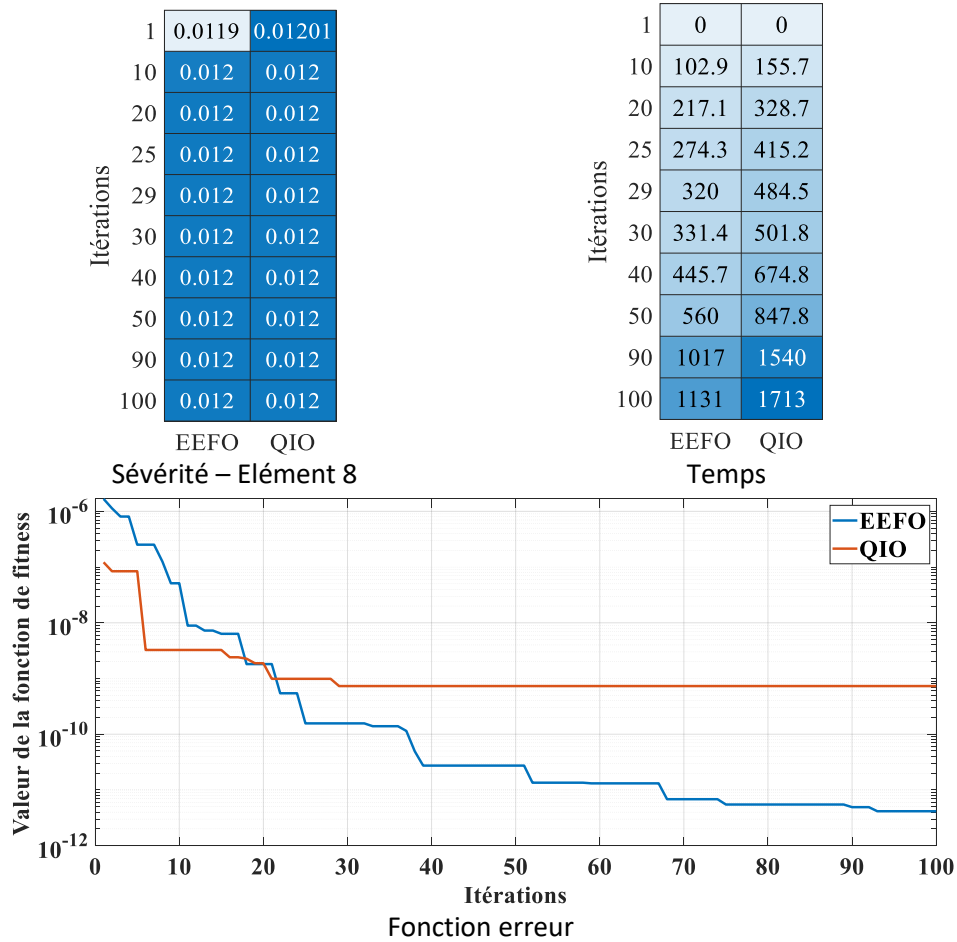


Figure 31 : Poutre encasté-encasté – Un endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 100population et 100 itération.

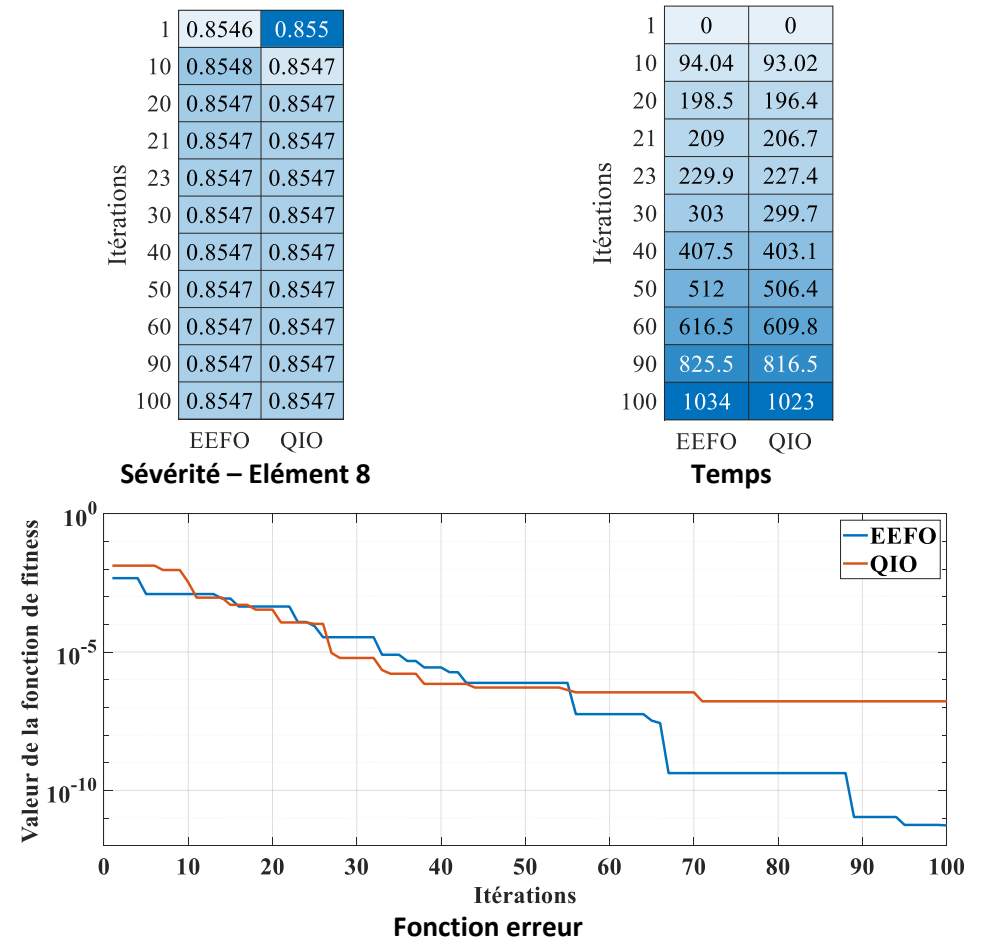


Figure 32 : Poutre encasté-encasté – un seule endommagement – Réduction de rigidité – 100population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

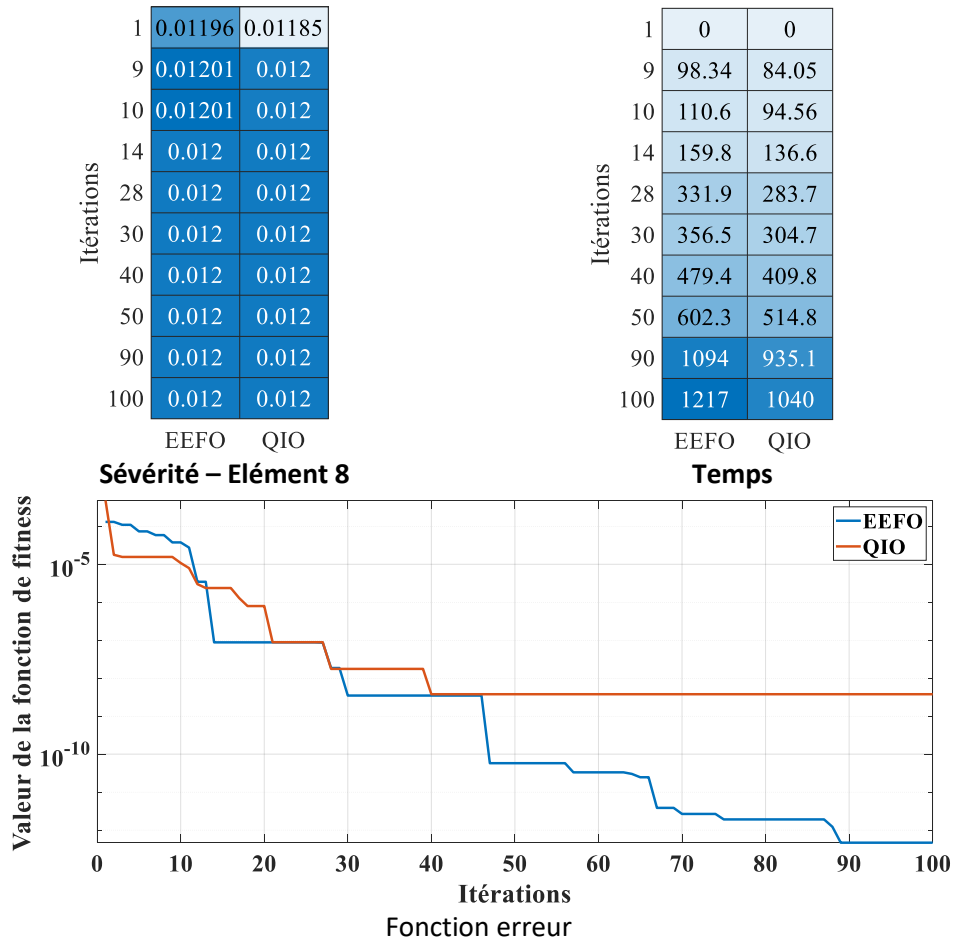


Figure 33 : Poutre encasté-encasté – Un seule endommagement – J.K.Sinha– 100population et 100 itération.

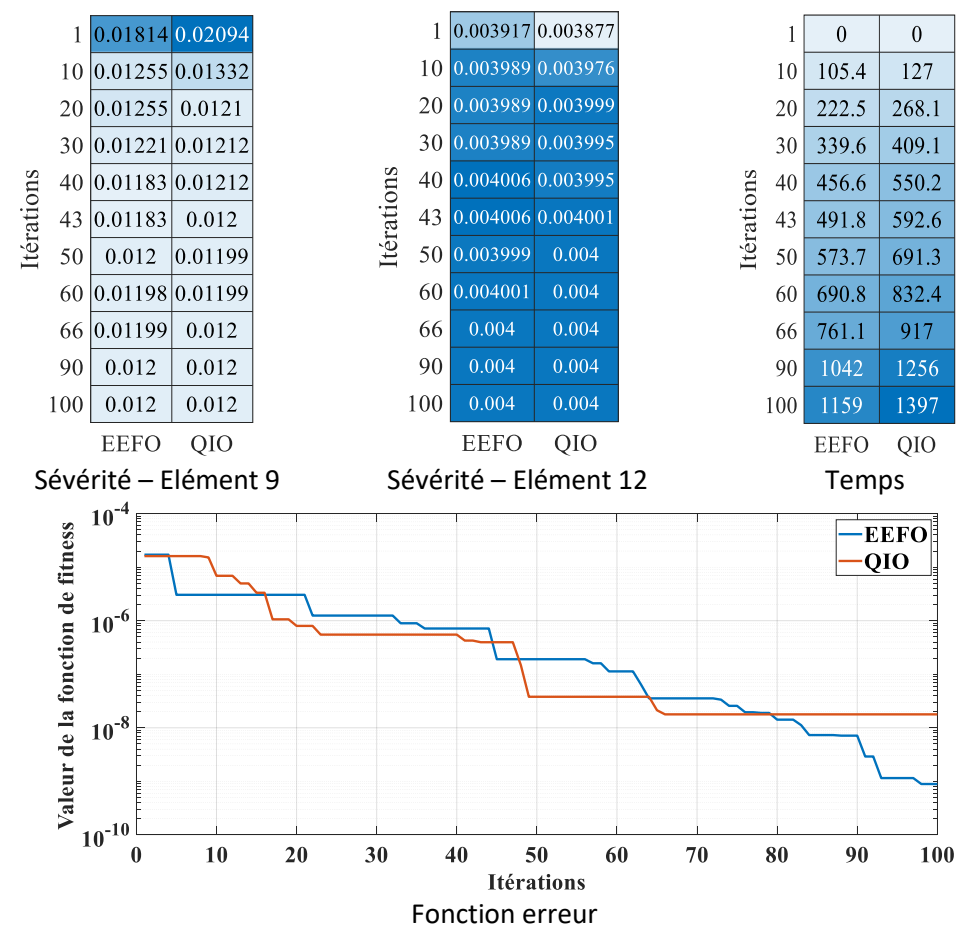


Figure 34 : Poutre encasté-encasté – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 100population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Itérations	Sévérité – Elément 9		Sévérité – Elément 12		Temps	
	EEFO	QIO	EEFO	QIO	EEFO	QIO
1	0.8502	0.8531	0.05161	0.3812	0	0
10	0.8549	0.8531	0.3804	0.3812	96.17	94.59
20	0.8545	0.8545	0.4069	0.4052	203	199.7
24	0.8548	0.8545	0.4004	0.4042	245.8	241.7
30	0.8548	0.8548	0.4013	0.4036	309.9	304.8
37	0.8547	0.8547	0.4023	0.4029	384.7	378.4
40	0.8547	0.8547	0.4029	0.4032	416.7	409.9
50	0.8547	0.8547	0.4033	0.4032	523.6	515
60	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	630.4	620.1
68	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	715.9	704.2
90	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	951	935.4
100	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	1058	1040

Itérations	Sévérité – Elément 9		Sévérité – Elément 12		Temps	
	EEFO	QIO	EEFO	QIO	EEFO	QIO
1	0.01894	0.01746	0.004692	0.005089	0	0
10	0.0137	0.01175	0.004282	0.003986	97.44	96.77
20	0.01159	0.01197	0.003935	0.00397	205.7	204.3
30	0.01211	0.0121	0.004015	0.004037	314	311.8
40	0.01202	0.01187	0.004002	0.003982	422.3	419.3
50	0.01199	0.01201	0.003998	0.004001	530.5	526.9
70	0.012	0.012	0.004	0.004	747.1	741.9
80	0.012	0.012	0.004	0.004	855.3	849.4
81	0.012	0.012	0.004	0.004	866.2	860.2
83	0.012	0.012	0.004	0.004	887.8	881.7
95	0.012	0.012	0.004	0.004	1018	1011
96	0.012	0.012	0.004	0.004	1029	1021
100	0.012	0.012	0.004	0.004	1072	1064

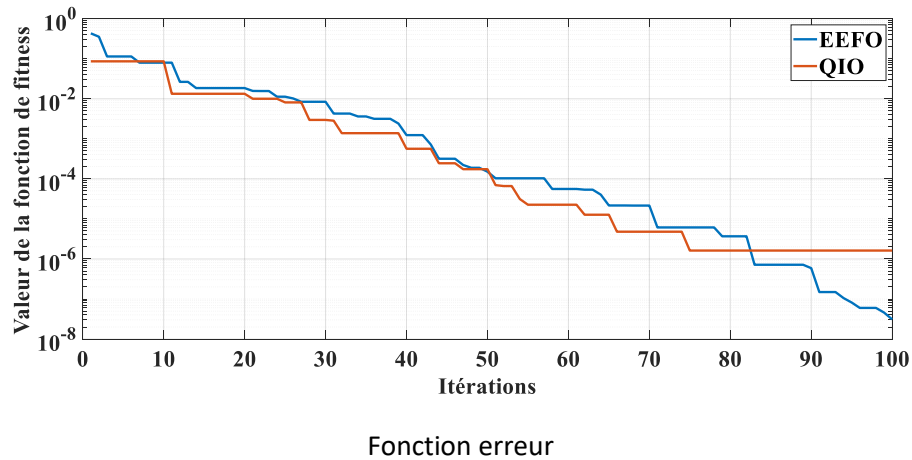


Figure 35 : Poutre encastré-encastré – Deux endommagement – Réduction– 100population et 100 itération.

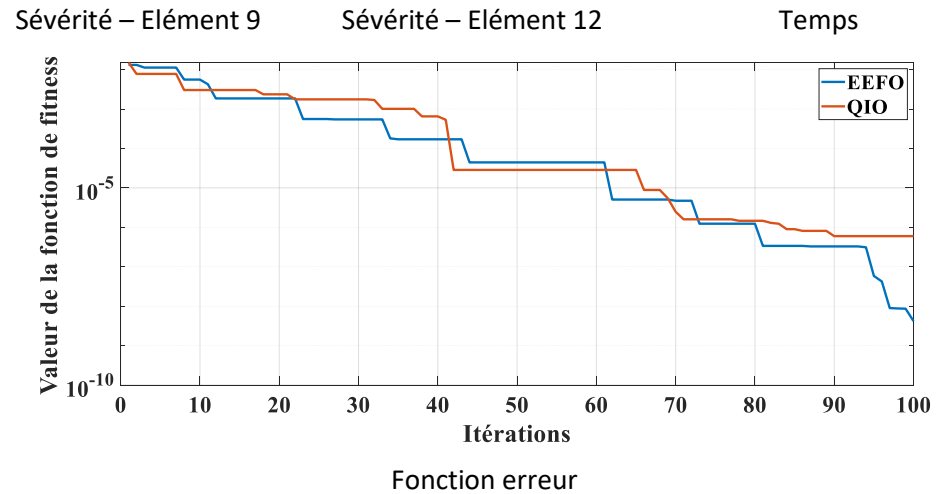


Figure 36 : Poutre encastré-encastré – Deux endommagement – J.K.Sinha– 100population et 100 itération.

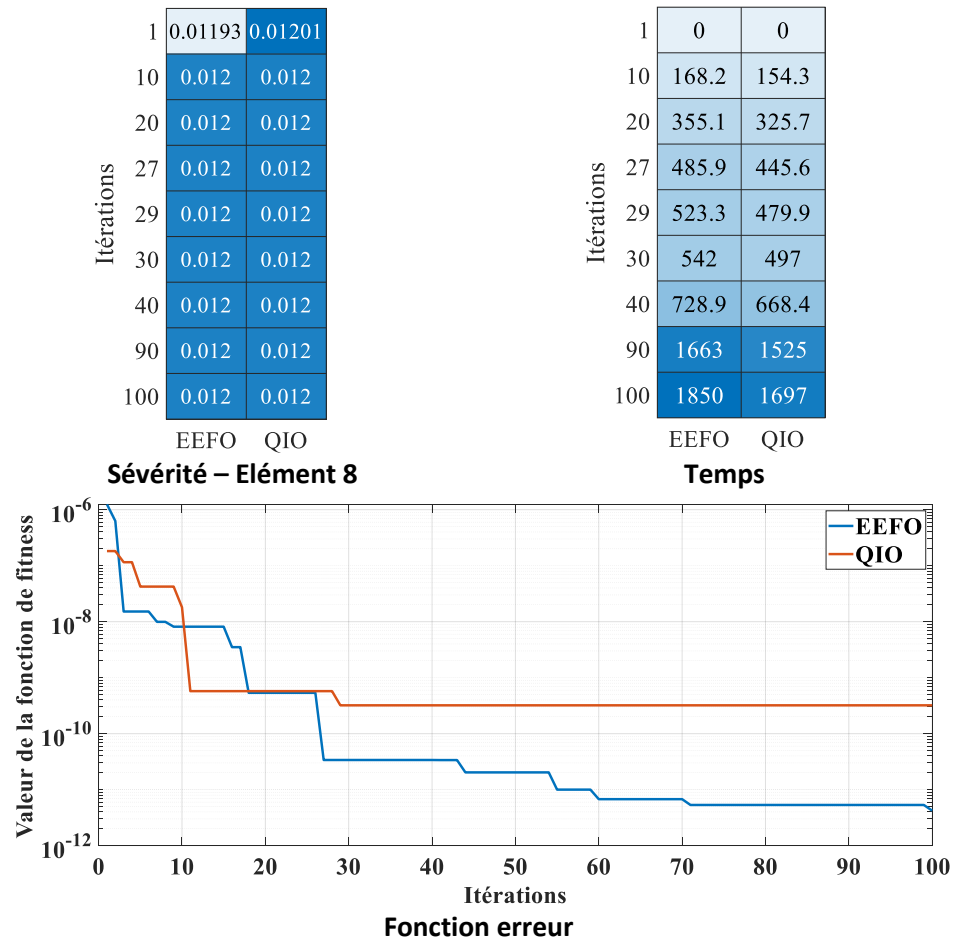


Figure 37 : Poutre encasté-encasté – Un seule endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 200population et 100 itération.

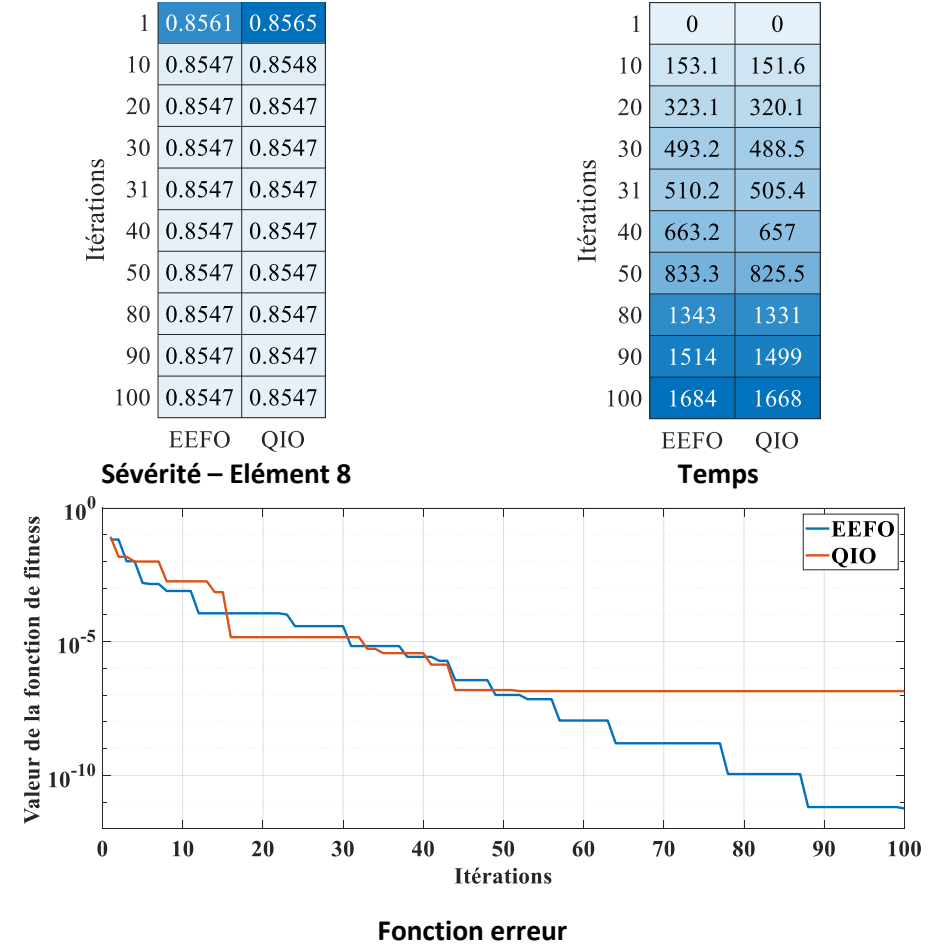


Figure 38 : Poutre encasté-encasté – Un seule endommagement – Réduction de rigidité de E– 200population et 100 itération.

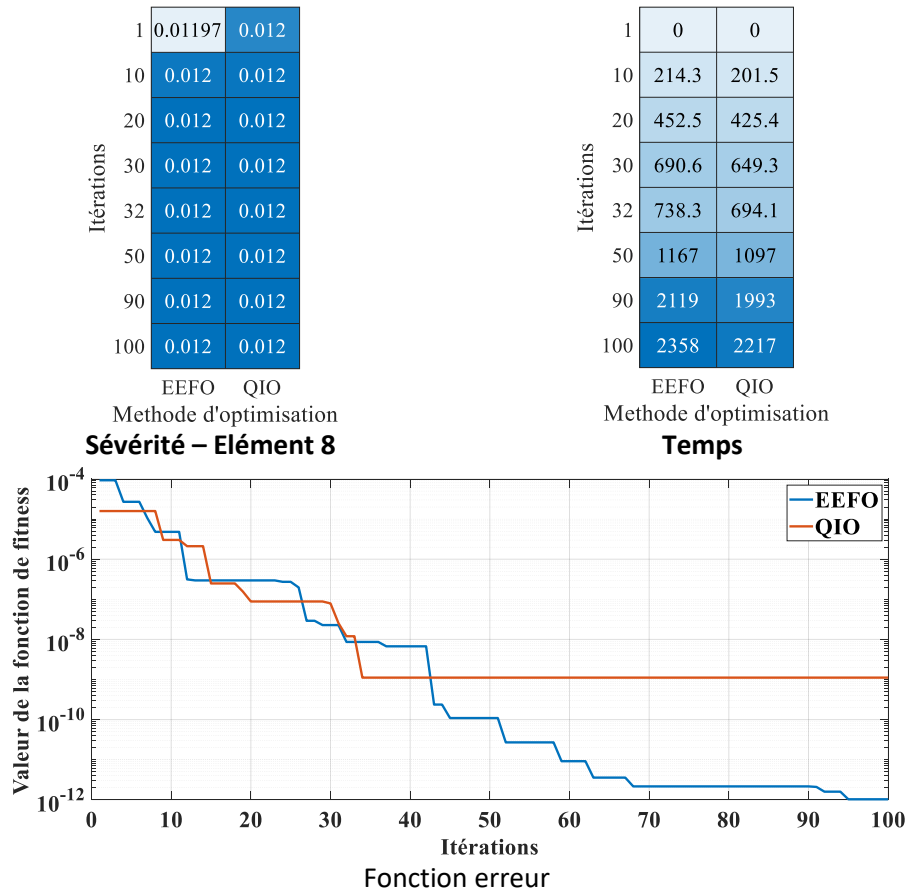


Figure 39 : Poutre encasté-encasté – Un seule endommagement – J.K.Sinha– 200population et 100 itération.

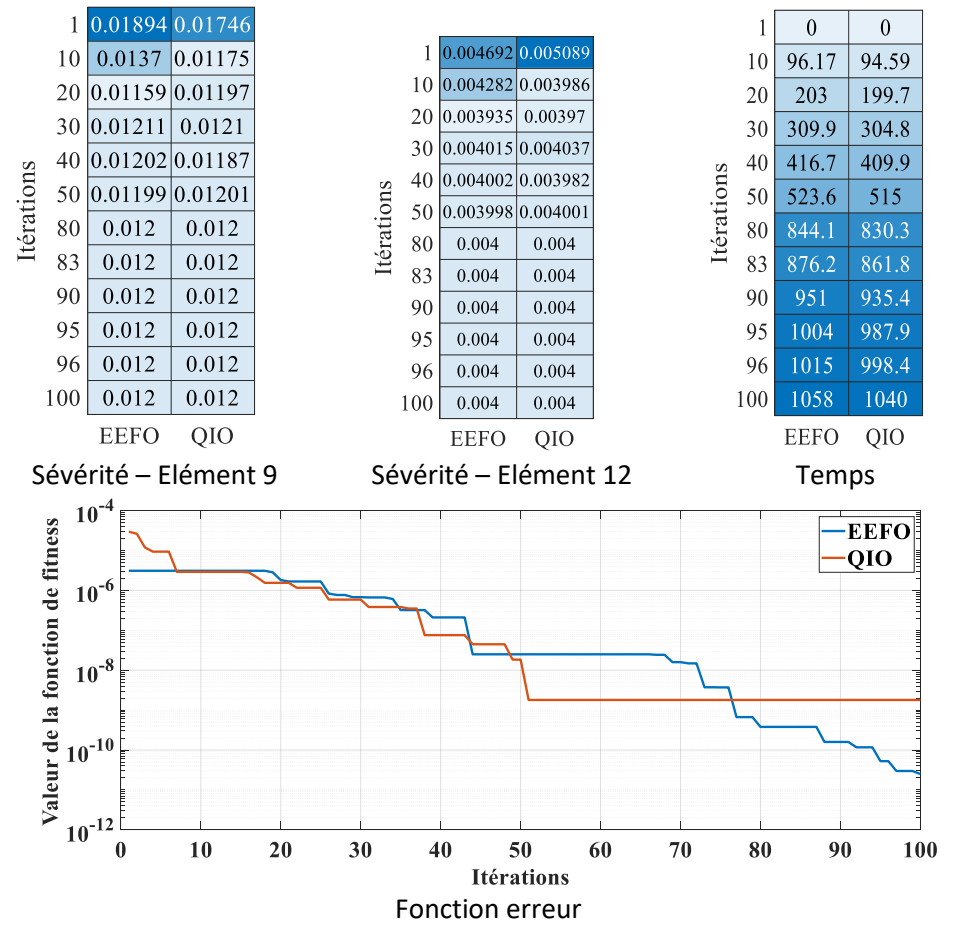


Figure 40 : Poutre encasté-encasté – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 200population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Itérations	EEFO	QIO	EEFO	QIO	EEFO	QIO
1	0.8466	0.8521	0.375	0.297	0	0
10	0.8547	0.8539	0.4066	0.4212	160.7	148.1
18	0.855	0.8539	0.4035	0.4009	303.5	279.8
20	0.855	0.8547	0.4035	0.4013	339.2	312.7
30	0.8546	0.8548	0.4026	0.4028	517.7	477.4
40	0.8547	0.8547	0.4033	0.4034	696.2	642
50	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	874.7	806.6
56	0.8547	0.8547	0.4033	0.4032	981.8	905.3
60	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	1053	971.2
66	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	1160	1070
90	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	1589	1465
100	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	1767	1630

Itérations	EEFO	QIO	EEFO	QIO	EEFO	QIO
1	0.01496	0.01413	0.00439	0.004235	0	0
10	0.01178	0.01185	0.003997	0.003989	160.7	165.2
20	0.01227	0.01188	0.00405	0.003991	339.2	348.7
30	0.01199	0.01208	0.004	0.004016	517.8	532.3
40	0.012	0.012	0.004	0.004	696.3	715.8
60	0.012	0.012	0.004	0.003999	1053	1083
69	0.012	0.012	0.004	0.004	1214	1248
70	0.012	0.012	0.004	0.004	1232	1266
80	0.012	0.012	0.004	0.004	1410	1450
84	0.012	0.012	0.004	0.004	1482	1523
90	0.012	0.012	0.004	0.004	1589	1634
94	0.012	0.012	0.004	0.004	1660	1707
100	0.012	0.012	0.004	0.004	1768	1817

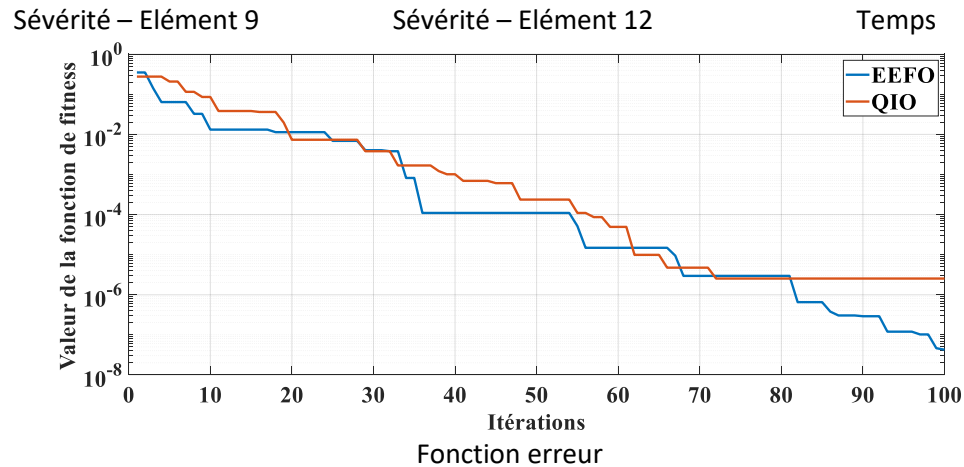


Figure 41 : Poutre encasté-encasté – deux endommagement – Réduction de rigidité de E– 200population et 100 itération.

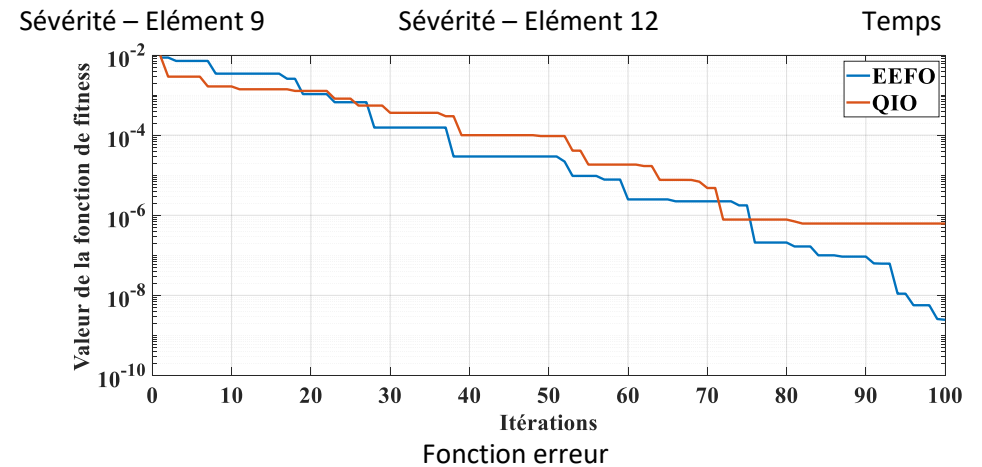


Figure 42 : Poutre encasté-encasté – deux endommagement – J.K.Sinha– 200population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

1	0.01195	0.01231
10	0.01201	0.012
17	0.012	0.012
20	0.012	0.012
29	0.012	0.012
30	0.012	0.012
40	0.012	0.012
50	0.012	0.012
80	0.012	0.012
90	0.012	0.012
100	0.012	0.012

EEFO QIO

Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
10	43.54	41.19
17	77.4	73.22
20	91.92	86.95
29	135.5	128.1
30	140.3	132.7
40	188.7	178.5
50	237.1	224.2
80	382.2	361.5
90	430.6	407.3
100	478.9	453.1

EEFO QIO

Sévérité – Élément 8

Temps

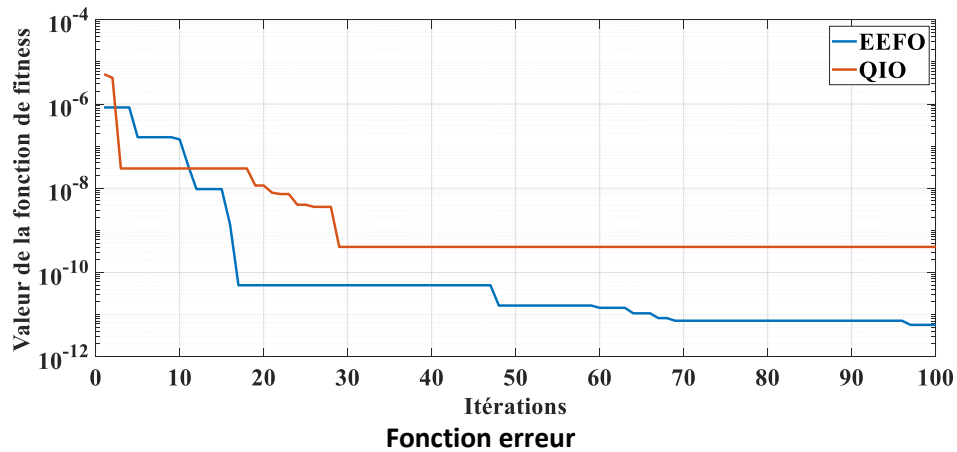


Figure 43 : Poutre encastré-encastré – un seul endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 50population et 100 itération.

1	0.8403	0.8532
10	0.8545	0.8547
20	0.8547	0.8547
30	0.8547	0.8547
40	0.8547	0.8547
46	0.8547	0.8547
50	0.8547	0.8547
80	0.8547	0.8547
90	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547

EEFO QIO

Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
10	39.28	40.39
20	82.92	85.27
30	126.6	130.2
40	170.2	175
46	196.4	202
50	213.8	219.9
80	344.8	354.6
90	388.4	399.4
100	432.1	444.3

EEFO QIO

Sévérité – Élément 8

Temps

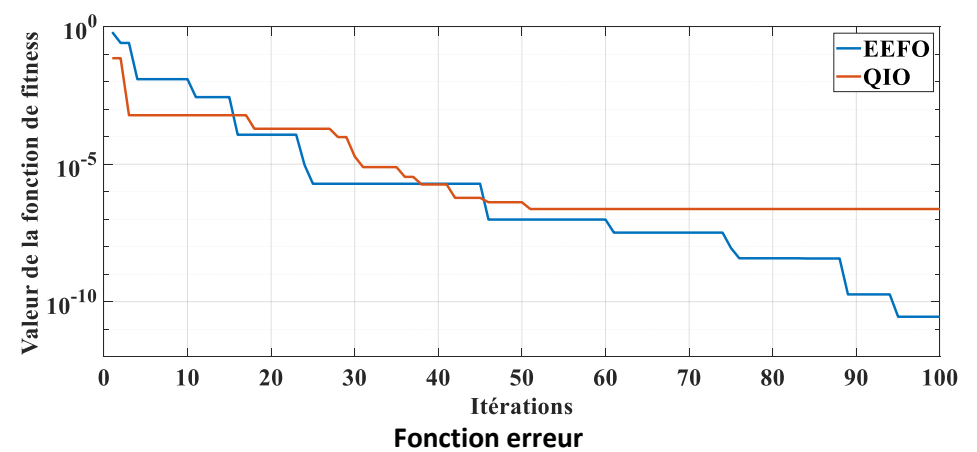


Figure 44 : Poutre encastré-encastré – un seul endommagement – Réduction de rigidité de E – 50population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

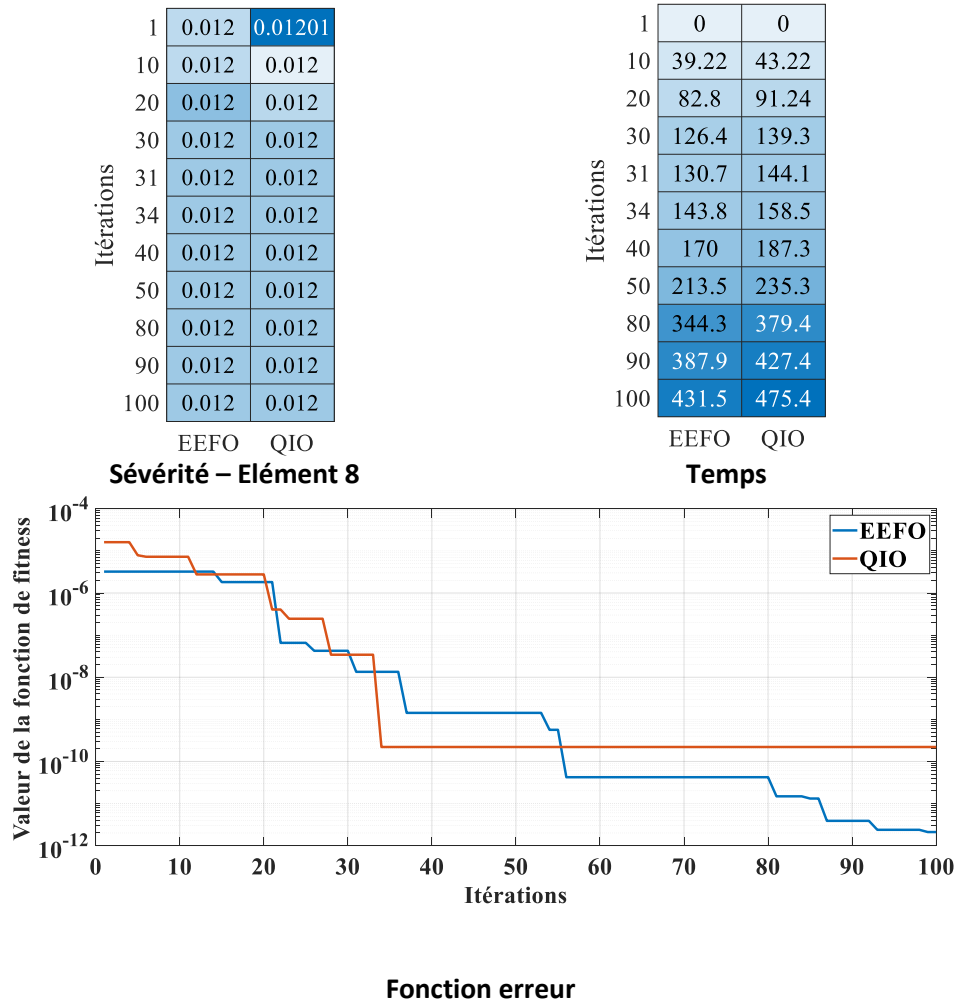


Figure 45 : Poutre encastré-encastré – un seul endommagement – J.K.Sinha – 50 population et 100 itération.

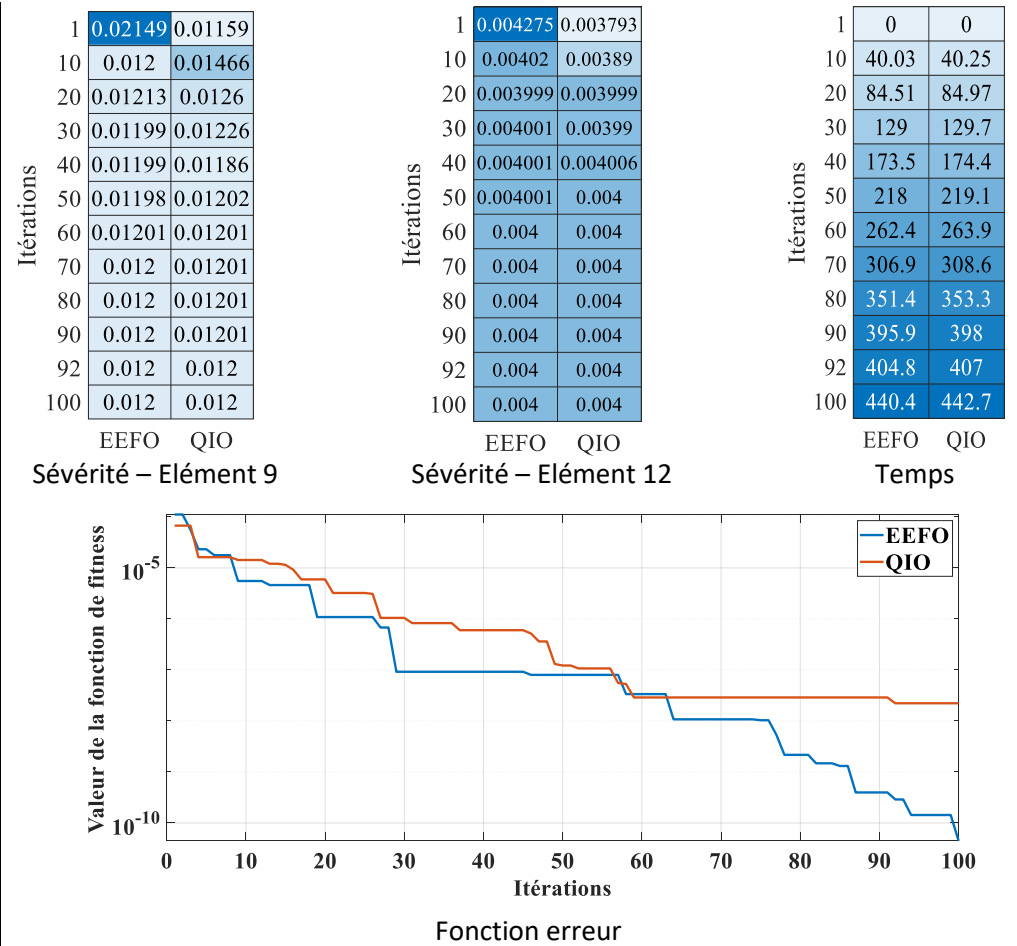


Figure 46 : Poutre encastré-encastré – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas – 50 population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Itérations	EEFO	QIO
1	0.837	0.8531
10	0.8572	0.8531
13	0.8546	0.8531
20	0.8546	0.8549
27	0.8548	0.855
30	0.8547	0.8547
40	0.8547	0.8547
50	0.8547	0.8547
60	0.8547	0.8547
70	0.8547	0.8547
77	0.8547	0.8547
80	0.8547	0.8547
90	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547

Sévérité – Élément 9

Itérations	EEFO	QIO
1	0.149	0.3835
10	0.4145	0.3835
13	0.4001	0.3835
20	0.401	0.3952
27	0.4019	0.4023
30	0.4026	0.4044
40	0.403	0.4033
50	0.4033	0.4032
60	0.4033	0.4033
70	0.4033	0.4033
77	0.4033	0.4033
80	0.4033	0.4033
90	0.4033	0.4033
100	0.4033	0.4033

Sévérité – Élément 12

Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
10	39.03	38.86
13	52.04	51.81
20	82.4	82.04
27	112.8	112.3
30	125.8	125.2
40	169.1	168.4
50	212.5	211.6
60	255.9	254.7
70	299.3	297.9
77	329.6	328.1
80	342.6	341.1
90	386	384.3
100	429.4	427.5

Temps

Itérations	EEFO	QIO
1	0.01259	0.02261
10	0.01259	0.01558
20	0.01159	0.01183
30	0.01185	0.01183
40	0.01196	0.01217
50	0.012	0.01205
60	0.012	0.01201
77	0.012	0.012
84	0.012	0.012
100	0.012	0.012

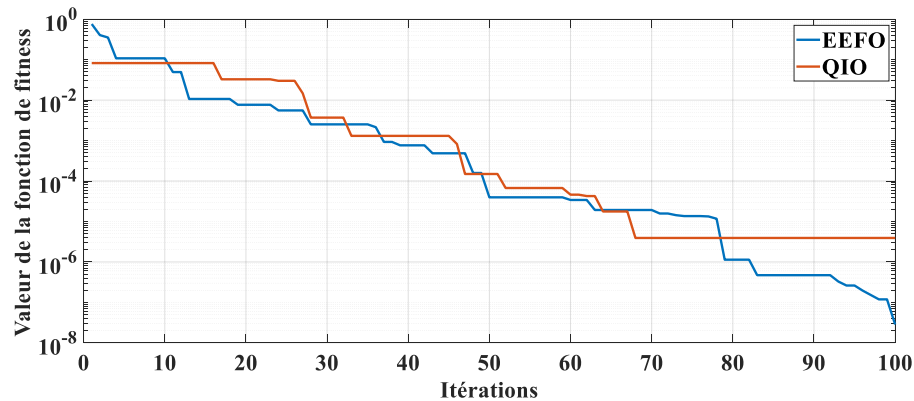
Sévérité – Élément 9

Itérations	EEFO	QIO
1	0.0041	0.004812
10	0.0041	0.004502
20	0.003929	0.003965
30	0.003976	0.003965
40	0.003993	0.004029
50	0.004001	0.004008
60	0.004	0.004002
77	0.004	0.004
84	0.004	0.004
100	0.004	0.004

Sévérité – Élément 12

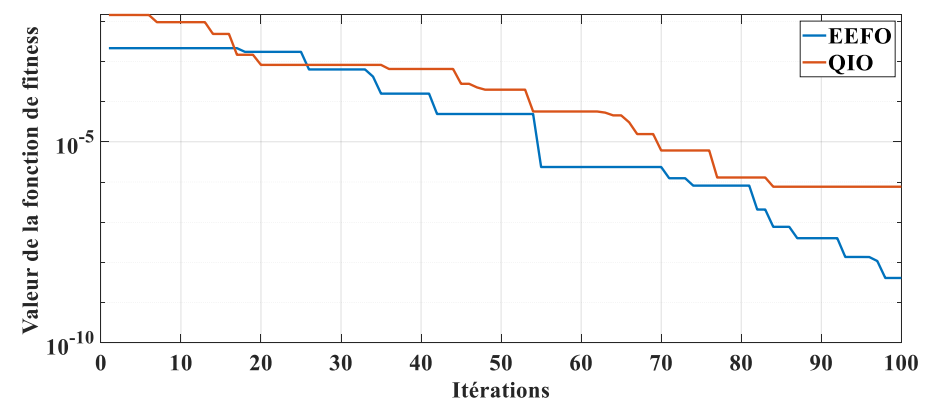
Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
10	54.24	56.7
20	114.5	119.7
30	174.8	182.7
40	235	245.7
50	295.3	308.7
60	355.6	371.7
77	458	478.8
84	500.2	522.9
100	596.6	623.7

Temps



Fonction erreur

Figure 47 : Poutre encasté-encasté – Deux endommagement – Réduction de rigidité E– 50 population et 100 itération.



Fonction erreur

Figure 48 : Poutre encasté-encasté – Deux endommagement – J.K.Sinha– 50 population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

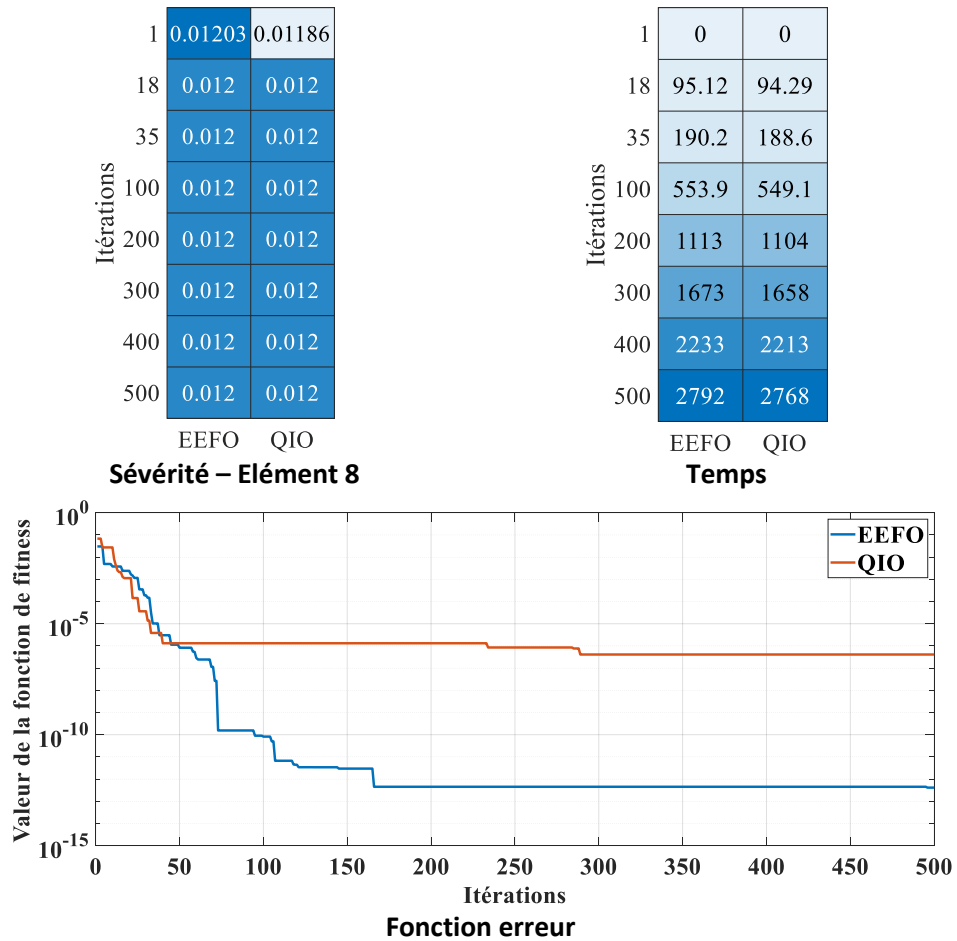


Figure 49 : Poutre encasté-encasté – un seul endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 500 itération.

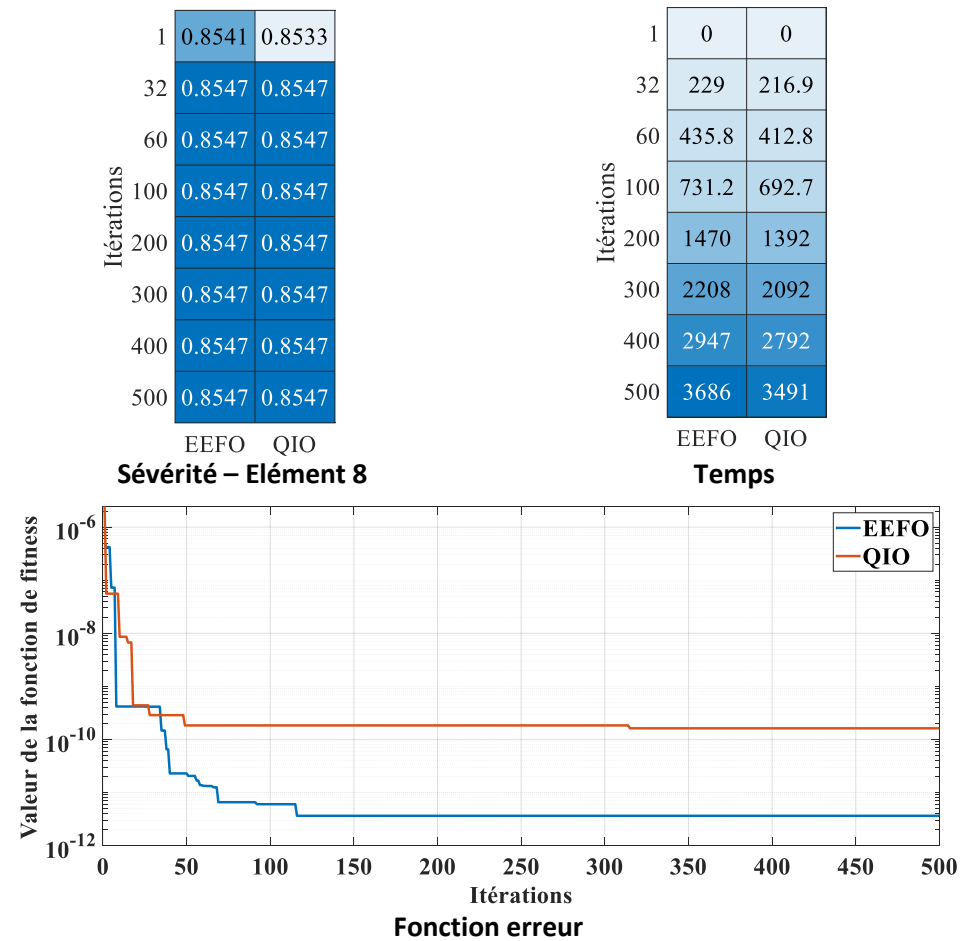


Figure 50 : Poutre encasté-encasté – un seul endommagement – Réduction de rigidité E– 50 population et 500 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

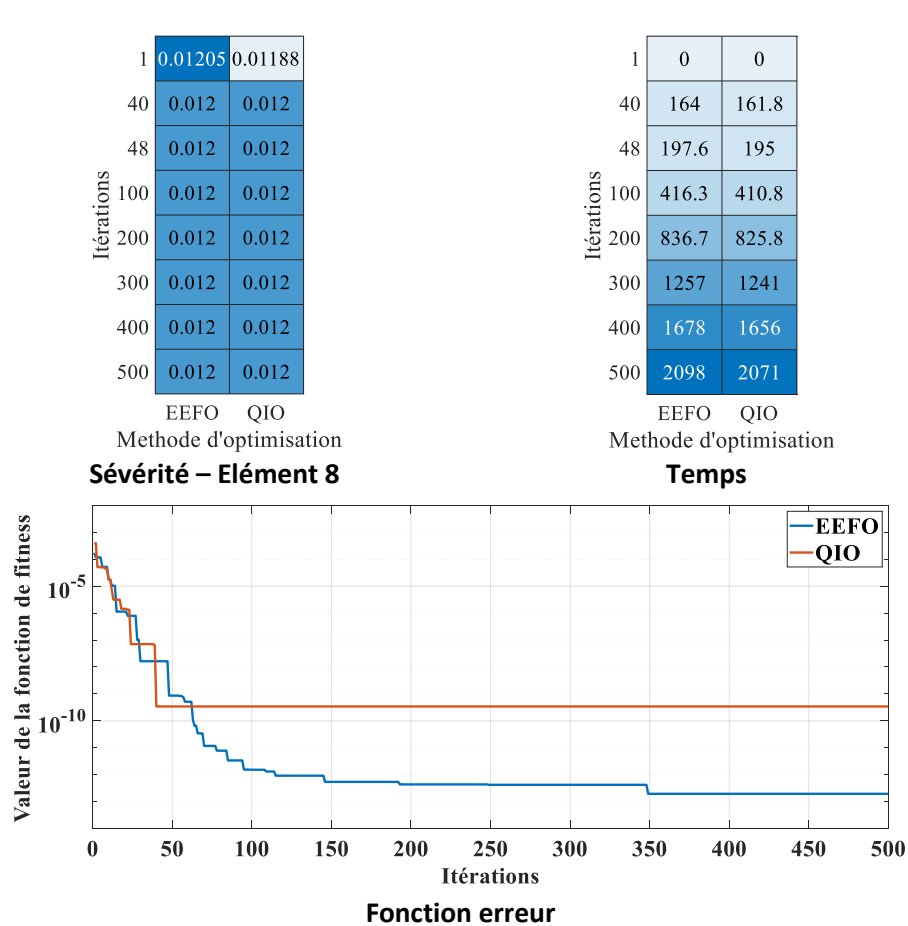


Figure 51 : Poutre encasté-encasté – un seul endommagement – J.K.Sinha– 50 population et 500 itération.

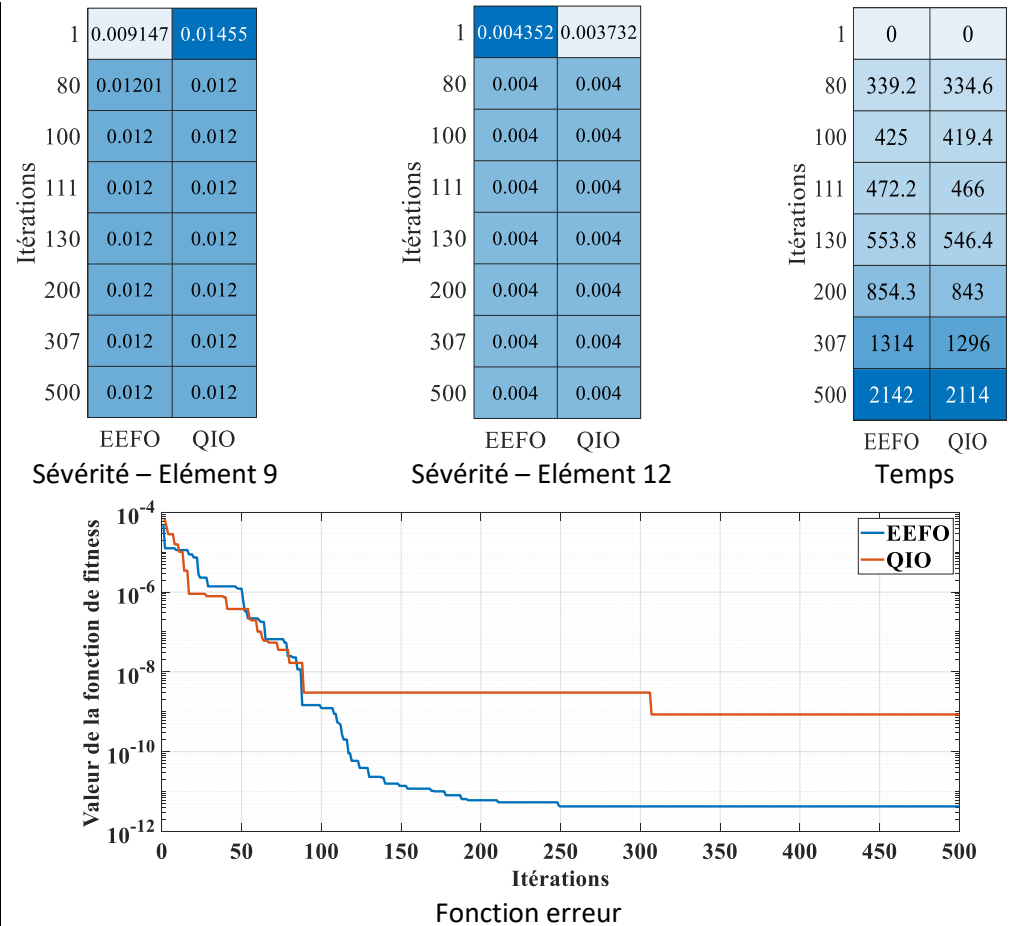
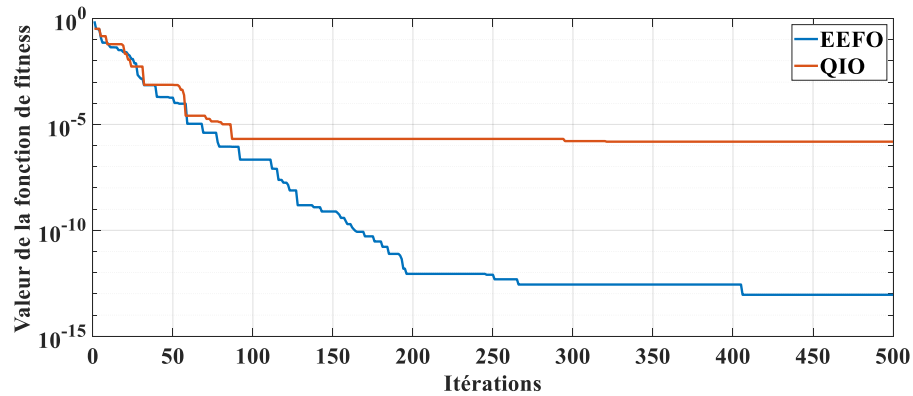


Figure 52 : Poutre encasté-encasté – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

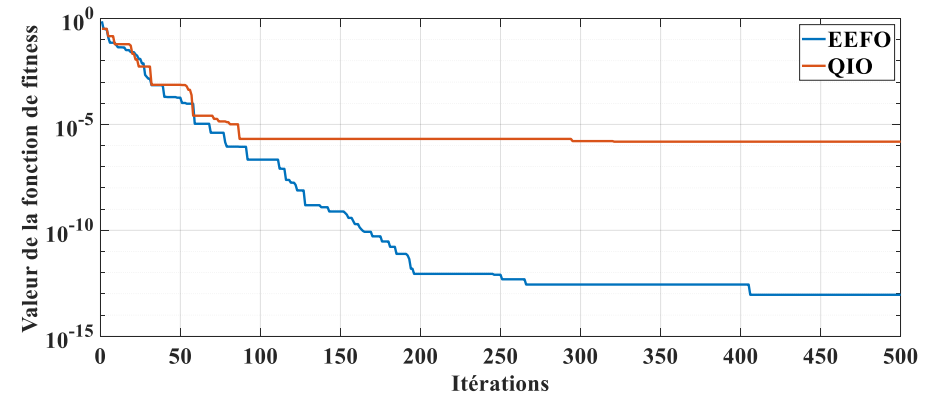
Itérations	Sévérité – Élément 9		Sévérité – Élément 12		Temps	
	EEFO	QIO	EEFO	QIO	EEFO	QIO
1	0.8702	0.8472	0.5134	0.3486	0	0
24	0.8545	0.8548	0.4038	0.4036	107.3	108.6
69	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	317.3	321
71	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	326.7	330.5
100	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	462	467.4
400	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	1862	1884
500	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	2329	2356

Itérations	Sévérité – Élément 9		Sévérité – Élément 12		Temps	
	EEFO	QIO	EEFO	QIO	EEFO	QIO
1	0.02208	0.0132	0.00427	0.004167	0	0
100	0.012	0.012	0.004	0.004	465	457.4
102	0.012	0.012	0.004	0.004	474.4	466.6
109	0.012	0.012	0.004	0.004	507.3	498.9
128	0.012	0.012	0.004	0.004	596.6	586.7
400	0.012	0.012	0.004	0.004	1874	1843
500	0.012	0.012	0.004	0.004	2344	2305



Fonction erreur

Figure 53 : Poutre encasté-encasté – Deux endommagement – Réduction de rigidité E – 50 population et 100 itération.



Fonction erreur

Figure 54 : Poutre encasté-encasté – Deux endommagement – J.K.Sinha – 50 population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

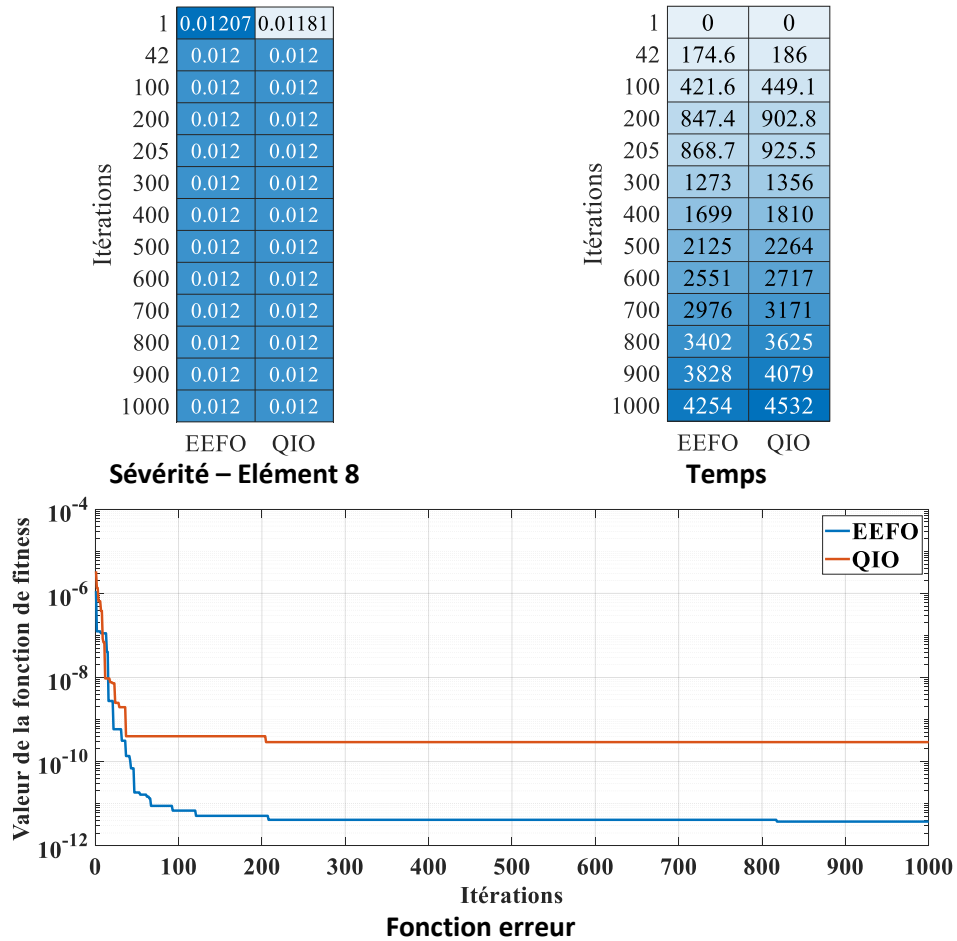


Figure 55 : Poutre encasté-encasté – un seul endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 1000 itération.

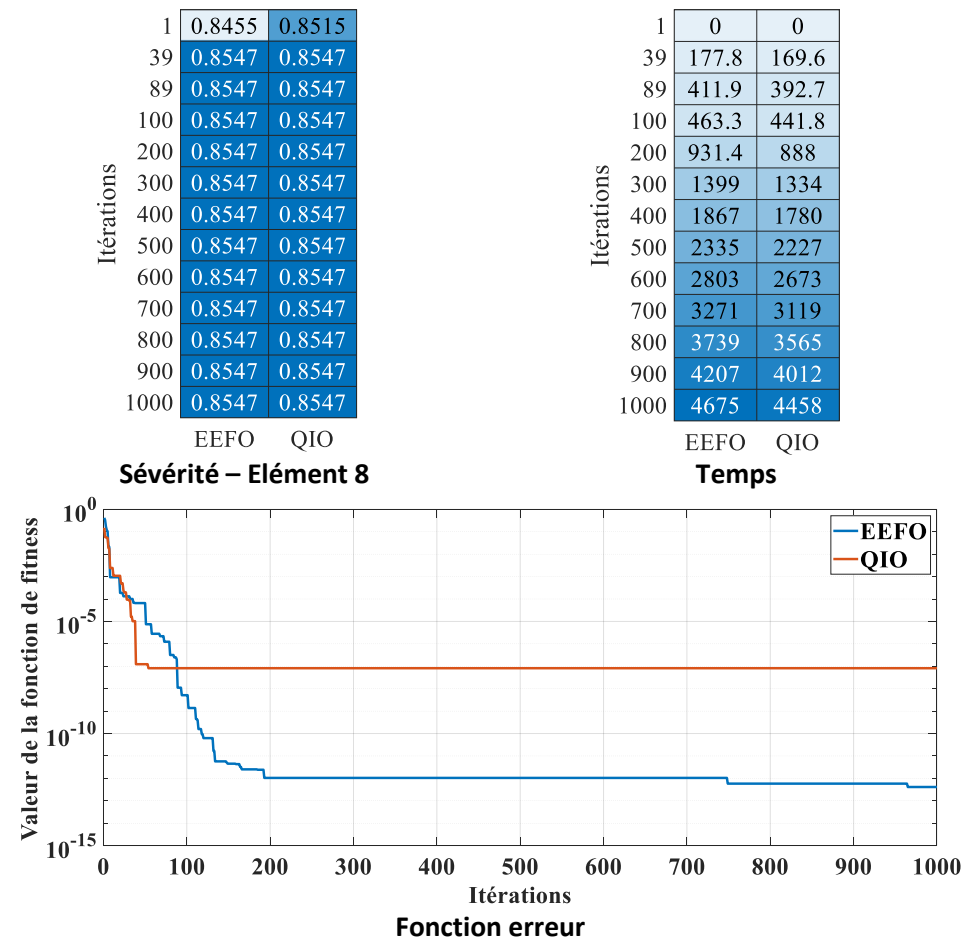


Figure 56 : Poutre encasté-encasté – un seul endommagement – Réduction de rigidité E– 50 population et 1000 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

1	0.01195	0.01202
25	0.012	0.012
40	0.012	0.012
100	0.012	0.012
200	0.012	0.012
300	0.012	0.012
400	0.012	0.012
500	0.012	0.012
600	0.012	0.012
700	0.012	0.012
800	0.012	0.012
900	0.012	0.012
1000	0.012	0.012

EEFO QIO

1	0	0
25	99.16	99.35
40	161.1	161.4
100	409	409.8
200	822.2	823.7
300	1235	1238
400	1649	1652
500	2062	2066
600	2475	2480
700	2888	2893
800	3301	3307
900	3714	3721
1000	4128	4135

EEFO QIO

Sévérité – Élément 8

Temps

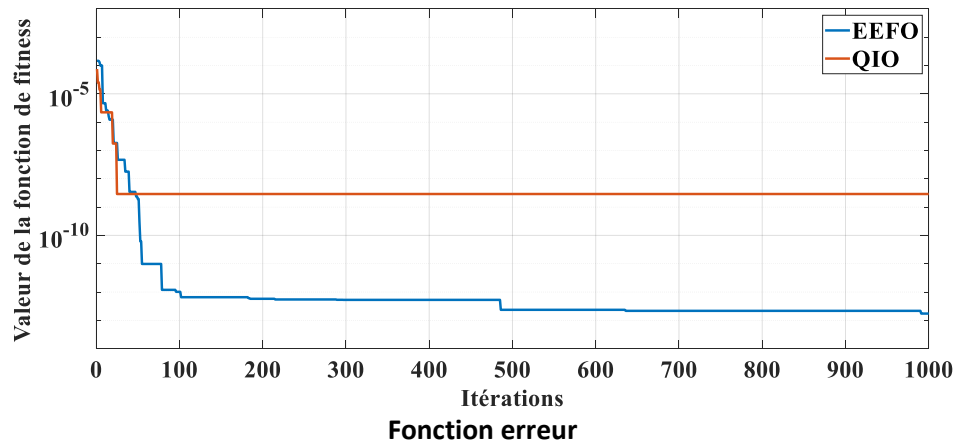


Figure 57 : Poutre encastré-encastré – un seul endommagement – J.K.Sinha– 50 population et 1000 itération.

1	0.01039	0.0108
48	0.01201	0.01192
70	0.01201	0.012
89	0.012	0.012
100	0.012	0.012
118	0.012	0.012
900	0.012	0.012
1000	0.012	0.012

EEFO QIO

1	0.003974	0.004493
48	0.004	0.004004
70	0.004	0.004
89	0.004	0.004
100	0.004	0.004
118	0.004	0.004
900	0.004	0.004
1000	0.004	0.004

EEFO QIO

1	0	0
48	247.6	246.1
70	363.5	361.3
89	463.7	460.8
100	521.6	518.4
118	616.5	612.6
900	4737	4707
1000	5264	5231

EEFO QIO

Sévérité – Élément 9

Sévérité – Élément 12

Temps

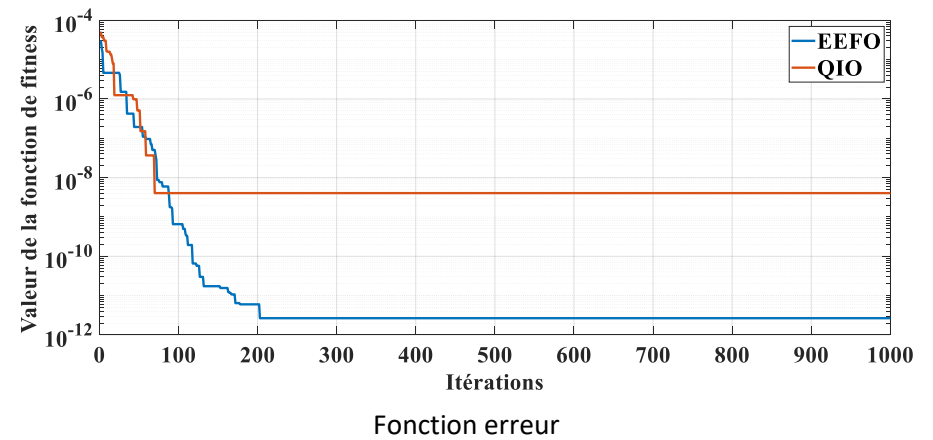


Figure 58 : Poutre encastré-encastré – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 1000 itération.

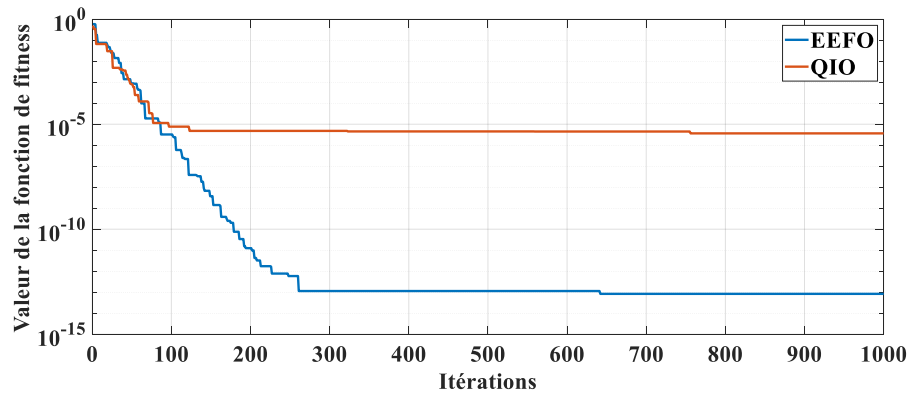
Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Itérations	Sévérité – Elément 9		Sévérité – Elément 12		Temps	
	EEFO	QIO	EEFO	QIO	EEFO	QIO
1	0.841	0.8481	0.3807	0.4786	0	0
84	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	434.9	436.8
100	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	518.8	521
123	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	639.3	642
132	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	686.5	689.4
200	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	1043	1047
800	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	4187	4205
1000	0.8547	0.8547	0.4033	0.4033	5235	5257

Sévérité – Elément 9

Sévérité – Elément 12

Temps



Fonction erreur

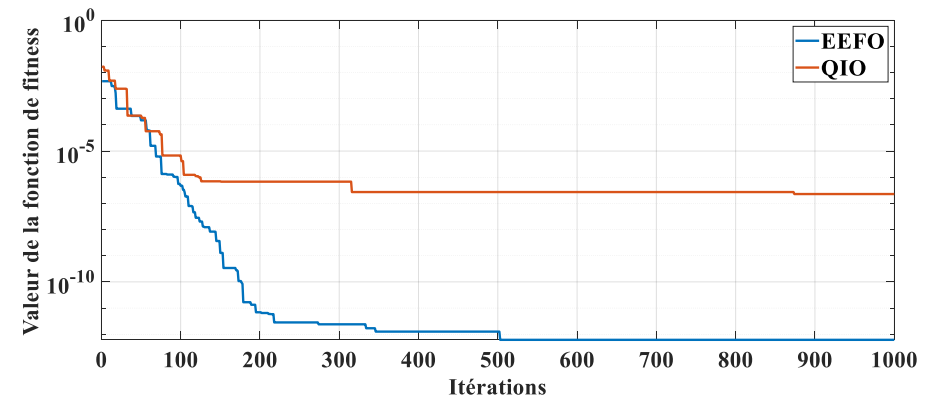
Figure 59 : Poutre encasté-encasté – Deux endommagement – Réduction de rigidité E– 50 population et 1000 itération.

Itérations	Sévérité – Elément 9		Sévérité – Elément 12		Temps	
	EEFO	QIO	EEFO	QIO	EEFO	QIO
1	0.01182	0.0182	0.003919	0.004881	0	0
77	0.012	0.012	0.004	0.004	311.8	311.8
93	0.012	0.012	0.004	0.004	377.4	377.4
100	0.012	0.012	0.004	0.004	406.1	406.1
101	0.012	0.012	0.004	0.004	410.2	410.2
105	0.012	0.012	0.004	0.004	426.6	426.6
200	0.012	0.012	0.004	0.004	816.3	816.4
900	0.012	0.012	0.004	0.004	3688	3688
1000	0.012	0.012	0.004	0.004	4098	4098

Sévérité – Elément 9

Sévérité – Elément 12

Temps



Fonction erreur

Figure 60 : Poutre encasté-encasté – Deux endommagement – J.K.Sinha– 50 population et 1000 itération.

Discussions sur les résultats

Outre les deux algorithmes d'optimisation précédemment mentionnés, l'étude a également évalué l'efficacité des techniques QIO (Quadratic integer Optimisation) et EEFO (Eigenvalue-based Excitation Force Optimisation) pour la quantification des fissures dans la poutre encasté-encasté en aluminium à 27 éléments. Les résultats ont montré que ces deux techniques d'optimisation ont également permis de converger vers une quantification précise des dommages.

4.6.2 Application pour une poutre flexible-libre

Suite à la détection de fissures dans une poutre flexible-libre, nous avons appliqué deux méthodes d'optimisation, QIO et EEFO, pour évaluer l'ampleur des dommages. Les résultats de ces analyses sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Dans le premier cas, en fixant le nombre d'itérations à 100 et en variant les populations, nous avons effectué trois séries d'essais avec 30, 100 et 200 populations respectivement. Pour le deuxième cas, en maintenant la population constante à 50 et en modifiant le nombre d'itérations à 100, 500 et 1000, nous avons comparé les performances des deux méthodes d'optimisation. Ces tableaux fournissent une vue détaillée des résultats obtenus pour chaque configuration expérimentale, mettant en évidence les forces et les limitations de QIO et EEFO dans cette étude particulière.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

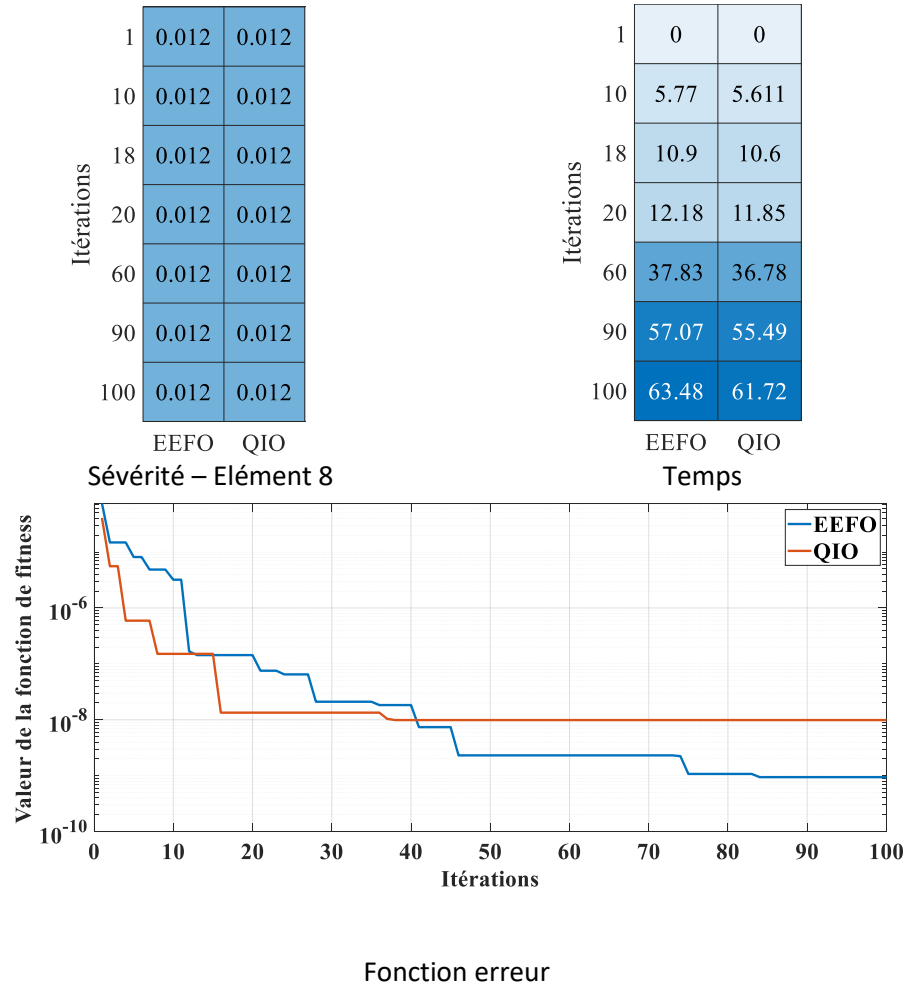


Figure 61 : Poutre flexible-libre– un seule endommagement – Paipetis & Dimarogonas avec 30population et 100 itération.

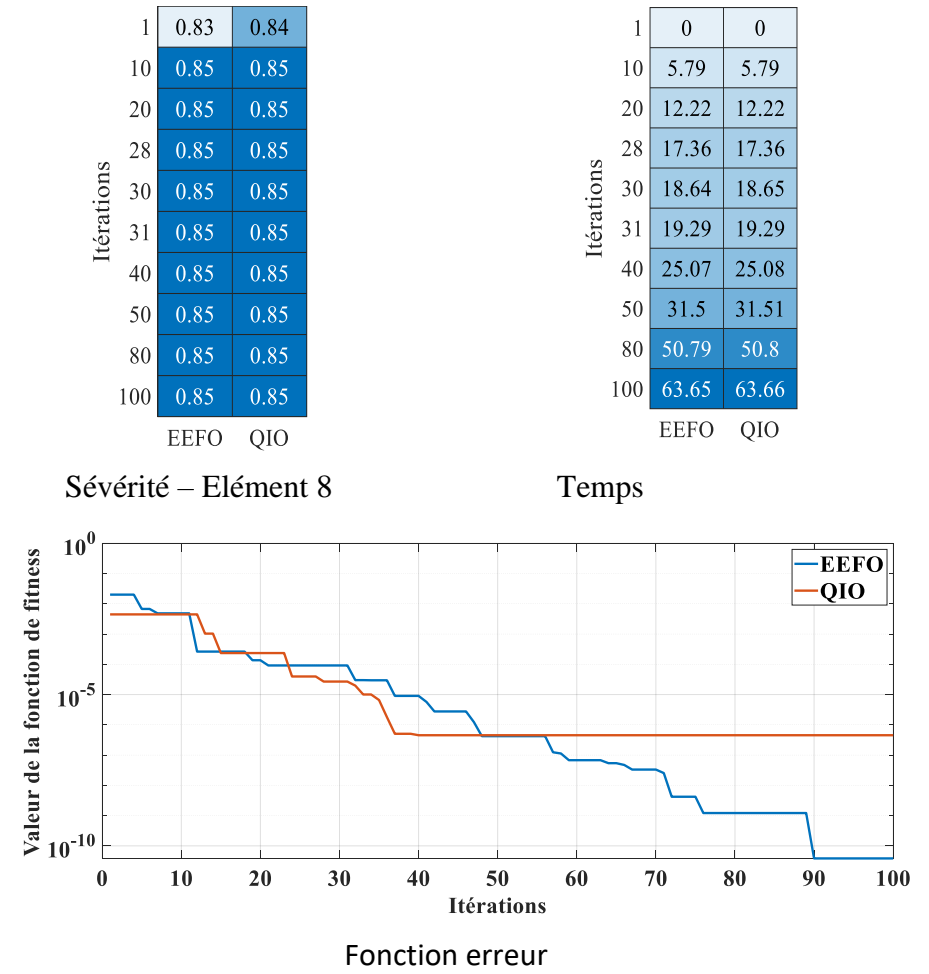


Figure 62 : Poutre flexible-libre – un seule endommagement – Réduction de rigidité avec 30population et 100 itération.

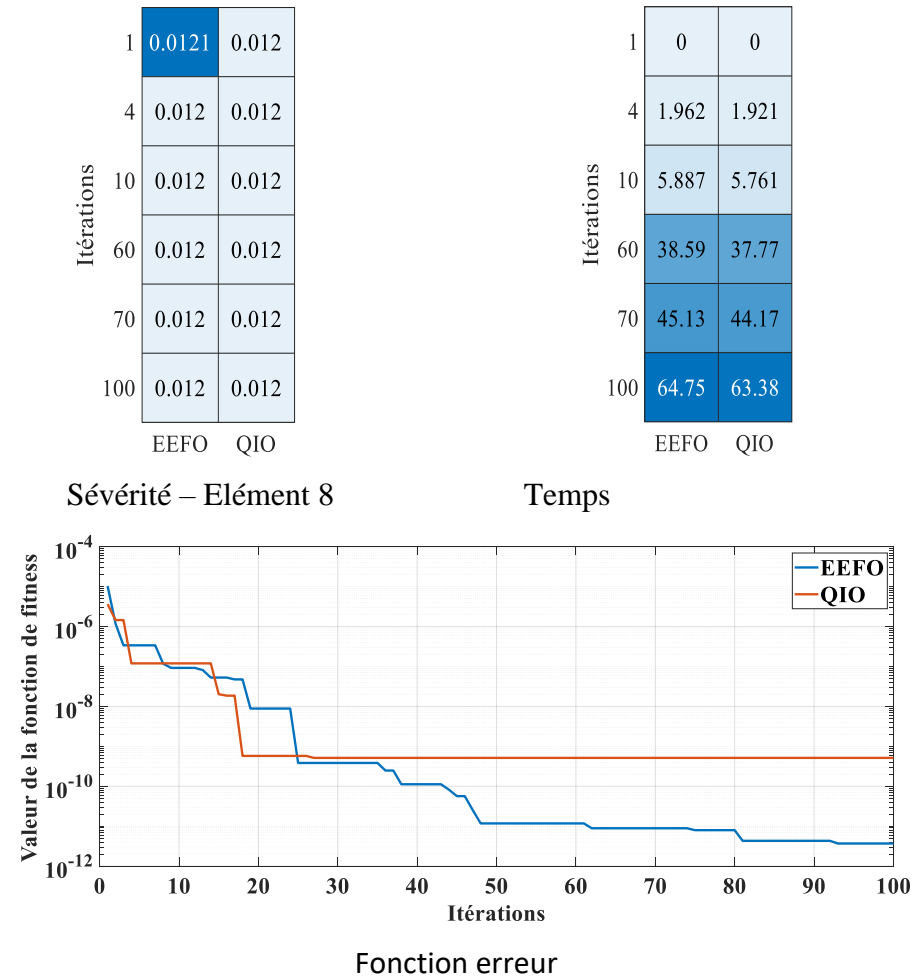


Figure 63 : Poutre flexible-libre – un seule endommagement – J.K.Sinha– 30population et 100 itération

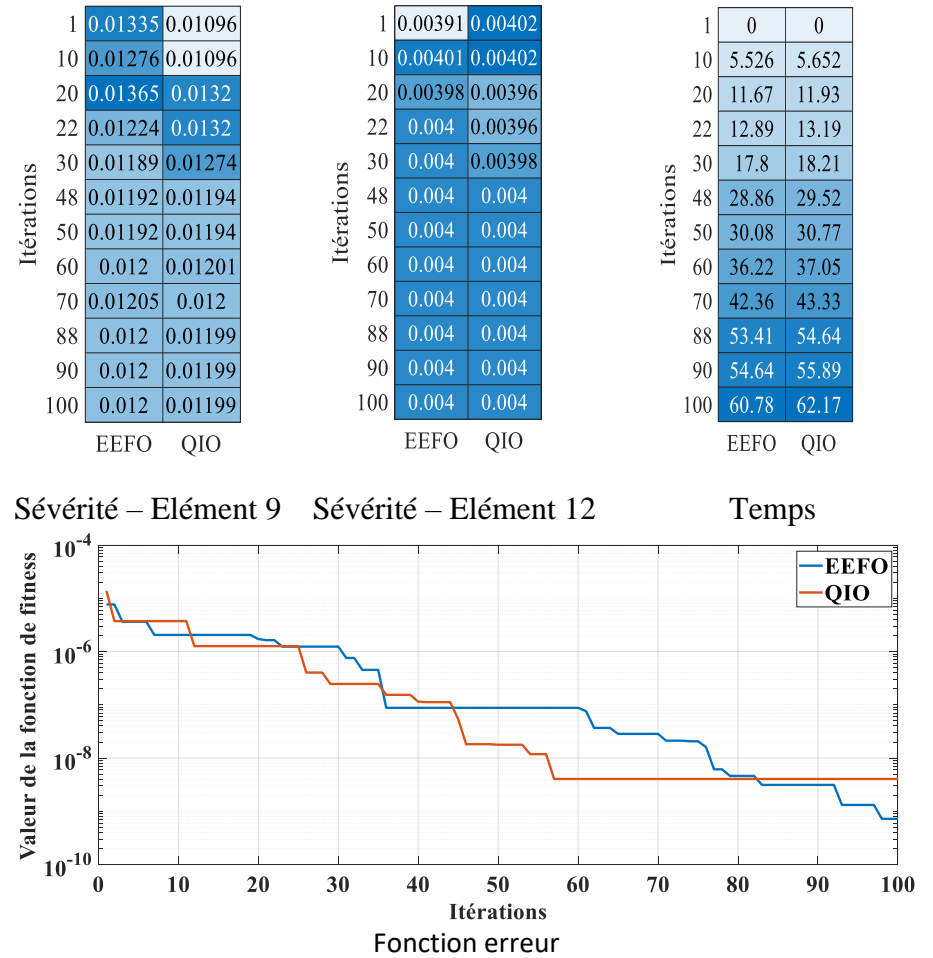


Figure 64 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 30population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

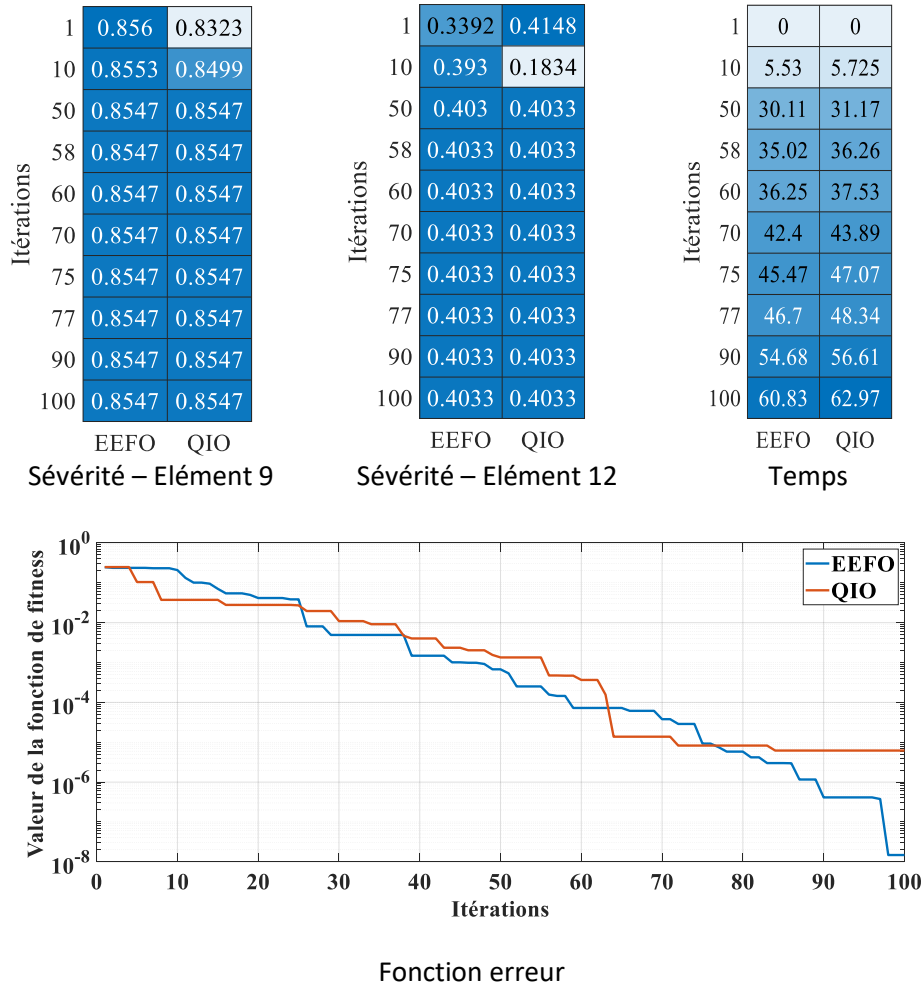


Figure65 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement – Réduction de rigidité de E– 30population et 100 itération.

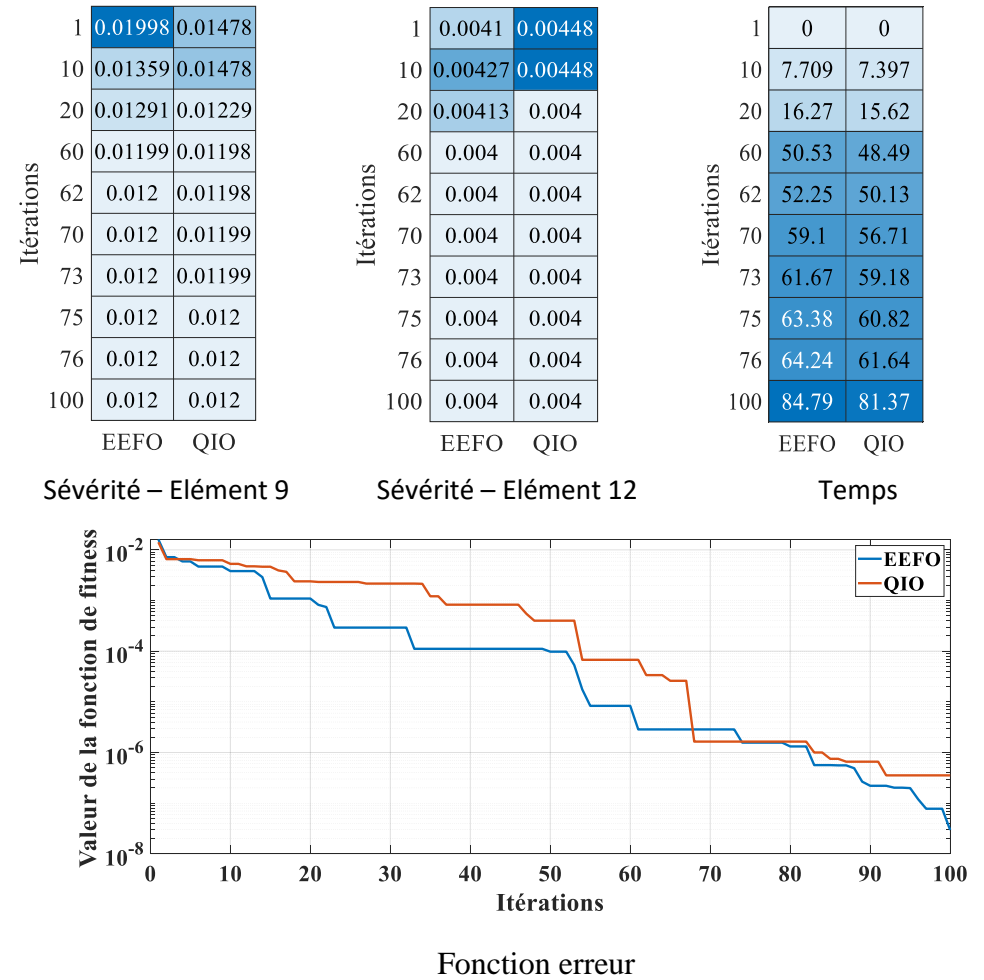


Figure 66. Poutre flexible-libre – Deux endommagement – J.K .Sinha– 30population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

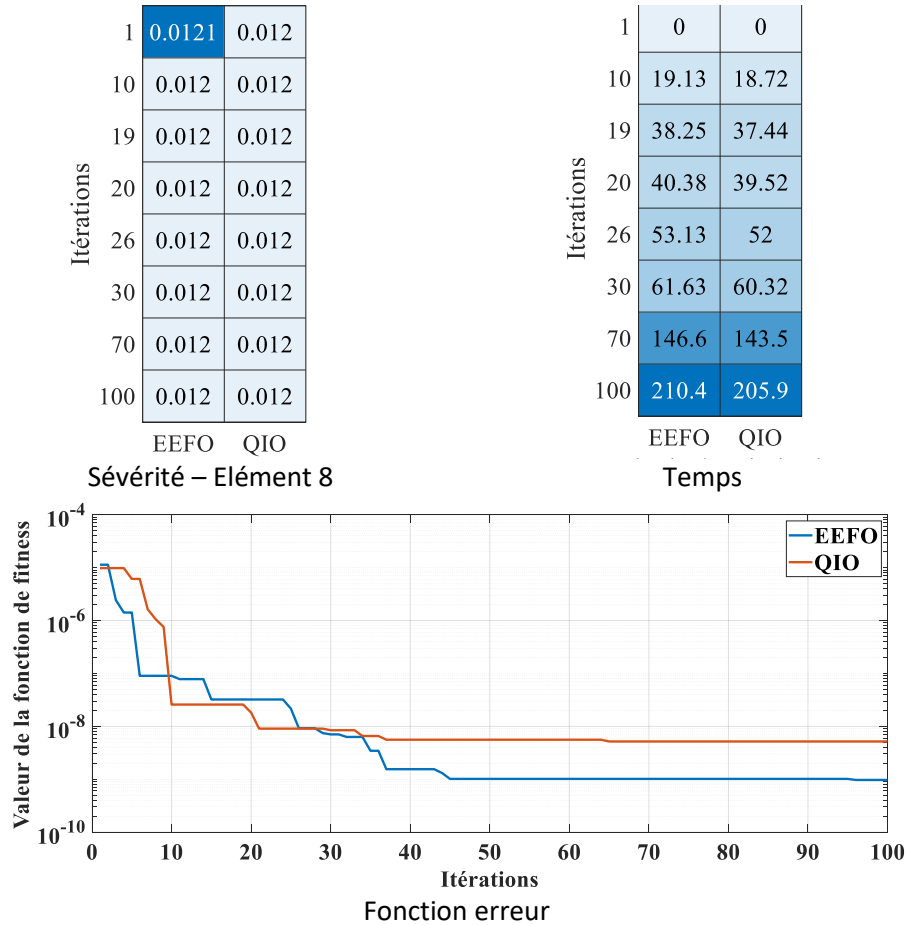


Figure67 : flexible-libre – Un endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 100population et 100 itération.

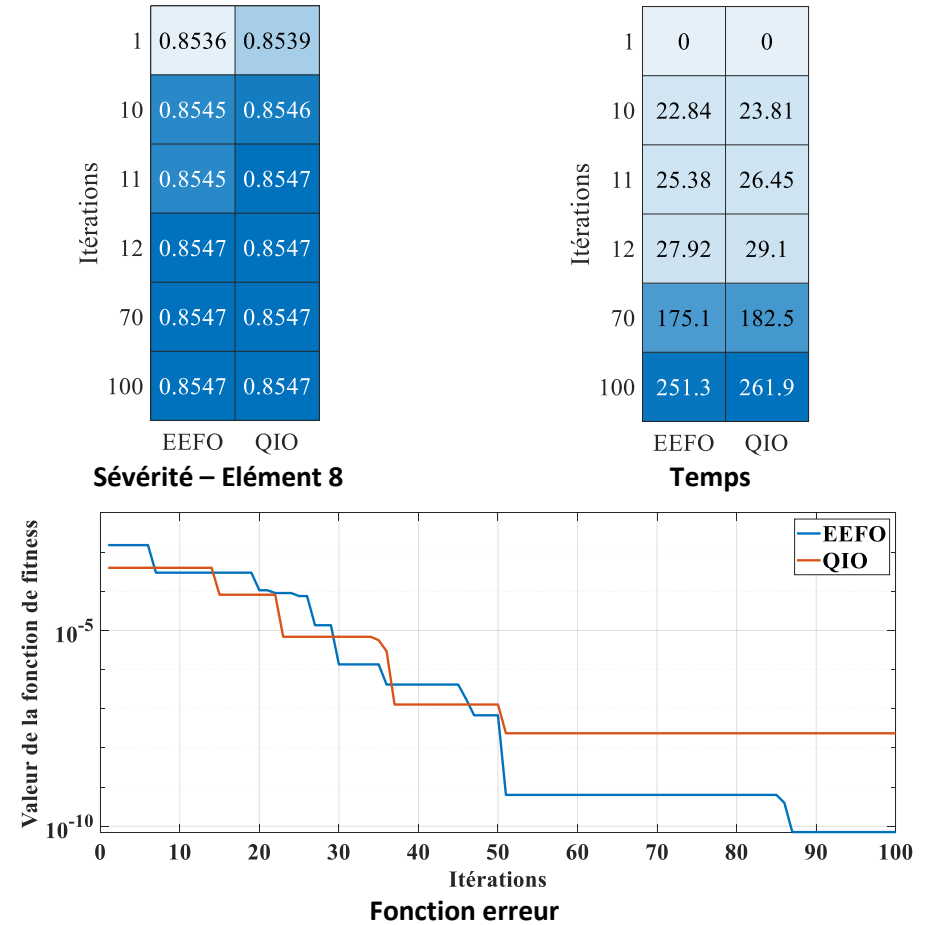


Figure68 : Flexible-libre – un endommagement – Réduction de rigidité – 100population et 100 itérations.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

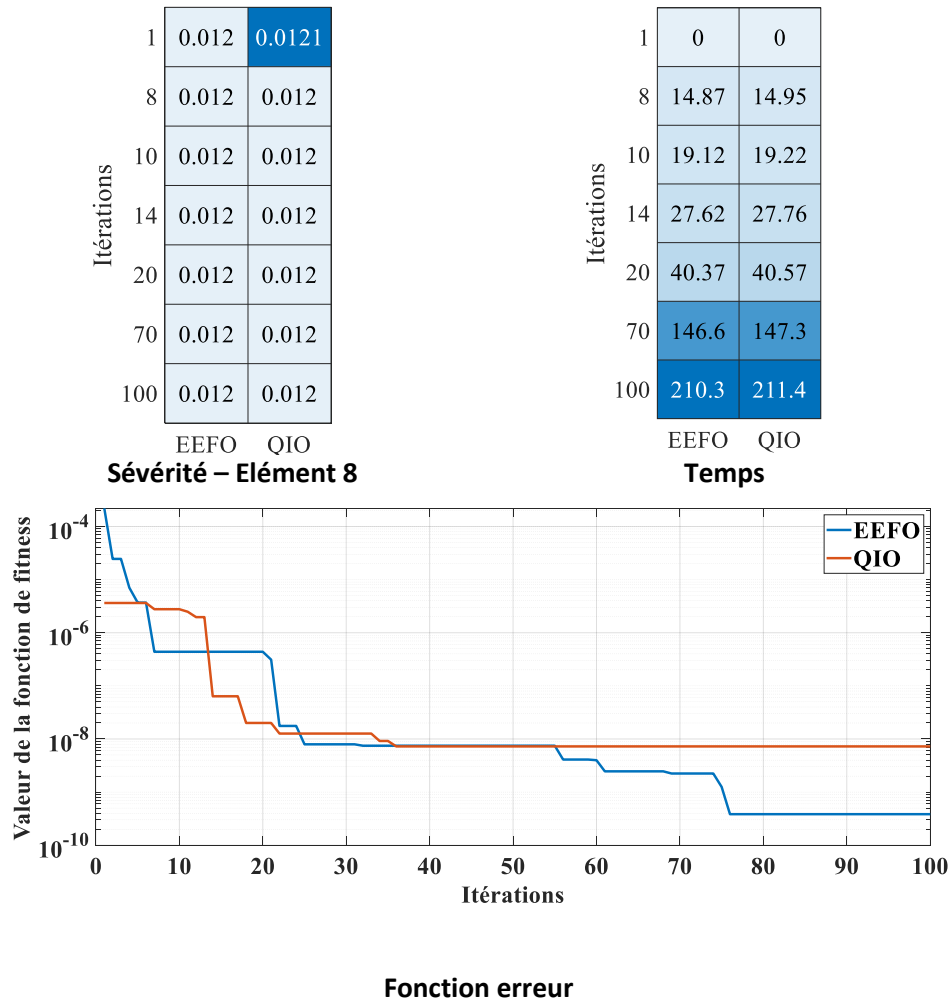


Figure 69 : Poutre-flexible – Un seule endommagement – J.K.Sinha– 100population et 100 itération.

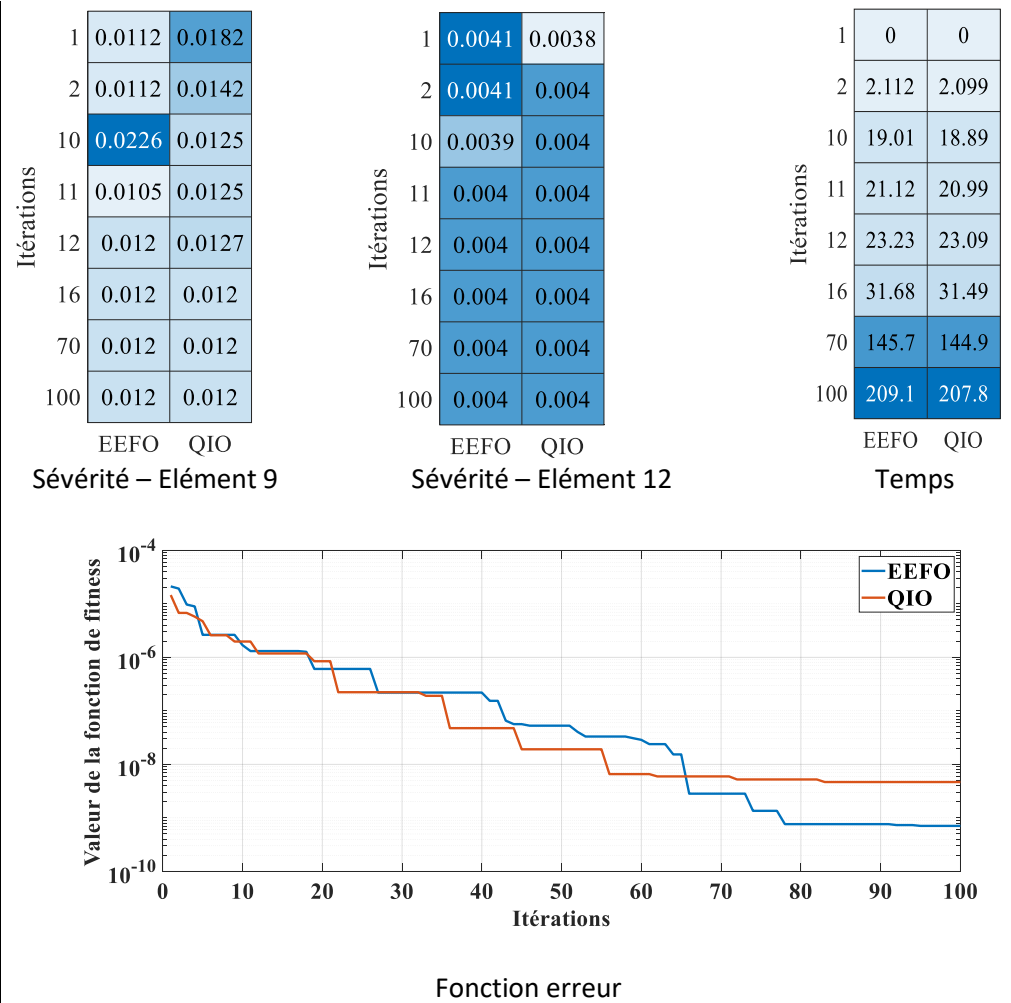


Figure 70. Poutre flexible-libre – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 100population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Itérations	EEFO	QIO
1	0.8495	0.863
10	0.8547	0.856
20	0.8547	0.855
30	0.8547	0.8548
33	0.8547	0.8548
38	0.8547	0.8547
40	0.8547	0.8547
41	0.8547	0.8547
80	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547

Itérations	EEFO	QIO
1	0.1915	0.392
10	0.4041	0.4117
20	0.4041	0.3995
30	0.4029	0.4036
33	0.4032	0.4036
38	0.4032	0.4033
40	0.4032	0.4033
41	0.4032	0.4032
80	0.4033	0.4033
100	0.4033	0.4033

Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
10	19.1	18.98
20	40.32	40.07
30	61.54	61.16
33	67.91	67.49
38	78.52	78.03
40	82.76	82.25
41	84.88	84.36
80	167.6	166.6
100	210.1	208.8

Sévérité – Élément 9

Sévérité – Élément 12

Temps

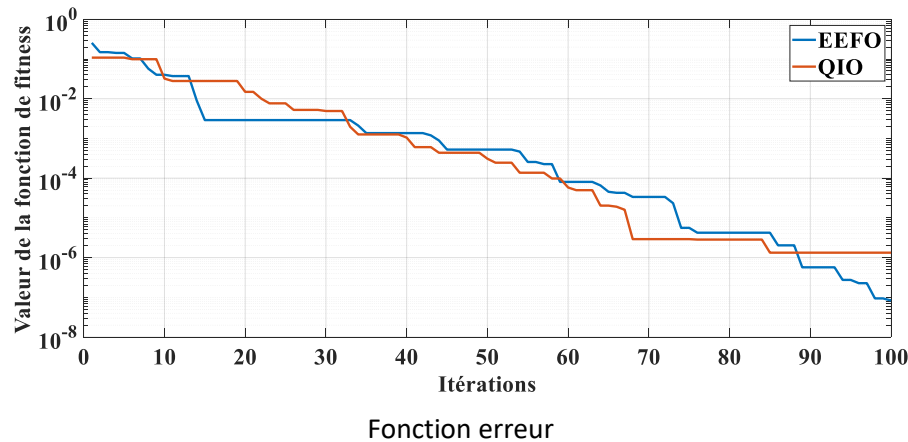


Figure 71 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement – Réduction– 100population et 100 itération.

Itérations	EEFO	QIO
1	0.0213	0.0117
10	0.0124	0.0117
12	0.0124	0.0119
20	0.0124	0.0119
30	0.0124	0.0119
34	0.0118	0.0119
38	0.0118	0.012
70	0.012	0.012
100	0.012	0.012

Itérations	EEFO	QIO
1	0.0048	0.0039
10	0.0041	0.0039
12	0.0041	0.004
20	0.0041	0.004
30	0.0041	0.004
34	0.004	0.004
38	0.004	0.004
70	0.004	0.004
100	0.004	0.004

Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
10	19.04	19.08
12	23.27	23.32
20	40.19	40.29
30	61.35	61.49
34	69.81	69.97
38	78.27	78.45
70	146	146.3
100	209.4	209.9

Sévérité – Élément 9

Sévérité – Élément 12

Temps

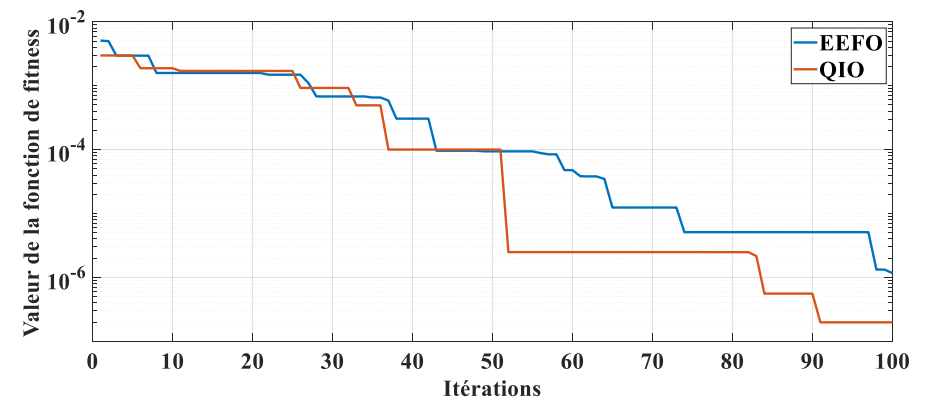


Figure 72 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement – J.K.Sinha– 100population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

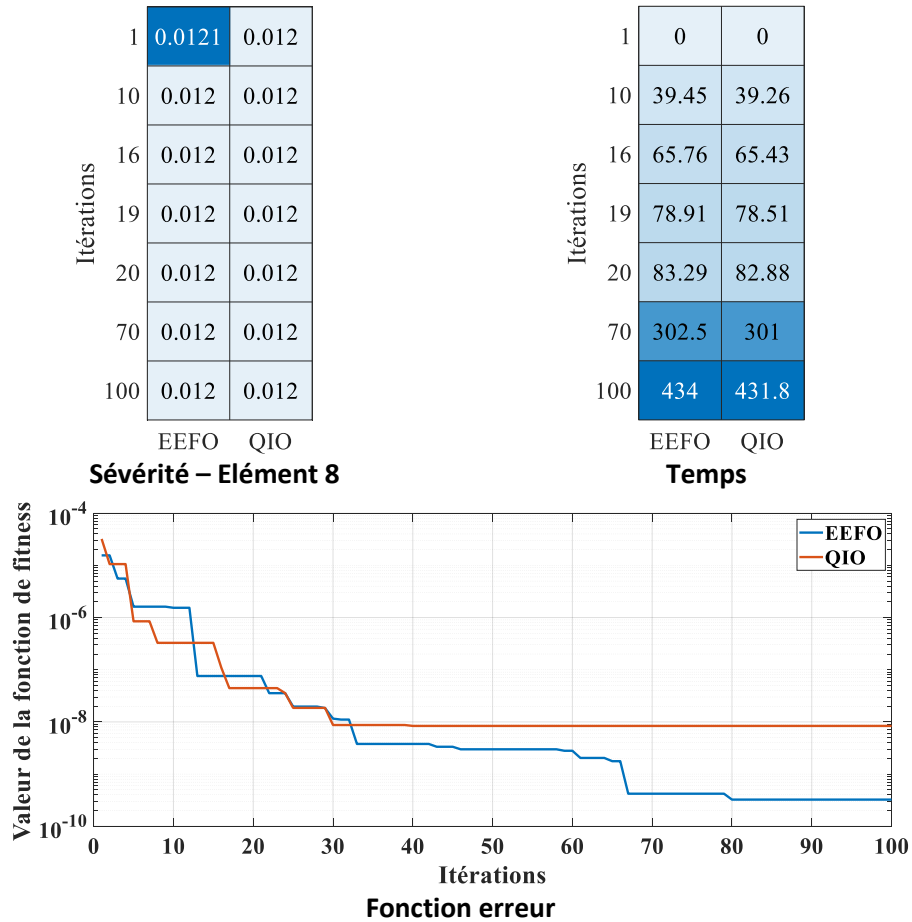


Figure73 : Poutre flexible-libre – Un seule endommagement –Paipetis & dimarogonas– 200population et 100 itération.

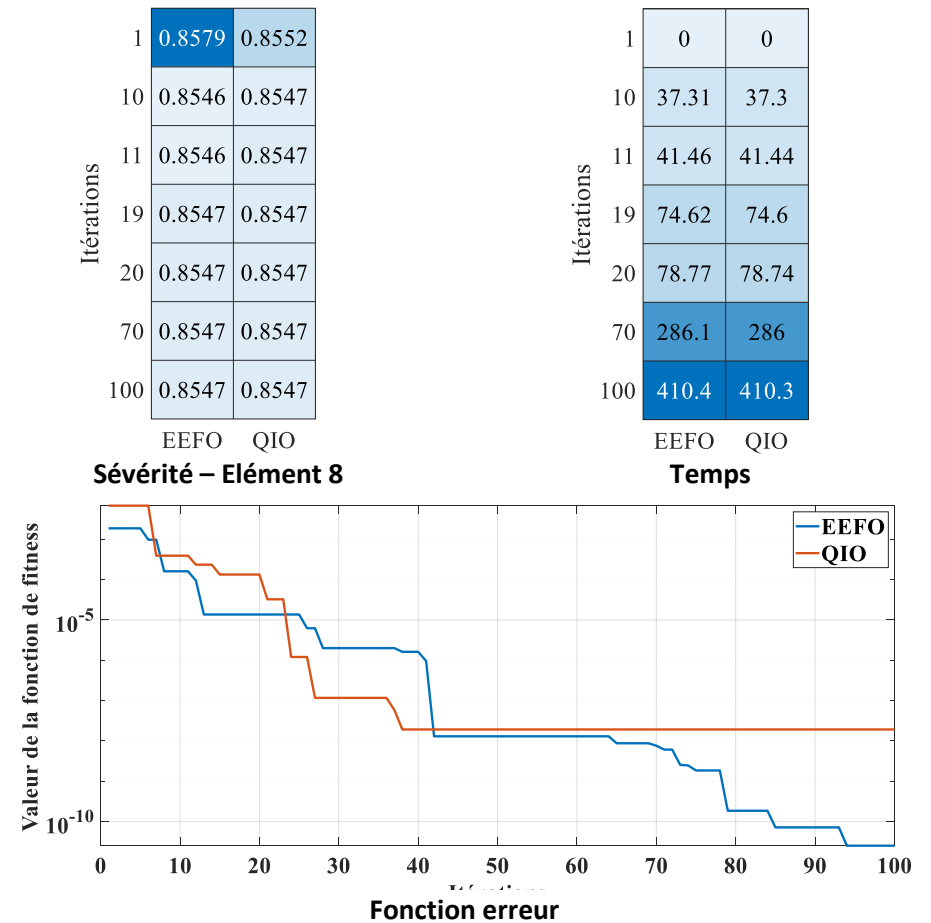


Figure74 : Poutre-flexible– Un seule endommagement –Réduction de rigidité de E– 200population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

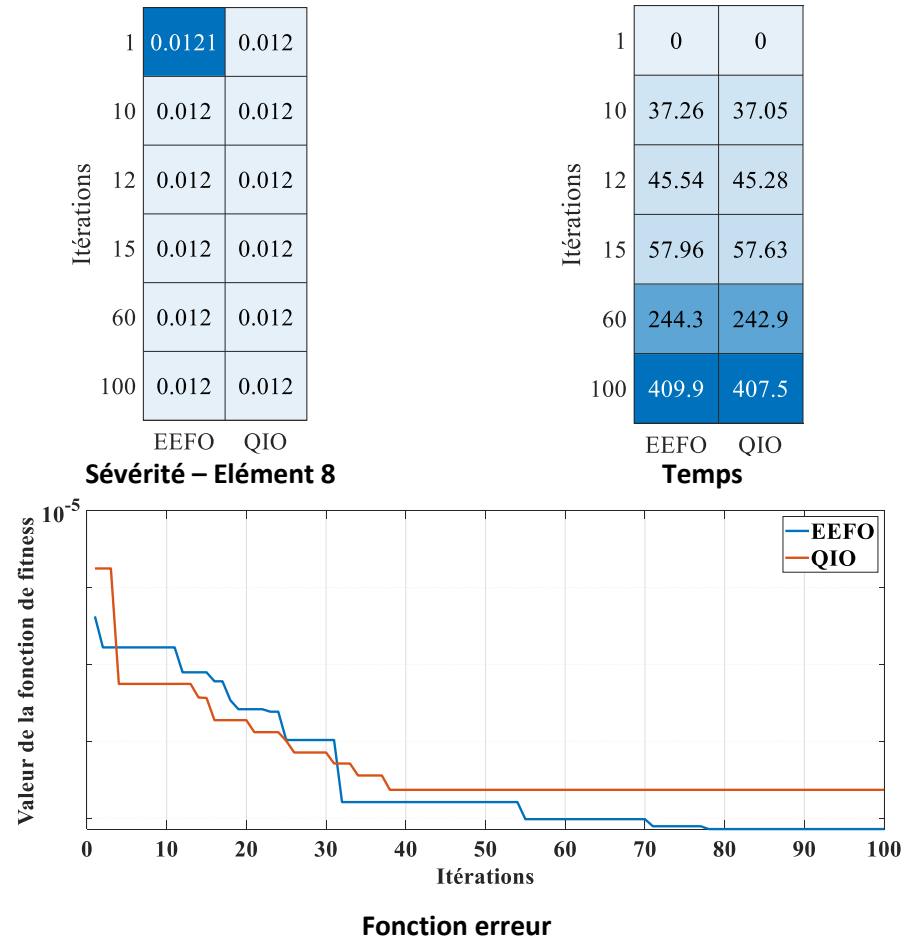


Figure75 : Poutre flexible – Un seule endommagement –J.K.Sinha– 200population et 100 itération

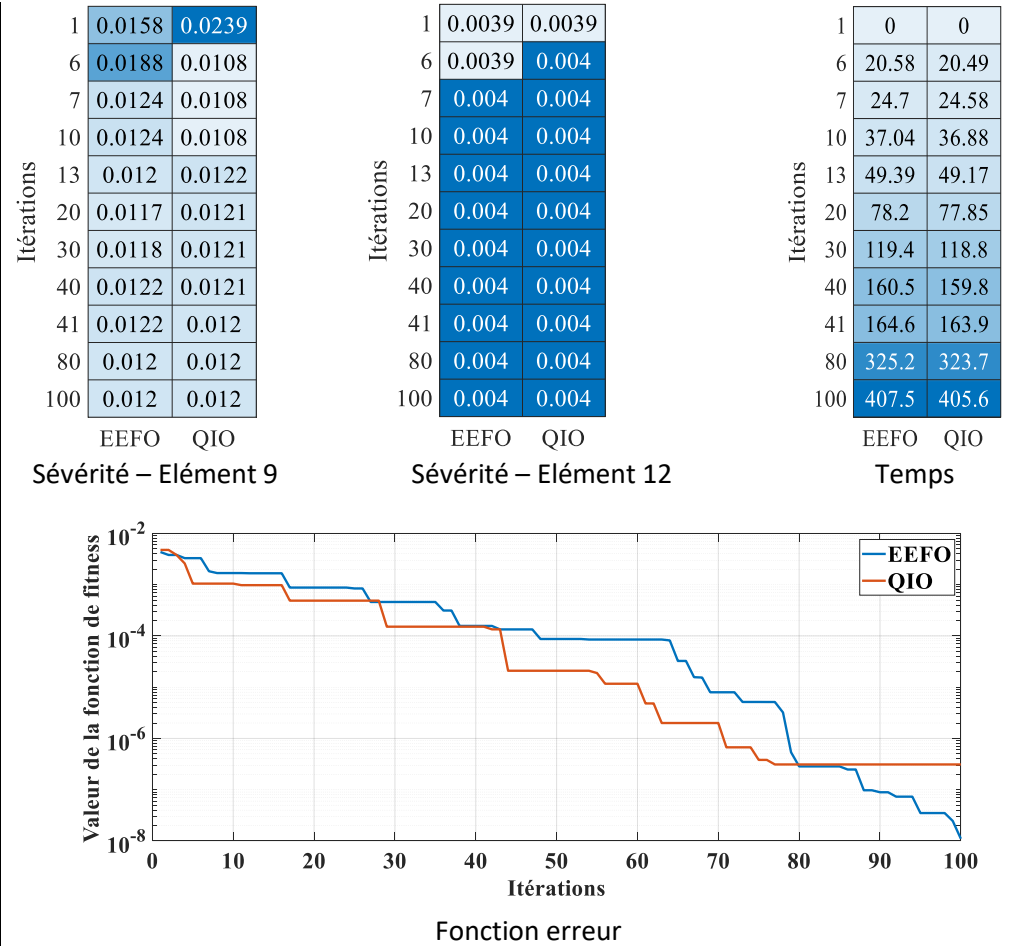


Figure76 : Poutre flexible – Deux endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 200population et 100 itération

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Itérations	EEFO	QIO
1	0.8665	0.8484
10	0.855	0.8545
20	0.8548	0.8549
23	0.8547	0.8549
30	0.8548	0.8549
32	0.8548	0.8547
33	0.8548	0.8547
34	0.8547	0.8547
80	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547

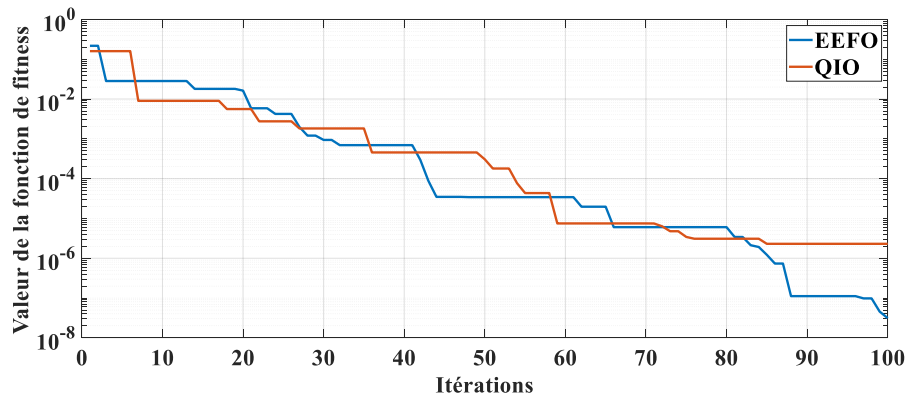
Sévérité – Élément 9

Itérations	EEFO	QIO
1	0.4521	0.2533
10	0.4057	0.3896
20	0.402	0.4052
23	0.4021	0.4052
30	0.4039	0.4052
32	0.4039	0.4043
33	0.4039	0.4031
34	0.4032	0.4031
80	0.4033	0.4033
100	0.4033	0.4033

Sévérité – Élément 12

Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
10	39.77	37.05
20	83.95	78.21
23	97.21	90.56
30	128.1	119.4
32	137	127.6
33	141.4	131.7
34	145.8	135.8
80	349.1	325.2
100	437.4	407.5

Temps



Fonction erreur

Figure77 : Poutre flexible-libre – deux endommagement –Réduction de rigidité de E – 200population et 100 itération.

Itérations	EEFO	QIO
1	0.0117	0.0173
8	0.013	0.0122
10	0.0126	0.0122
15	0.0119	0.0122
20	0.0119	0.0122
30	0.0119	0.0122
31	0.0119	0.012
32	0.012	0.012
70	0.012	0.012
100	0.012	0.012

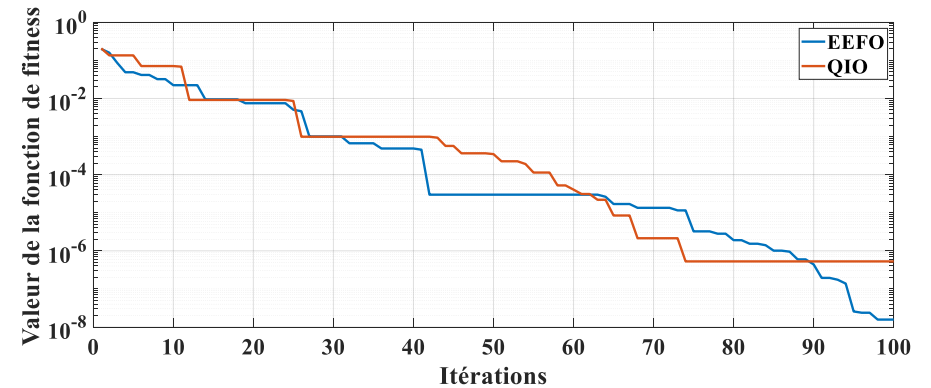
Sévérité – Élément 9

Itérations	EEFO	QIO
1	0.004	0.0046
8	0.0041	0.004
10	0.0041	0.004
15	0.004	0.004
20	0.004	0.004
30	0.004	0.004
31	0.004	0.004
32	0.004	0.004
70	0.004	0.004
100	0.004	0.004

Sévérité – Élément 12

Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
8	29.8	30.01
10	38.32	38.58
15	59.6	60.01
20	80.89	81.45
30	123.5	124.3
31	127.7	128.6
32	132	132.9
70	293.8	295.8
100	421.5	424.4

Temps



Fonction erreur

Figure 78 : Poutre flexible-libre – deux endommagement –J.K.Sinha– 200population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

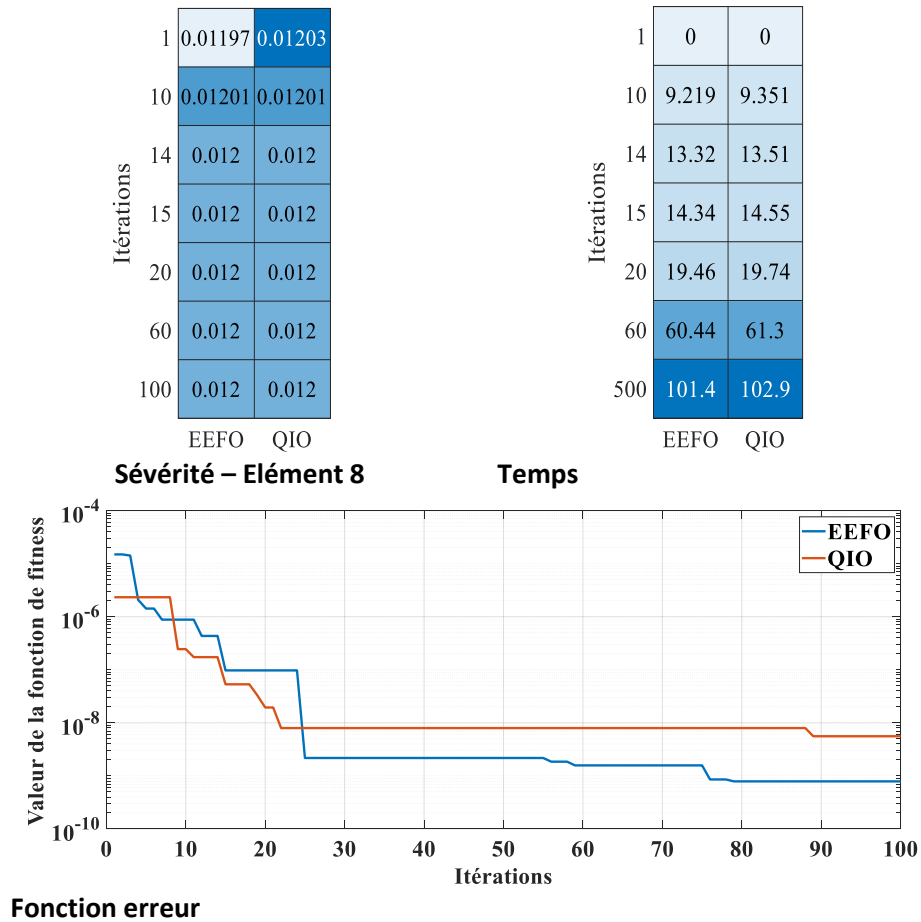


Figure79 : Poutre flexible-libre – un seul endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50population et 100 itération

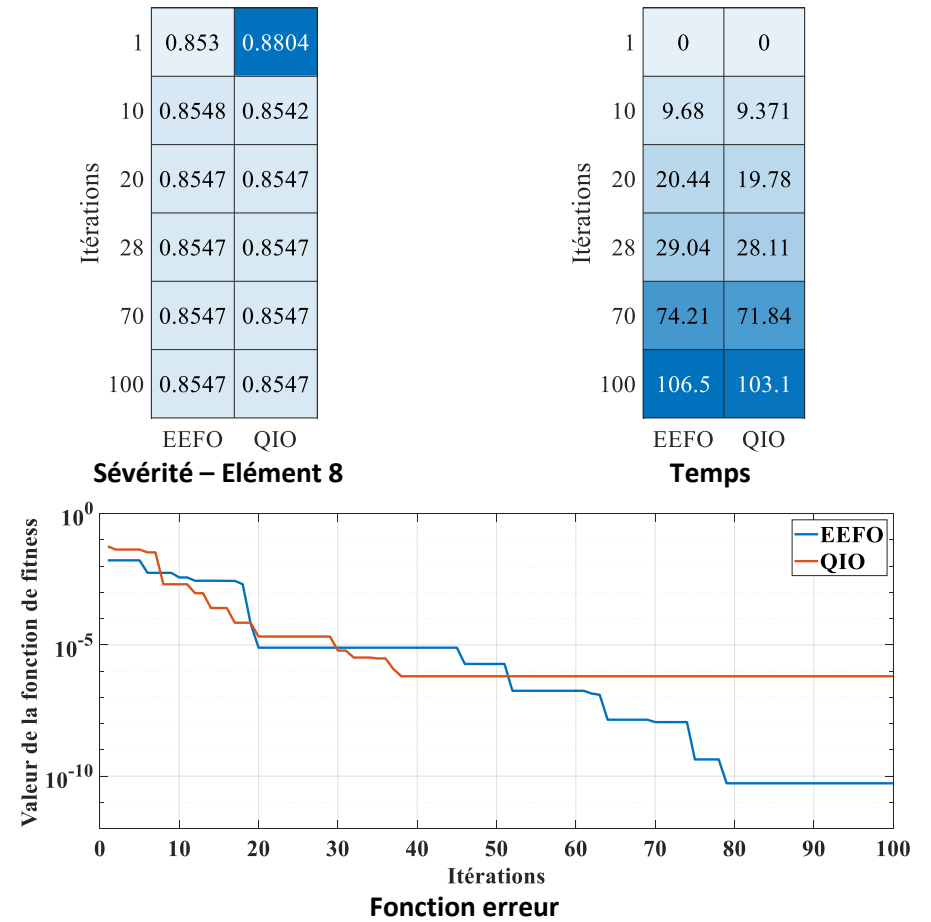


Figure80 : Poutre flexible-libre – un endommagement – Réduction de rigidité de E – 50population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

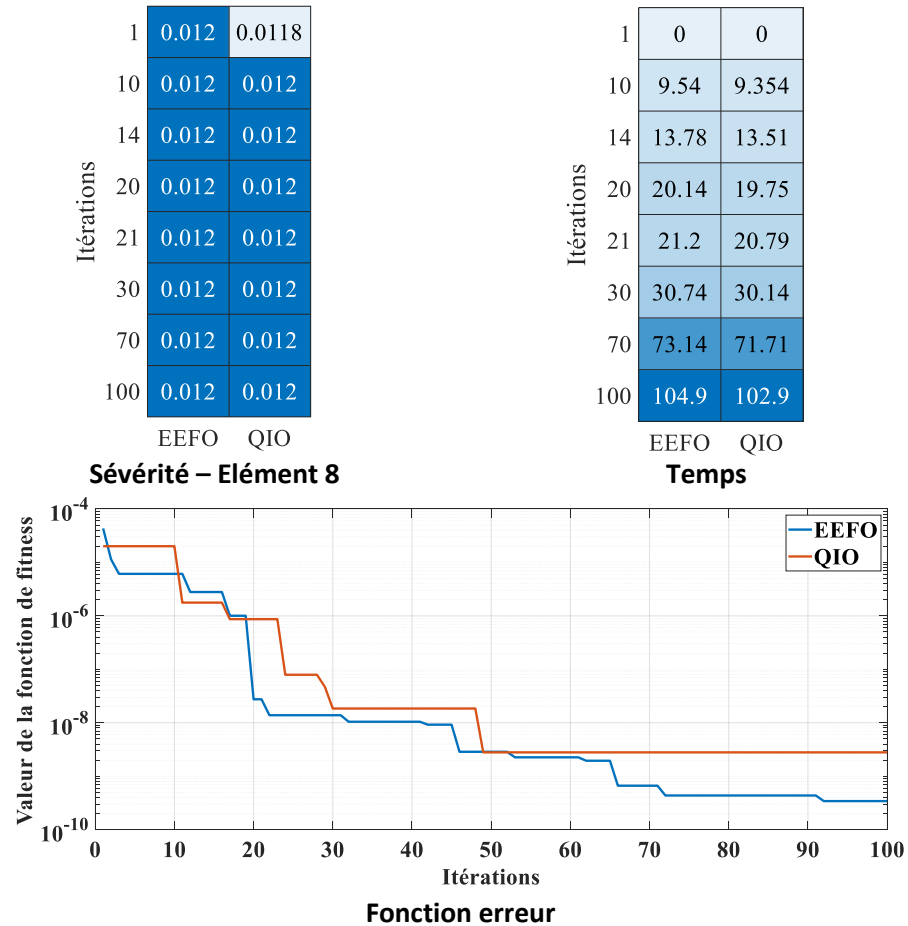


Figure 81 : Poutre flexible-libre – un endommagement – J.K.Sinha – 50 population et 100 itération.

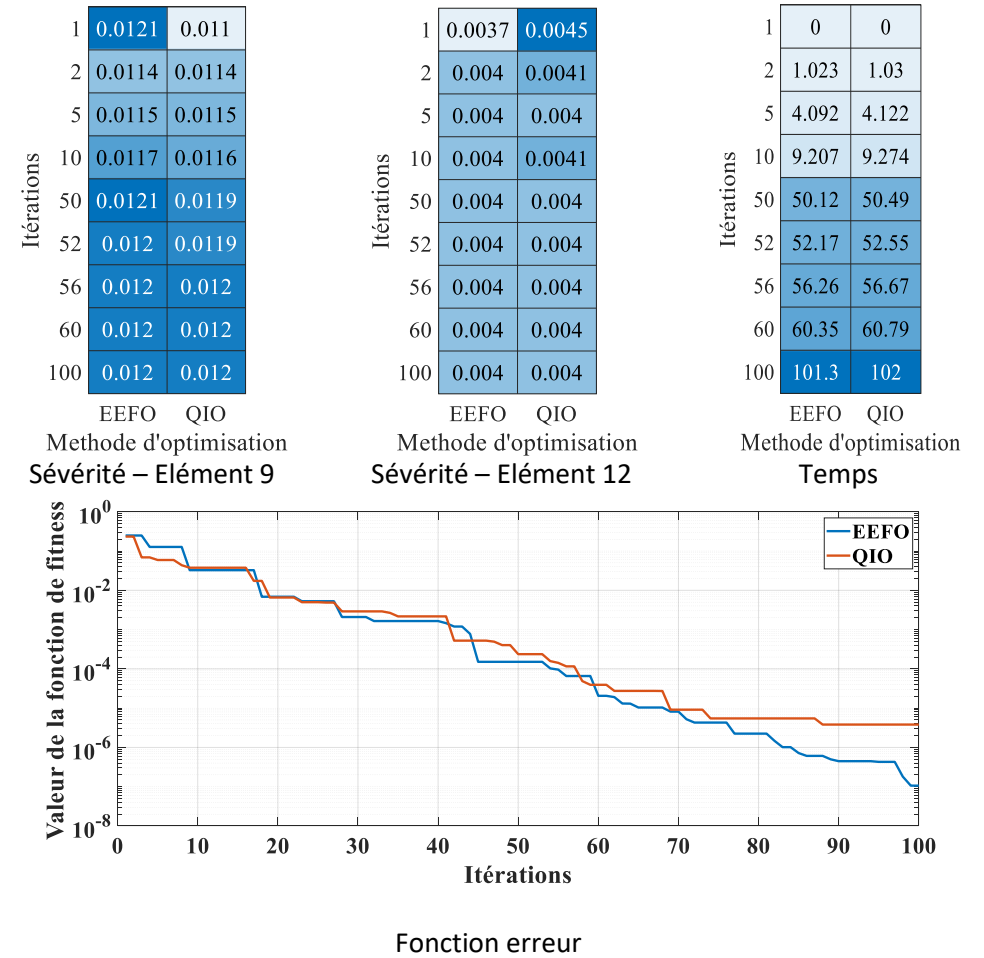


Figure 82 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas – 50 population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

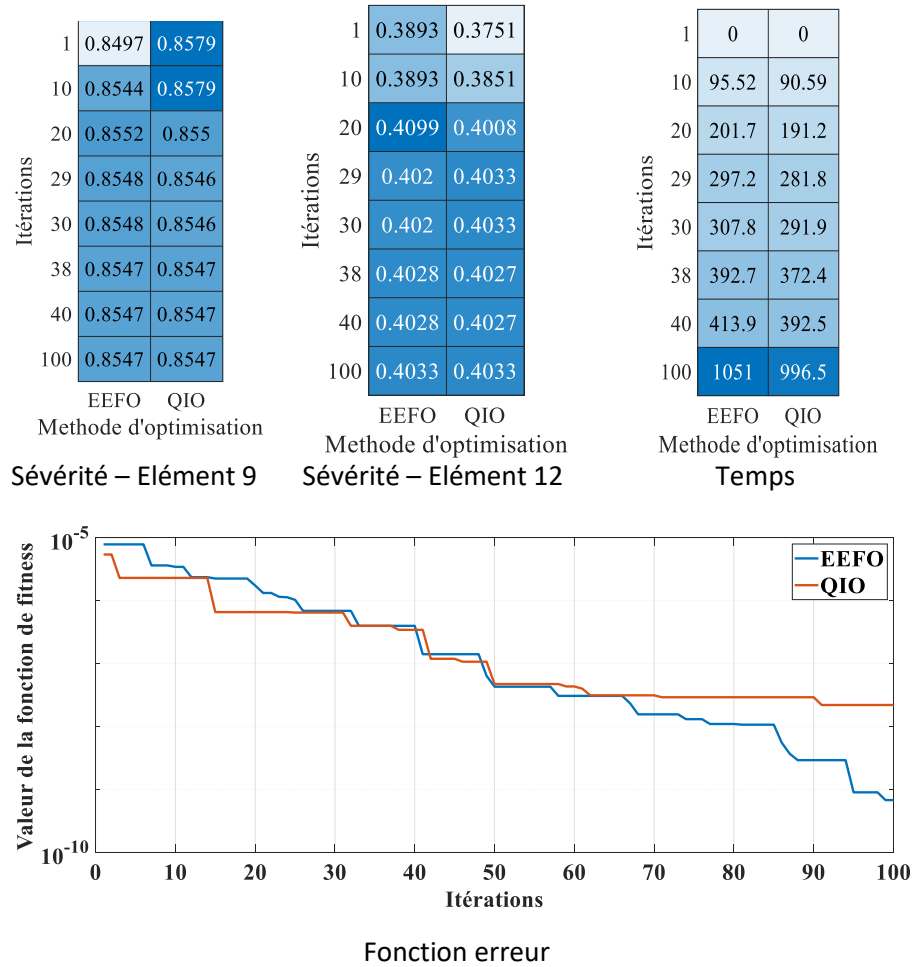


Figure 83 : Poutre flexible-libre– Deux endommagement –Réduction de rigidités E– 50 population et 100 itération.

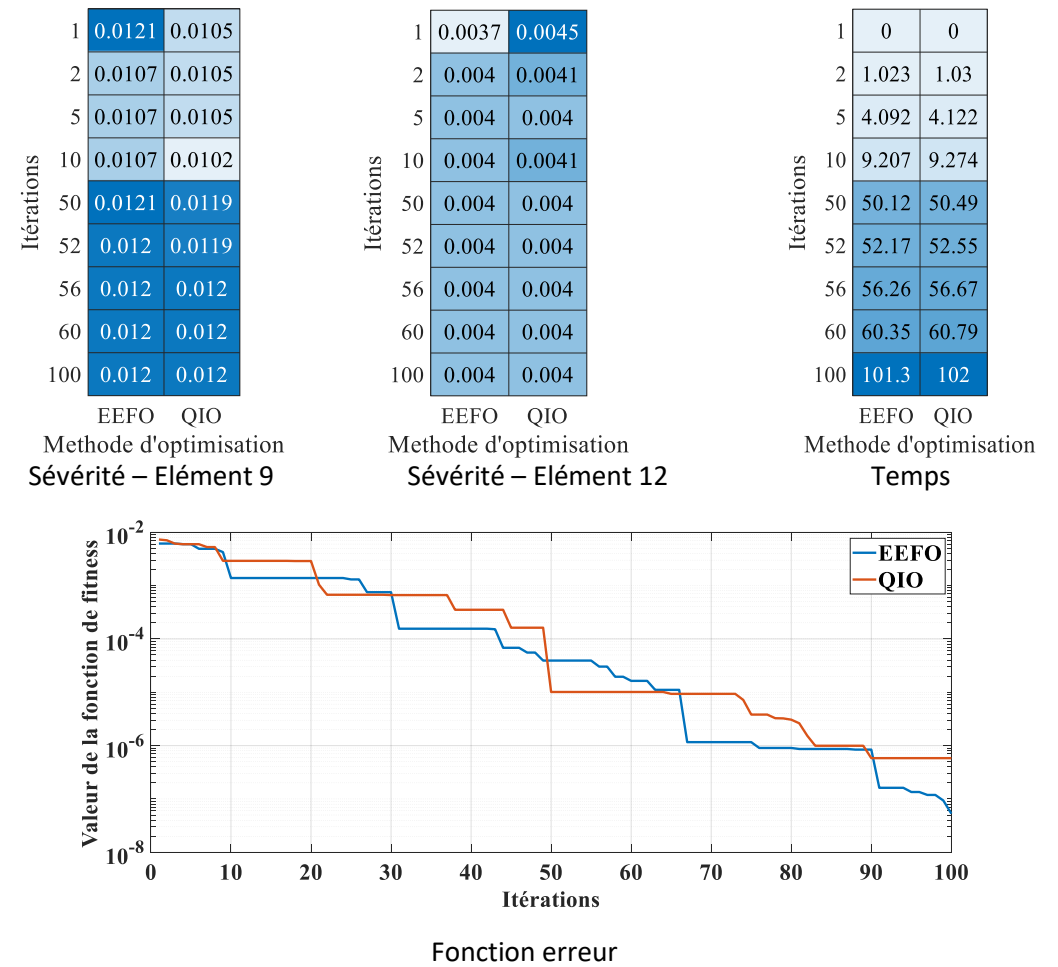


Figure 84 : Poutre flexible-libre. – Deux endommagement –J.K.Sinha– 50 population et 100 itération

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

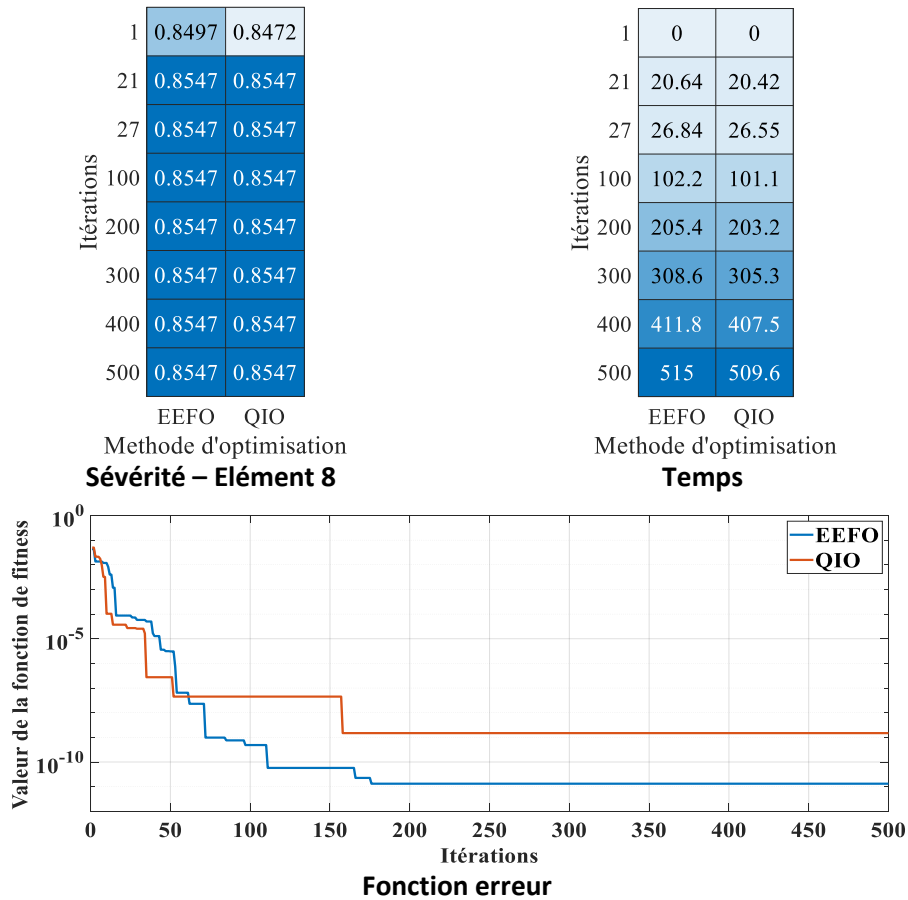


Figure 85 : Poutre flexible-libre – un seul endommagement –Réduction de rigidité E– 50 population et 500 itération.

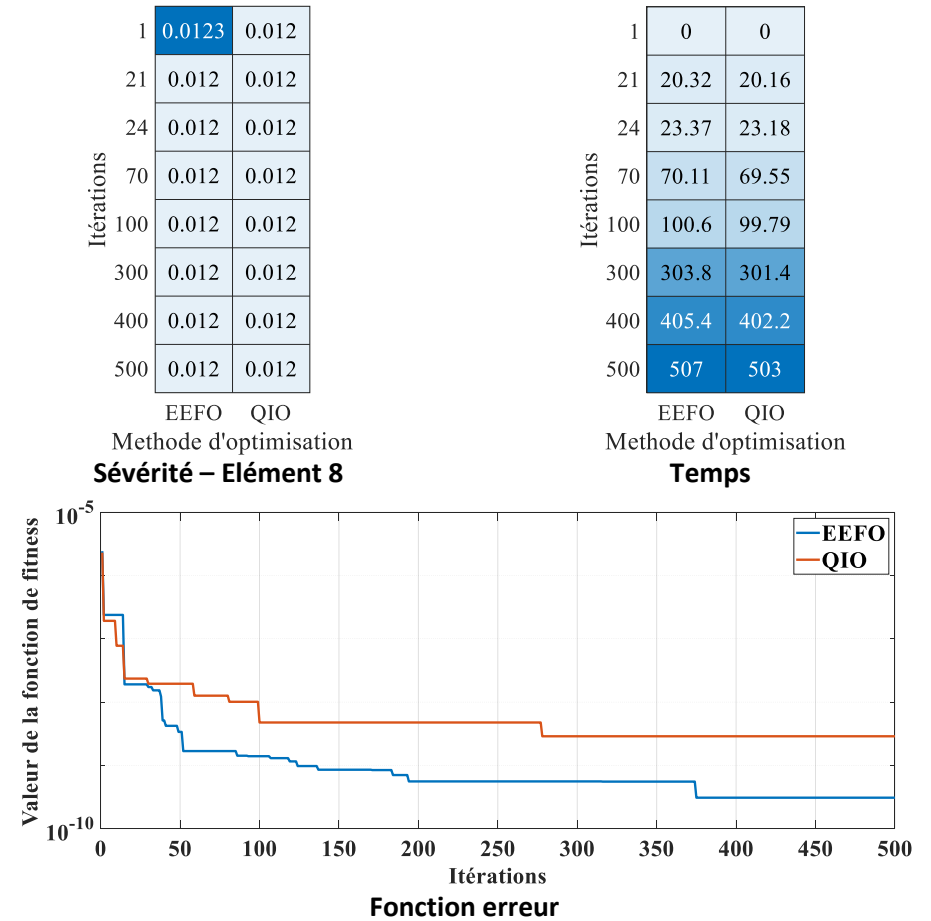


Figure 86 : Poutre flexible-libre – un seul endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 500 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

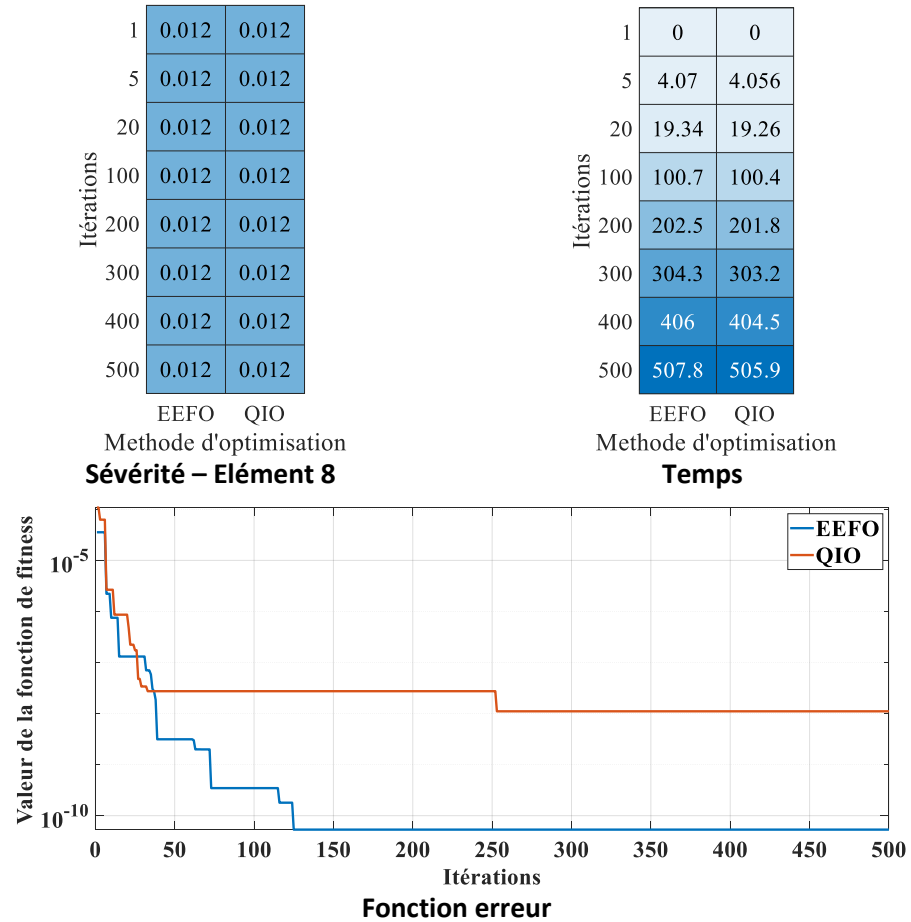


Figure 87 : Poutre flexible-libre – un seul endommagement –J.K.Sinha– 50 population et 500 itération.

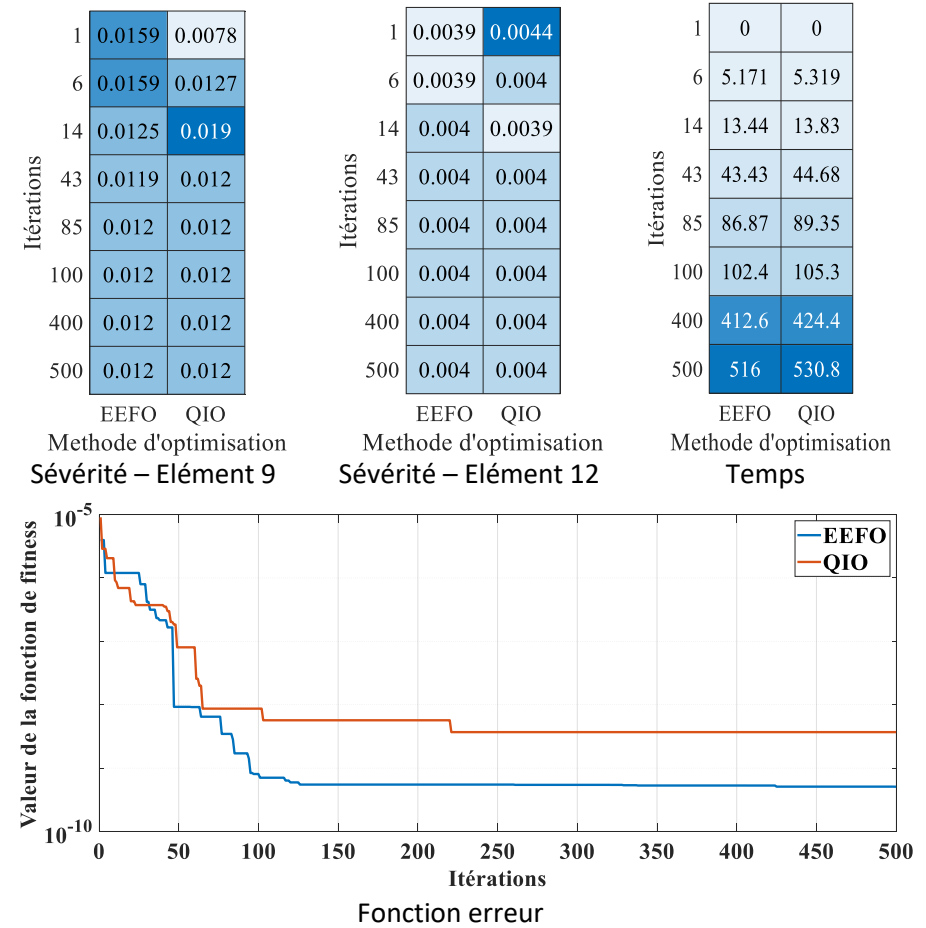


Figure 88 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 500 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

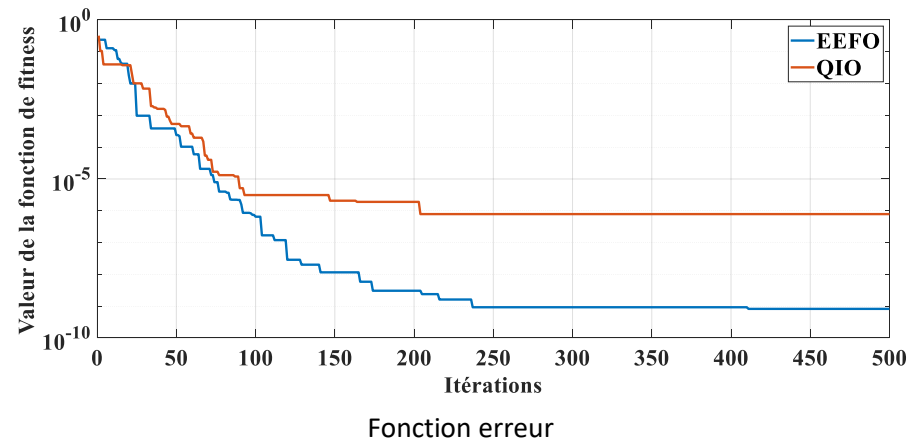
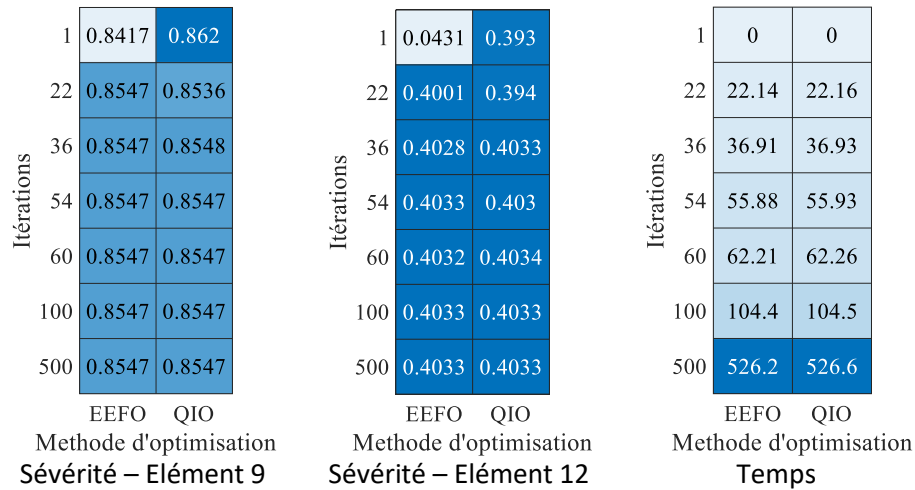


Figure89 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement –Réduction de rigidité E– 50 population et 500 itération.

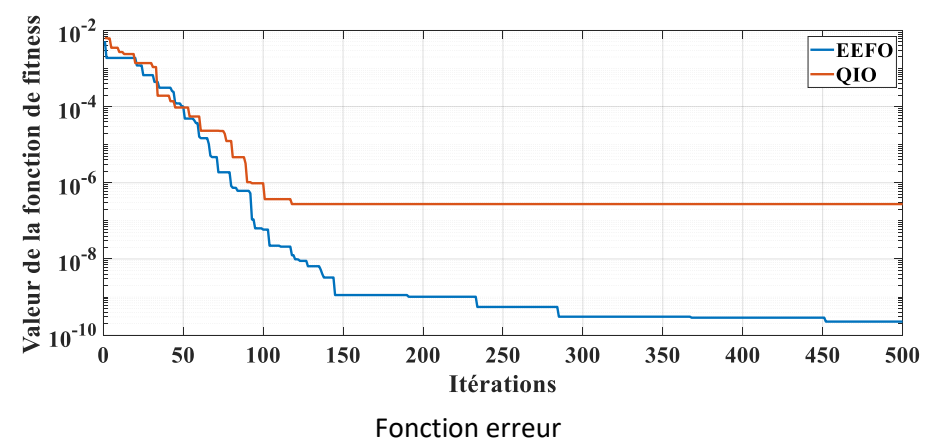
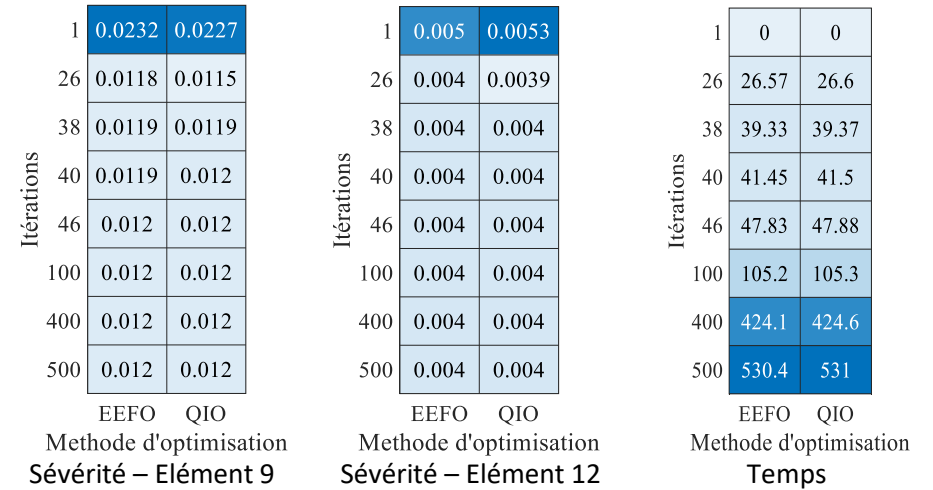


Figure 90 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement –S.K.Sinha– 50 population et 500 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

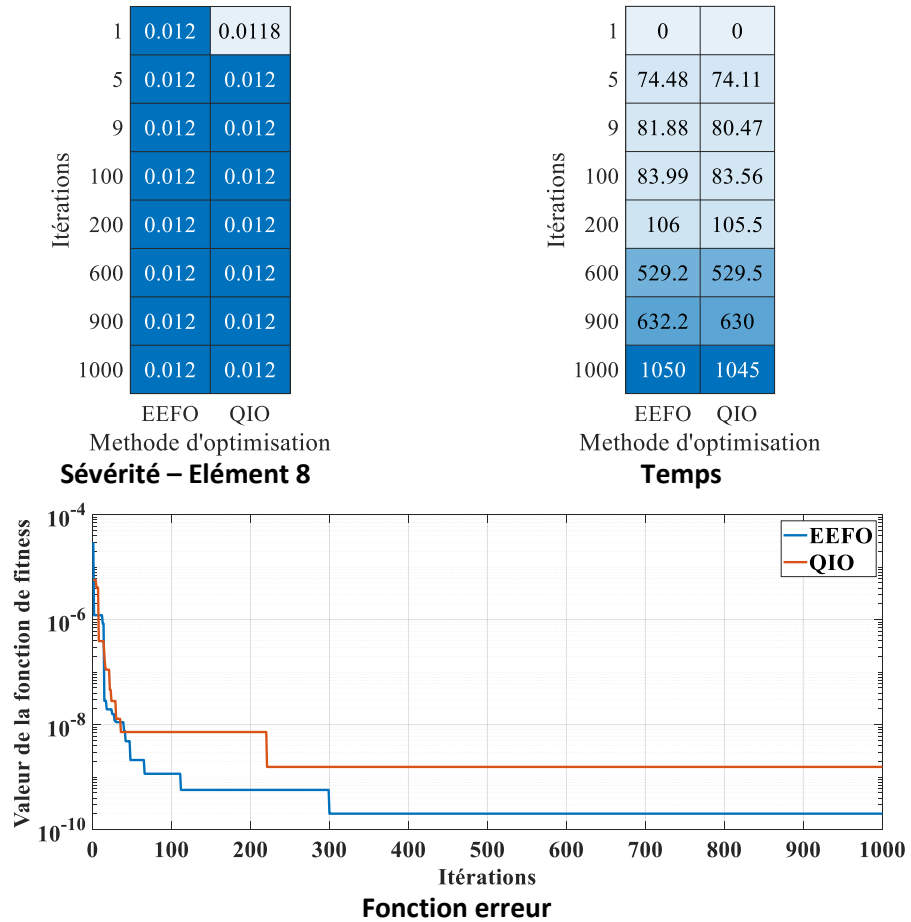


Figure 91 : Poutre flexible-libre – un seul endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 1000 itération.

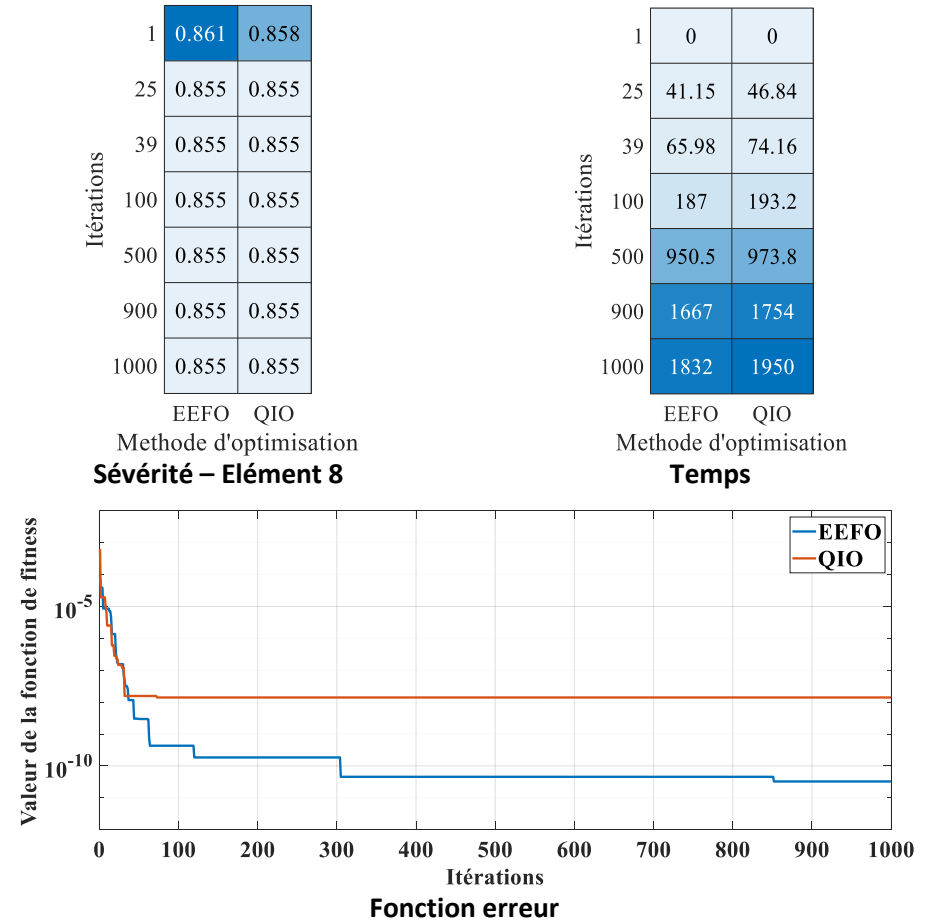


Figure 92 : Poutre flexible-libre – un seul endommagement –Réduction de rigidité E– 50 population et 1000 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

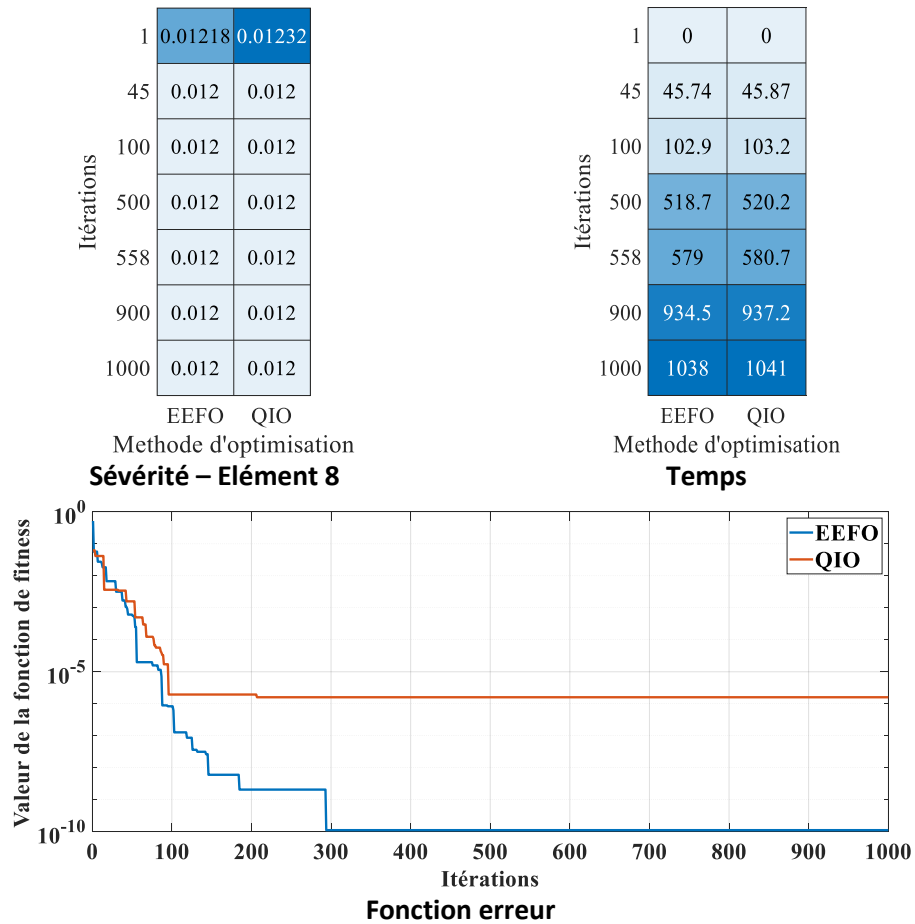


Figure 93 : Poutre flexible-libre – un seul endommagement –J.K.Sinha– 50 population et 1000 itération.

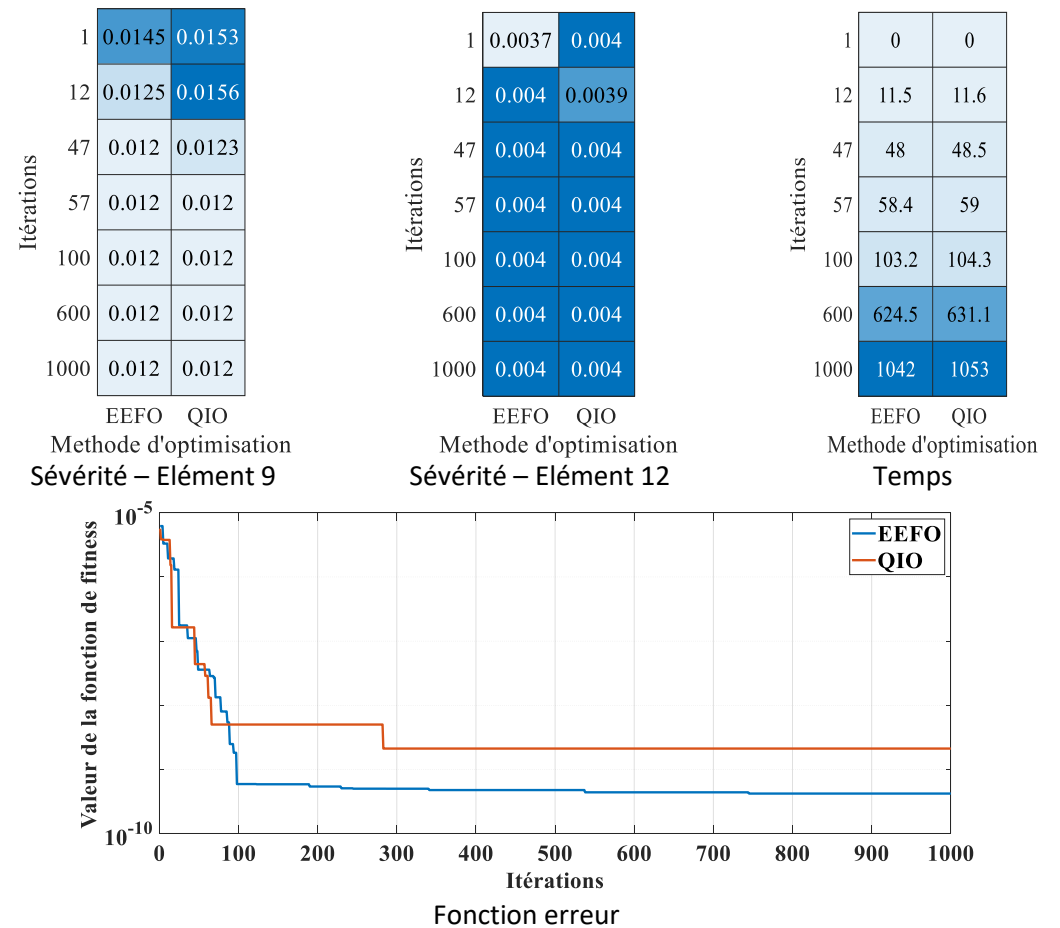


Figure 94 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement –Paipetis & Dimarogonas– 50 population et 1000 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

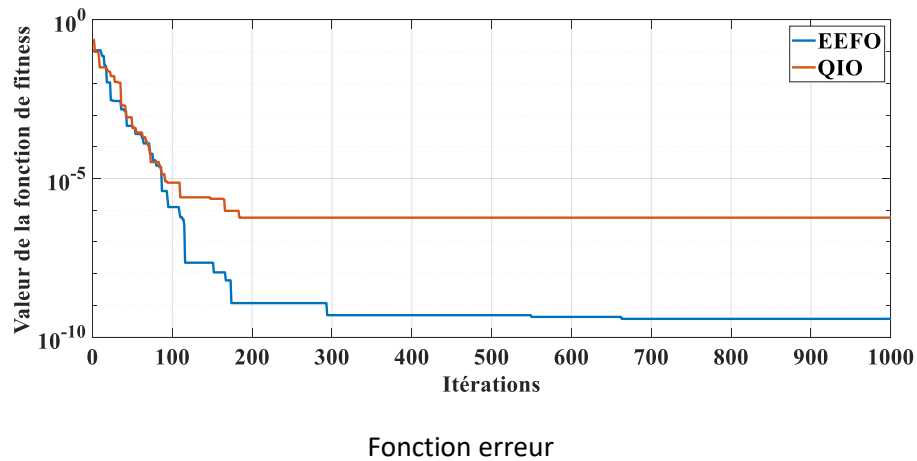
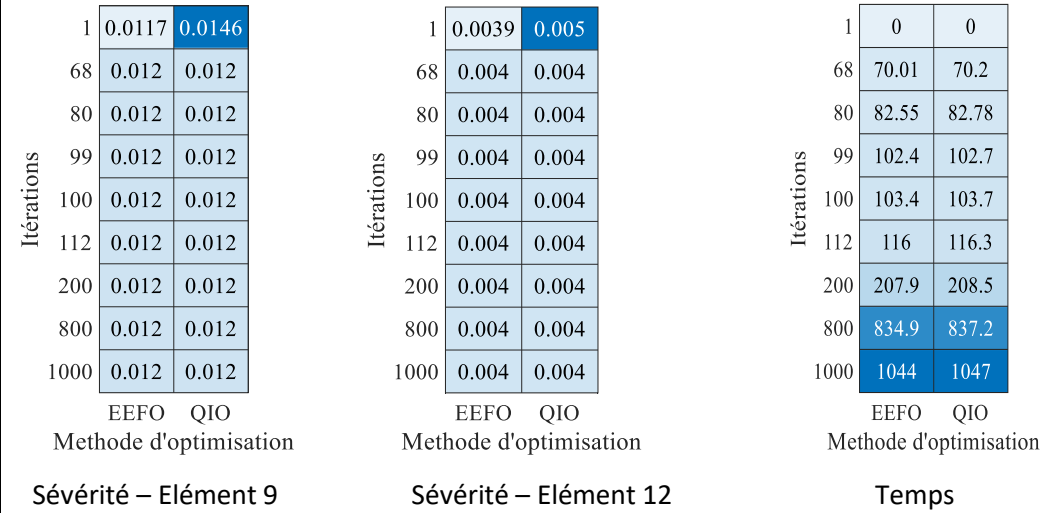
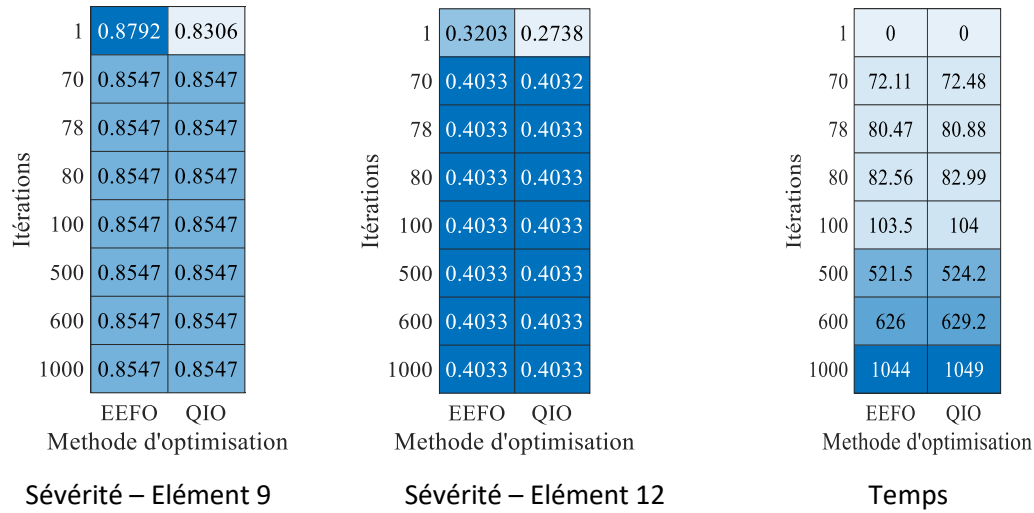


Figure 95 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement – Réduction de rigidité E– 50 population et 1000 itération.

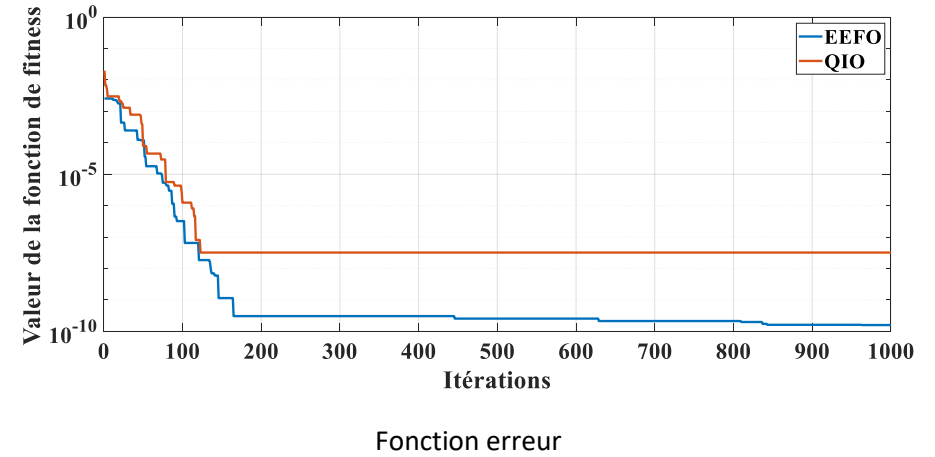


Figure 96 : Poutre flexible-libre – Deux endommagement – J.K.Sinha– 50 population et 1000 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Discussion sur les résultats :

Outre les algorithmes précédemment mentionnée, l'étude a également évalué l'efficacité des deux technique QIO et EEFO pour la quantification des dommages dans la poutre flexible-libre en aluminium qui est discrétisé en 16 élément. Les résultats obtenus par ces deux méthodes d'optimisation ont également permis de converger avec précision vers la quantification des dommages pour ce modèle de structures mécaniques.

4.6.3 Application pour une poutre appuis simple

Nous avons appliqué les mêmes conditions expérimentales à une poutre simple, qu'elle soit de type encasté-encasté ou flexible-libre. Les résultats des techniques d'optimisation QIO et EEFO sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Ces données permettent de comparer directement les performances de QIO et EEFO dans des configurations standardisées, offrant ainsi une analyse claire et concise de l'efficacité de ces méthodes pour évaluer les dommages potentiels sur une poutre de conception simple.

1	0.01	0.01
10	0.008002	0.008001
14	0.008001	0.008
19	0.008	0.008
20	0.008	0.008
30	0.008	0.008
40	0.008	0.008
50	0.008	0.008
100	0.008	0.008

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Sévérité – Élément 8

1	0	0
10	42.92	40.86
14	61.99	59.02
19	85.84	81.72
20	90.61	86.26
30	138.3	131.7
40	186	177.1
50	233.7	222.4
100	472.1	449.4

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Temps

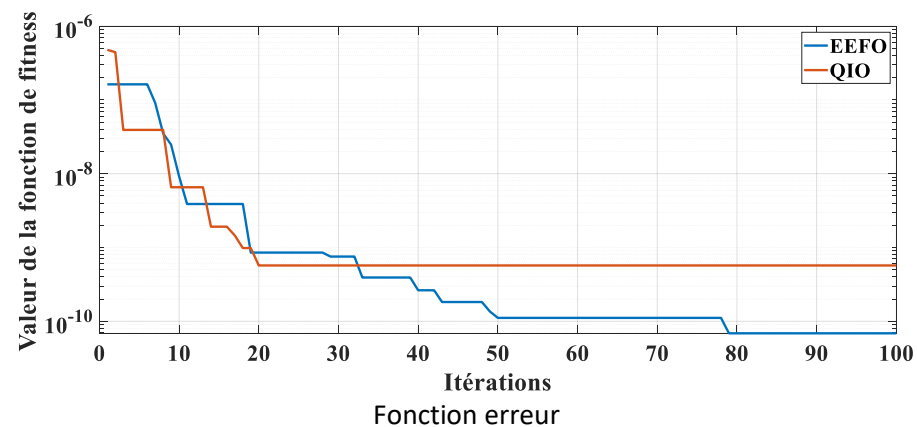


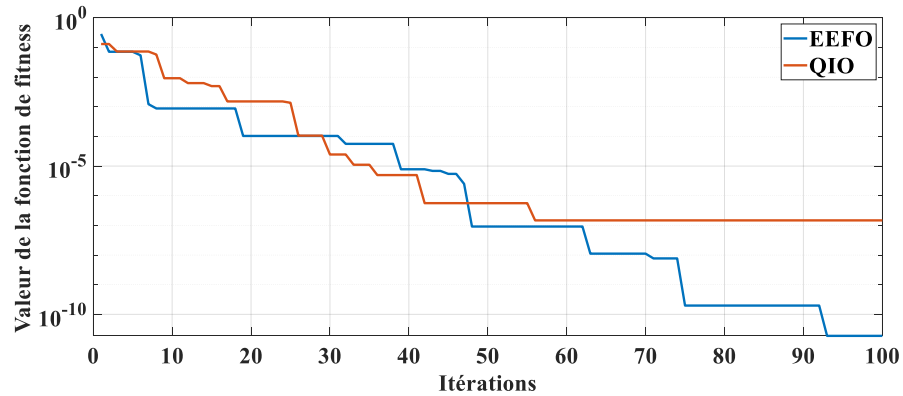
Figure 97 : poutre simple – une seule endommagement – Paipetis & Dimarogonas avec 30population et 100 itérations.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

1	0.6645	0.6732	1	0	0
10	0.6802	0.6808	10	62.1	66.47
20	0.6803	0.6804	20	131.1	140.3
30	0.6803	0.6803	30	200.1	214.2
39	0.6803	0.6803	39	262.2	280.7
40	0.6803	0.6803	40	269.1	288
50	0.6803	0.6803	50	338.1	361.9
90	0.6803	0.6803	90	614.1	657.3
100	0.6803	0.6803	100	683.1	731.2
	EEFO	QIO		EEFO	QIO
	Methode d'optimisation			Methode d'optimisation	

Sévérité – Élément 8

Temps



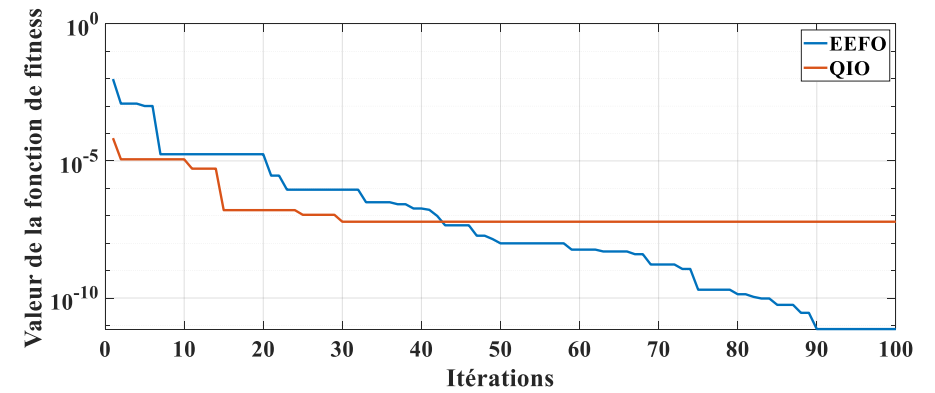
Fonction erreur

Figure 98 : Poutre simple – un seule endommagement – Réduction de rigidité avec 30population et 100 itération.

1	0.008472	0.008003	1	0	0
10	0.008001	0.008001	10	35.36	35.39
11	0.008001	0.008	11	39.29	39.32
20	0.008001	0.008	20	74.65	74.71
21	0.008	0.008	21	78.58	78.65
30	0.008	0.008	30	113.9	114
40	0.008	0.008	40	153.2	153.4
90	0.008	0.008	90	349.7	350
100	0.008	0.008	100	389	389.3
	EEFO	QIO		EEFO	QIO
	Methode d'optimisation			Methode d'optimisation	

Sévérité – Élément 8

Temps



Fonction erreur

Figure 99 : Poutre simple – un seule endommagement – J.K.Sinha– 30population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

1	0.01303	0.01145
10	0.01211	0.01194
20	0.01212	0.01202
30	0.01192	0.012
37	0.01197	0.012
40	0.012	0.012
50	0.012	0.012
52	0.012	0.012
56	0.012	0.012
80	0.012	0.012
90	0.012	0.012
100	0.012	0.012

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0.01346	0.01117
10	0.01175	0.01207
20	0.01191	0.01198
30	0.01205	0.012
37	0.01202	0.012
40	0.012	0.012
50	0.012	0.012
52	0.012	0.012
56	0.012	0.012
80	0.012	0.012
90	0.012	0.012
100	0.012	0.012

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0	0
10	36.81	36.41
20	77.71	76.87
30	118.6	117.3
37	147.2	145.6
40	159.5	157.8
50	200.4	198.2
52	208.6	206.3
56	225	222.5
80	323.1	319.6
90	364	360.1
100	404.9	400.5

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0.8267	0.8164
10	0.858	0.8571
20	0.858	0.8552
40	0.8548	0.8547
48	0.8547	0.8547
50	0.8547	0.8547
56	0.8547	0.8547
60	0.8547	0.8547
65	0.8547	0.8547
67	0.8547	0.8547
90	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0.8557	0.8204
10	0.8568	0.8671
20	0.8568	0.8552
40	0.8547	0.8547
48	0.8547	0.8547
50	0.8547	0.8547
56	0.8547	0.8547
60	0.8547	0.8547
65	0.8547	0.8547
67	0.8547	0.8547
90	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0	0
10	35.6	36.49
20	75.16	77.03
40	154.3	158.1
48	185.9	190.5
50	193.8	198.6
56	217.6	223
60	233.4	239.2
65	253.2	259.5
67	261.1	267.6
90	352.1	360.8
100	391.6	401.4

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Sévérité – Élément 9

Sévérité – Élément 12

Temps (a)

Sévérité – Élément 9

Sévérité – Élément 12

Temps

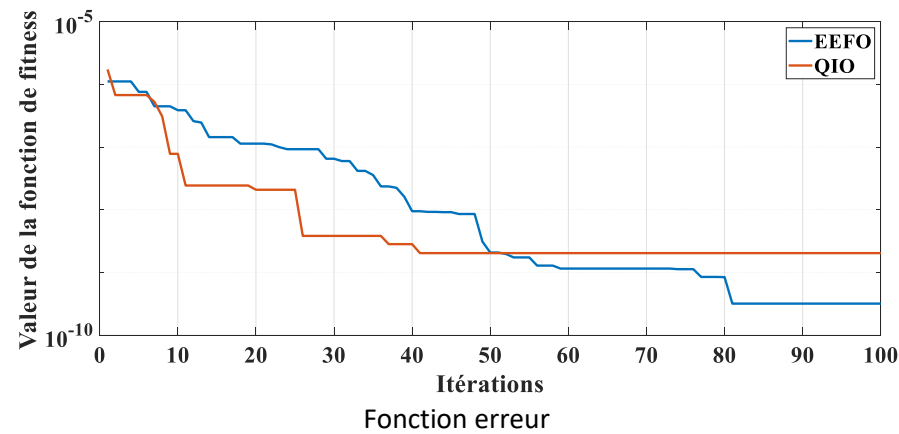


Figure 100 : Poutre simple – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 30population et 100 itération.

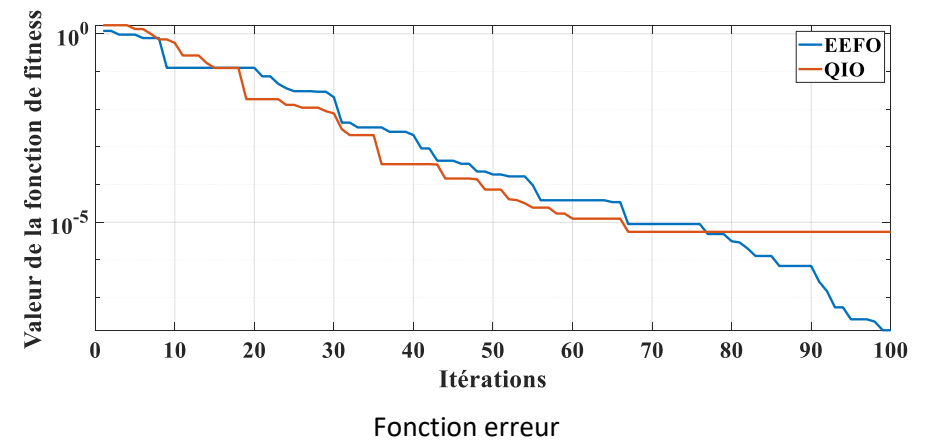


Figure 101 : Poutre simple – Deux endommagement – Réduction de rigidité E– 30population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

1	0.01224	0.01148
10	0.01205	0.01209
20	0.01202	0.01199
28	0.012	0.012
30	0.012	0.012
33	0.012	0.012
40	0.012	0.012
47	0.012	0.012
50	0.012	0.012
90	0.012	0.012
100	0.012	0.012

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0.01525	0.01242
10	0.0117	0.01223
20	0.01185	0.012
28	0.01199	0.012
30	0.01199	0.012
33	0.01199	0.012
40	0.012	0.012
47	0.012	0.012
50	0.012	0.012
90	0.012	0.012
100	0.012	0.012

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0	0
10	38.66	40.18
20	81.62	84.83
28	116	120.5
30	124.6	129.5
33	137.5	142.9
40	167.5	174.1
47	197.6	205.4
50	210.5	218.8
90	382.3	397.3
100	425.3	442

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0.007987	0.008063
10	0.008001	0.007999
12	0.008001	0.008
13	0.008	0.008
20	0.008	0.008
30	0.008	0.008
40	0.008	0.008
50	0.008	0.008
80	0.008	0.008
90	0.008	0.008
100	0.008	0.008

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0	0
10	145	196.7
12	177.3	240.4
13	193.4	262.3
20	306.2	415.3
30	467.3	633.9
40	628.4	852.5
50	789.6	1071
80	1273	1727
90	1434	1945
100	1595	2164

EEFO QIO
Methode d'optimisation

(b) Sévérité – Elément 9

(c) Sévérité – Elément 12

(d) Temps

Sévérité – Elément 8

Temps

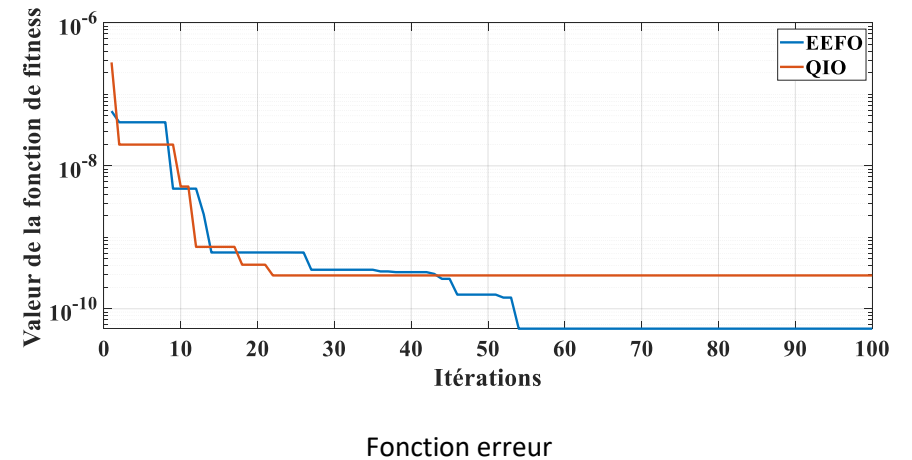
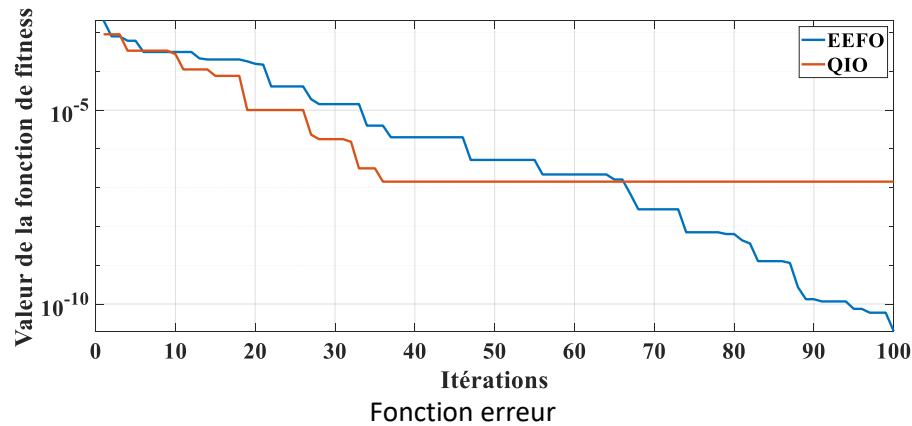


Figure 102 : Poutre simple – Deux endommagement – J.K.Sinha– 30population et 100 itération.

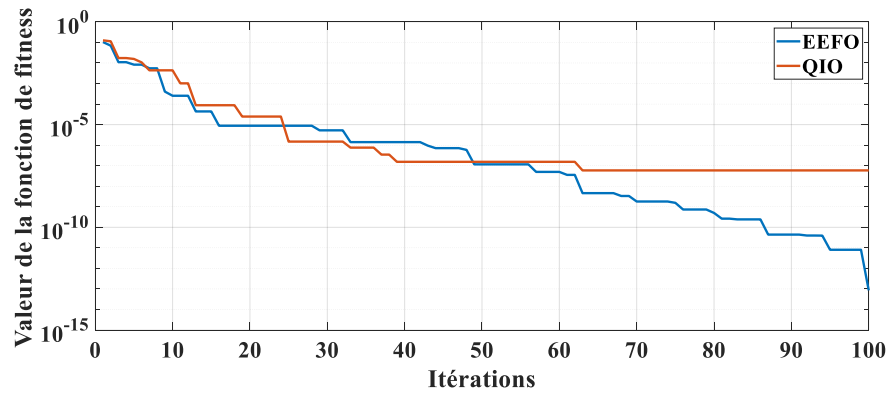
Figure 103 : Poutre simple – un seule endommagement – Paipetis & Dimarogonas avec 100population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

1	0.6746	0.6734	1	0	0
10	0.6803	0.68	10	122.6	122.6
20	0.6803	0.6803	20	258.8	258.8
25	0.6803	0.6803	25	326.9	326.9
29	0.6803	0.6803	29	381.4	381.3
30	0.6803	0.6803	30	395	395
40	0.6803	0.6803	40	531.2	531.1
50	0.6803	0.6803	50	667.4	667.3
90	0.6803	0.6803	90	1212	1212
100	0.6803	0.6803	100	1348	1348
	EEFO	QIO		EEFO	QIO
	Methode d'optimisation			Methode d'optimisation	

Sévérité – Elément 8

Temps



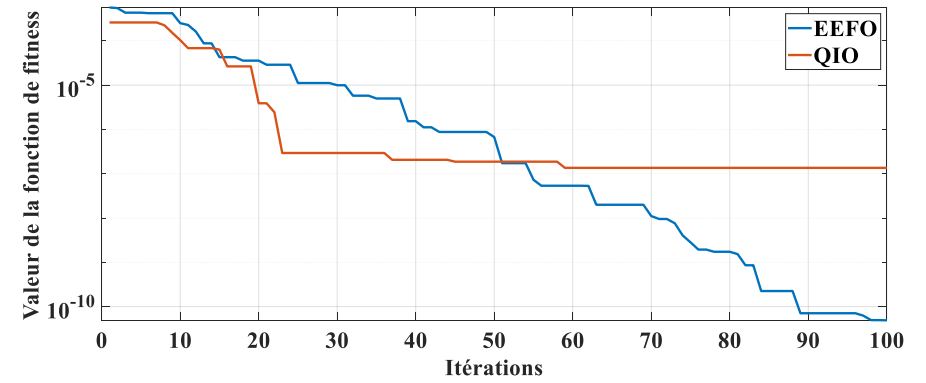
Fonction erreur

Figure 104 : Poutre simple – un seule endommagement – Réduction de rigidité avec 100population et 100 itération.

1	0.008087	0.008004	1	0	0
10	0.008005	0.008004	10	95.52	90.59
20	0.008	0.008	20	201.7	191.2
26	0.008	0.008	26	265.3	251.6
30	0.008	0.008	30	307.8	291.9
40	0.008	0.008	40	413.9	392.5
41	0.008	0.008	41	424.5	402.6
50	0.008	0.008	50	520.1	493.2
90	0.008	0.008	90	944.6	895.8
100	0.008	0.008	100	1051	996.5
	EEFO	QIO		EEFO	QIO
	Methode d'optimisation			Methode d'optimisation	

Sévérité – Elément 8

Temps



Fonction erreur

Figure 105 : Poutre simple – un seule endommagement – J.K.Sinha– 100population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Itérations	EEFO	QIO
1	0.01174	0.01188
10	0.01202	0.01207
20	0.01199	0.01199
22	0.01199	0.012
27	0.012	0.012
30	0.012	0.012
40	0.012	0.012
50	0.012	0.012
90	0.012	0.012
100	0.012	0.012

Methode d'optimisation

Itérations	EEFO	QIO
1	0.01173	0.01217
10	0.01198	0.01194
20	0.01201	0.01202
26	0.01201	0.012
30	0.012	0.012
40	0.012	0.012
41	0.012	0.012
50	0.012	0.012
90	0.012	0.012
100	0.012	0.012

Methode d'optimisation

Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
10	161.3	143.5
20	340.5	302.9
22	376.3	334.7
27	465.9	414.4
30	519.7	462.3
40	698.9	621.7
50	878.1	781.1
90	1595	1419
100	1774	1578

Methode d'optimisation

Sévérité – Elément 9

Sévérité – Elément 12

Temps

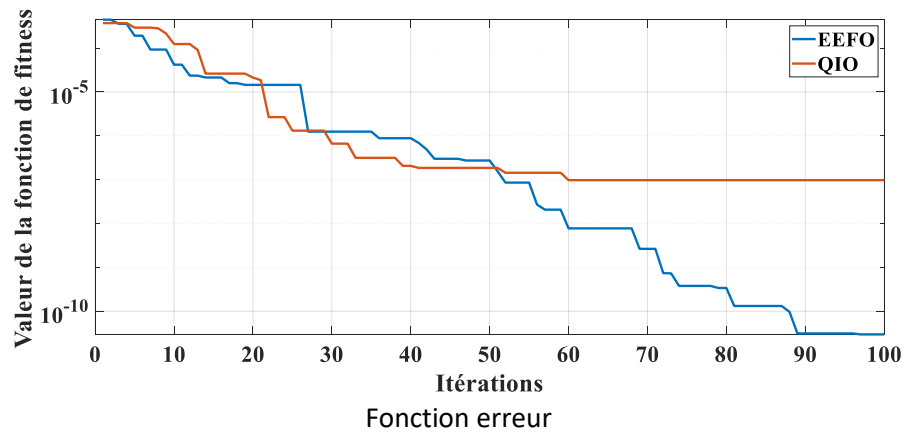


Figure 106 : poutre simple – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 100population et 100 itération.

Itérations	EEFO	QIO
1	0.8939	0.862
10	0.8487	0.8525
30	0.8547	0.8547
40	0.8547	0.8547
46	0.8547	0.8547
50	0.8547	0.8547
51	0.8547	0.8547
59	0.8547	0.8547
60	0.8547	0.8547
67	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547

Methode d'optimisation

Itérations	EEFO	QIO
1	0.826	0.873
10	0.8507	0.8546
30	0.8549	0.8547
40	0.8547	0.8547
46	0.8547	0.8547
50	0.8547	0.8547
51	0.8547	0.8547
59	0.8547	0.8547
60	0.8547	0.8547
67	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547

Methode d'optimisation

Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
10	122.2	123.9
30	393.6	399.3
40	529.4	537
46	610.8	619.6
50	665.1	674.7
51	678.7	688.4
59	787.2	798.6
60	800.8	812.4
67	895.8	908.7
100	1344	1363

Methode d'optimisation

Sévérité – Elément 9

Sévérité – Elément 12

Temps

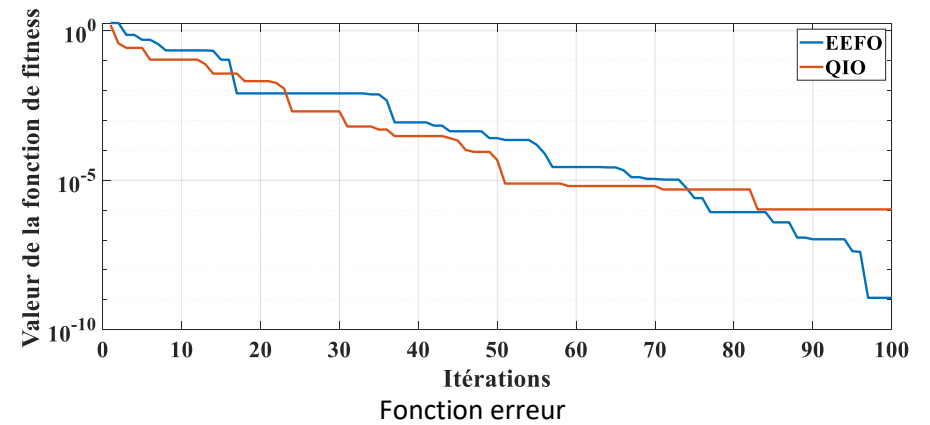


Figure 107 : Poutre simple – Deux endommagement – Réduction de rigidité E– 100population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Itérations	EEFO	QIO
1	0.01174	0.01188
10	0.01202	0.01207
20	0.01199	0.01199
22	0.01199	0.012
27	0.012	0.012
30	0.012	0.012
40	0.012	0.012
50	0.012	0.012
90	0.012	0.012
100	0.012	0.012

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Itérations	EEFO	QIO
1	0.01173	0.01217
10	0.01198	0.01194
20	0.01201	0.01202
22	0.01201	0.012
27	0.012	0.012
30	0.012	0.012
40	0.012	0.012
50	0.012	0.012
90	0.012	0.012
100	0.012	0.012

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
10	161.3	143.5
20	340.5	302.9
22	376.3	334.7
27	465.9	414.4
30	519.7	462.3
40	698.9	621.7
50	878.1	781.1
90	1595	1419
100	1774	1578

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Itérations	EEFO	QIO
1	0.007965	0.00805
10	0.008	0.007999
16	0.008	0.008
20	0.008	0.008
30	0.008	0.008
40	0.008	0.008
50	0.008	0.008
90	0.008	0.008
100	0.008	0.008

EEFO QIO
Methode d'optimisation

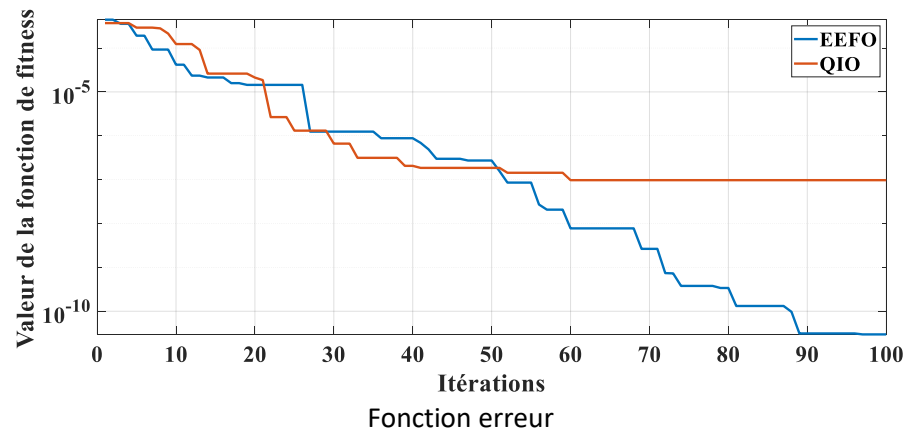
Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
10	345	346.3
16	575	577.1
20	728.3	731
30	1112	1116
40	1495	1501
50	1878	1885
90	3411	3424
100	3795	3809

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Sévérité – Élément
9

Sévérité – Élément
12

Temps



Sévérité – Élément 8

Temps

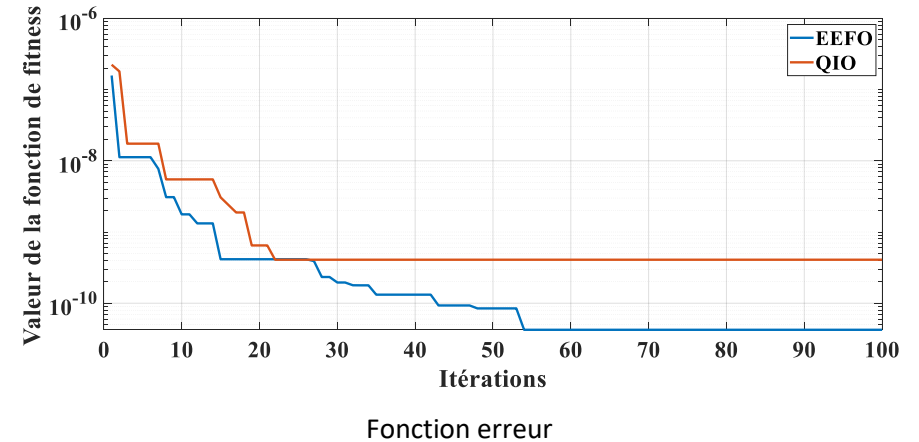


Figure 108 : Poutre simple – Deux endommagement – J.K.Sinha – 100population et 100 itération.

Figure 109 : Poutre simple – un seule endommagement – Paipetis & Dimarogonas avec 200population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

1	0.6781	0.6805
10	0.6801	0.6803
20	0.6803	0.6803
22	0.6803	0.6803
30	0.6803	0.6803
31	0.6803	0.6803
40	0.6803	0.6803
50	0.6803	0.6803
90	0.6803	0.6803
100	0.6803	0.6803
	EEFO	QIO
	Methode d'optimisation	

1	0	0
10	271.8	242.4
20	573.7	511.7
22	634.1	565.6
30	875.7	781.1
31	905.9	808
40	1178	1050
50	1480	1320
90	2688	2397
100	2989	2666
	EEFO	QIO
	Methode d'optimisation	

Sévérité – Elément 8

Temps

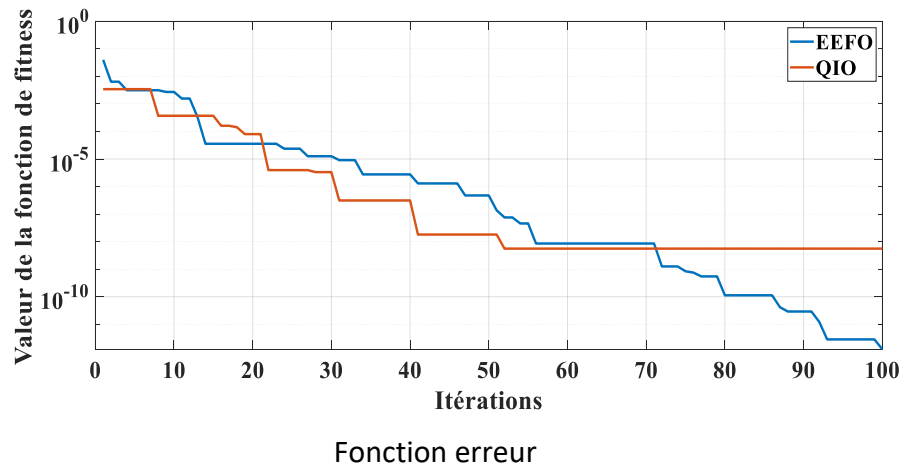


Figure 110 : Poutre simple – un seule endommagement – Réduction de rigidité avec 200population et 100 itération.

1	0.007961	0.007998
4	0.008014	0.008
10	0.007999	0.008
14	0.008	0.008
20	0.008	0.008
30	0.008	0.008
40	0.008	0.008
50	0.008	0.008
90	0.008	0.008
100	0.008	0.008
	EEFO	QIO
	Methode d'optimisation	

1	0	0
4	115	115.4
10	345	346.3
14	498.3	500.2
20	726.3	730
30	1112	1116
40	1491	1501
50	1870	1880
90	3410	3420
100	3791	3810
	EEFO	QIO
	Methode d'optimisation	

Sévérité – Elément 8

Temps

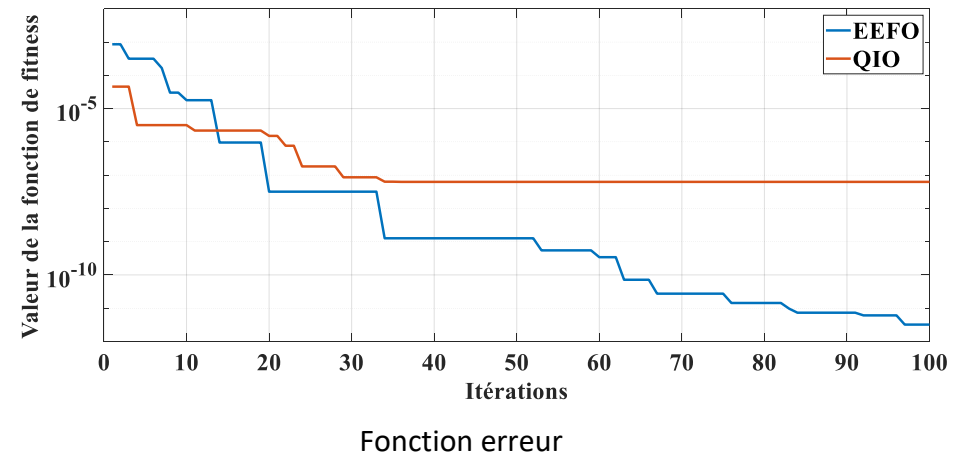


Figure 111 : Poutre simple – un seule endommagement – J.K.Sinha– 200population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

1	0.01313	0.01213
10	0.01198	0.01205
17	0.01205	0.01198
20	0.01199	0.01202
30	0.012	0.012
40	0.012	0.012
41	0.012	0.012
42	0.012	0.012
50	0.012	0.012
90	0.012	0.012
100	0.012	0.012

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0.01133	0.01179
10	0.01199	0.01203
17	0.01197	0.01201
20	0.01201	0.01199
30	0.012	0.012
40	0.012	0.012
41	0.012	0.012
42	0.012	0.012
50	0.012	0.012
90	0.012	0.012
100	0.012	0.012

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0	0
10	247	245.6
17	439.1	436.7
20	521.5	518.6
30	795.9	791.5
40	1070	1064
41	1098	1092
42	1125	1119
50	1345	1337
90	2443	2429
100	2717	2702

EEFO QIO
Methode d'optimisation

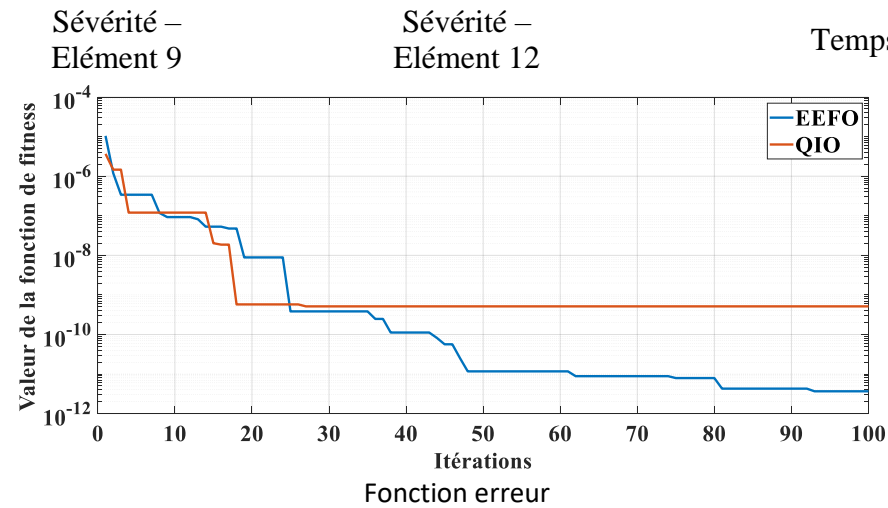


Figure 112 : Poutre simple – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 200population et 100 itération.

1	0.841	0.8186
10	0.8557	0.8542
20	0.8551	0.8554
30	0.8547	0.8547
40	0.8547	0.8547
46	0.8547	0.8547
50	0.8547	0.8547
56	0.8547	0.8547
60	0.8547	0.8547
65	0.8547	0.8547
70	0.8547	0.8547
90	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0.8249	0.8293
10	0.8565	0.8553
20	0.8548	0.8551
30	0.8547	0.8548
40	0.8547	0.8547
46	0.8547	0.8547
50	0.8547	0.8547
56	0.8547	0.8547
60	0.8547	0.8547
65	0.8547	0.8547
70	0.8547	0.8547
90	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0	0
10	295.7	292.4
20	624.4	617.3
30	953	942.2
40	1282	1267
46	1479	1462
50	1610	1592
56	1807	1787
60	1939	1917
65	2103	2079
70	2267	2242
90	2925	2891
100	3253	3216

EEFO QIO
Methode d'optimisation

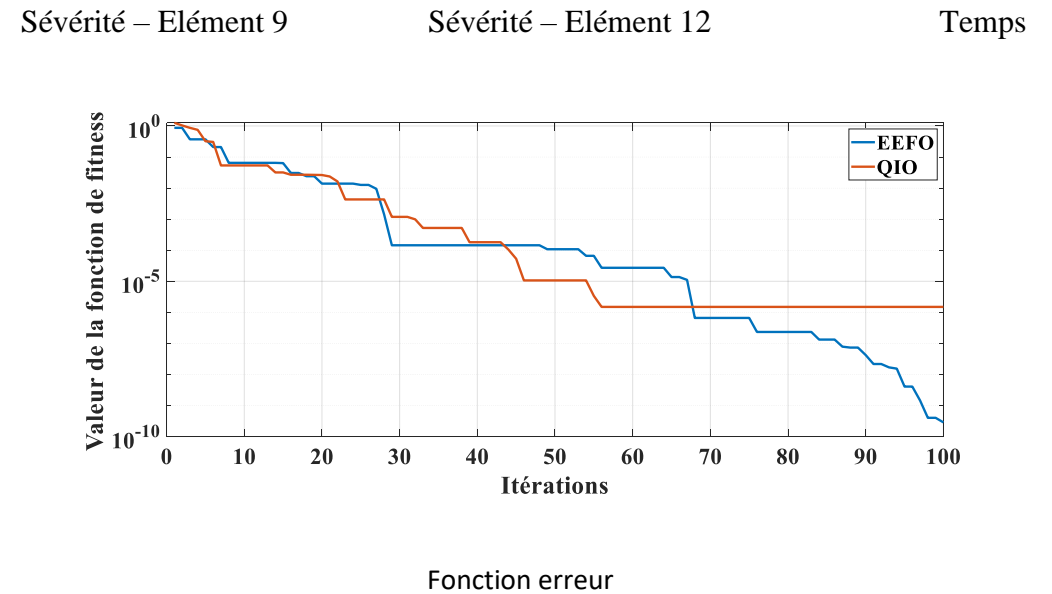


Figure 113 : Poutre simple – Deux endommagement – Réduction de rigidité E– 200population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Itérations	EEFO	QIO
1	0.01199	0.01196
10	0.012	0.01199
20	0.01199	0.012
26	0.012	0.012
27	0.012	0.012
29	0.012	0.012
30	0.012	0.012
39	0.012	0.012
40	0.012	0.012
50	0.012	0.012
90	0.012	0.012
100	0.012	0.012

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Itérations	EEFO	QIO
1	0.01234	0.01186
10	0.01206	0.01203
20	0.01203	0.01199
26	0.01199	0.012
27	0.01199	0.012
29	0.012	0.012
30	0.012	0.012
39	0.012	0.012
40	0.012	0.012
50	0.012	0.012
90	0.012	0.012
100	0.012	0.012

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
10	444.9	309.4
20	939.2	653.2
26	1236	859.4
27	1285	893.8
29	1384	962.6
30	1434	996.9
39	1878	1306
40	1928	1341
50	2422	1684
90	4400	3060
100	4894	3403

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Itérations	EEFO	QIO
1	0.007987	0.007902
10	0.008001	0.007997
12	0.008001	0.008002
19	0.008	0.008
20	0.008	0.008
40	0.008	0.008
50	0.008	0.008
90	0.008	0.008
100	0.008	0.008

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
10	72.64	73.03
12	88.78	89.26
19	145.3	146.1
20	153.3	154.2
40	314.8	316.5
50	395.5	397.6
90	718.3	722.2
100	799	803.4

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Sévérité – Elément
9

Sévérité –
Elément 12

Temps

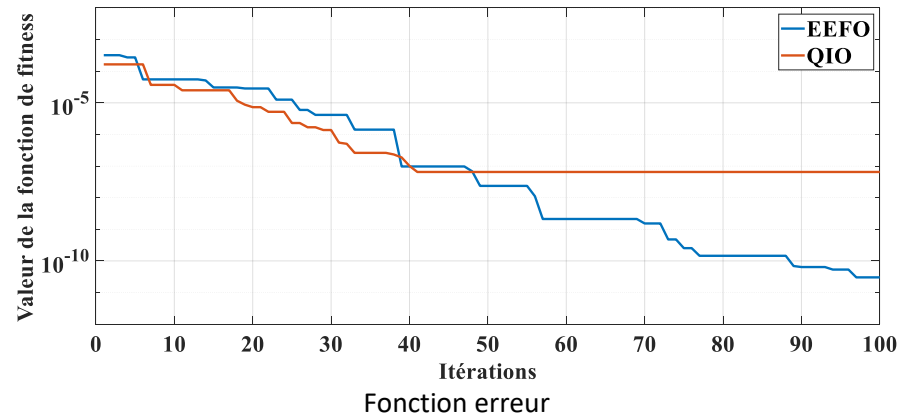


Figure 114 : Poutre simple – Deux endommagement – J.K.Sinha – 200 population et 100 itération.

Sévérité – Elément 8

Temps

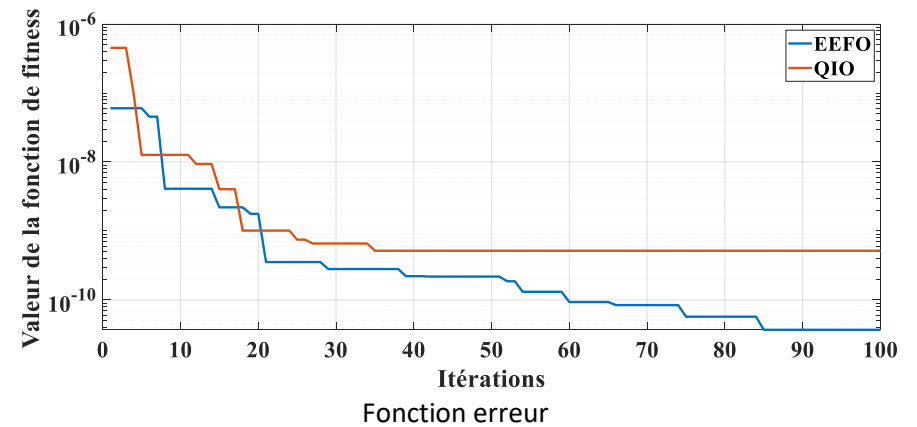


Figure 115 : Poutre simple – un seule endommagement – Paipetis & Dimarogonas avec 50 population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Itérations	EEFO	QIO	Itérations	EEFO	QIO
1	0.6874	0.6802	1	0	0
10	0.6802	0.6802	10	70.49	76.4
20	0.6802	0.6802	20	148.8	161.3
25	0.6803	0.6803	25	188	203.7
30	0.6803	0.6803	30	227.1	246.2
40	0.6803	0.6803	40	305.5	331.1
50	0.6803	0.6803	50	383.8	415.9
90	0.6803	0.6803	90	697.1	755.5
100	0.6803	0.6803	100	775.4	840.4

Methode d'optimisation

Itérations	EEFO	QIO	Itérations	EEFO	QIO
1	0.008242	0.007844	1	0	0
10	0.008002	0.008002	10	73.12	80.05
12	0.008	0.007998	12	89.37	97.83
20	0.008	0.008	20	154.4	169
22	0.008	0.008	22	170.6	186.8
30	0.008	0.008	30	235.6	257.9
40	0.008	0.008	40	316.9	346.9
50	0.008	0.008	50	398.1	435.8
90	0.008	0.008	90	723.1	791.6
100	0.008	0.008	100	804.3	880.5

Methode d'optimisation

Sévérité – Élément 8

Temps

Sévérité – Élément 8

Temps

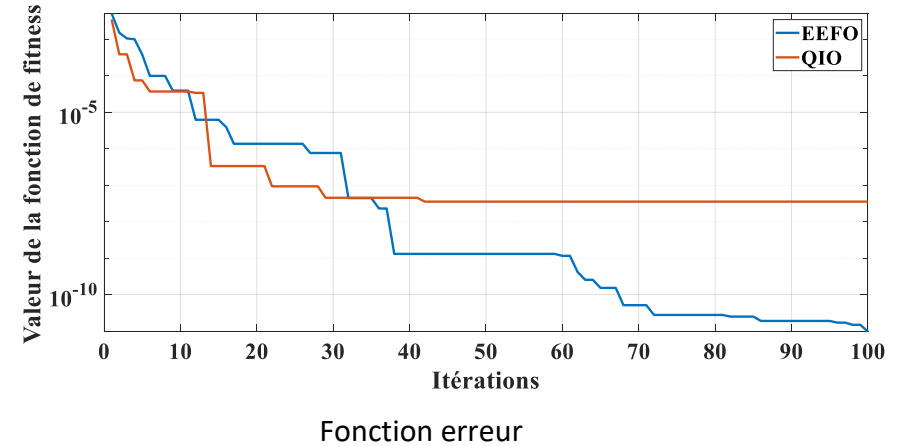
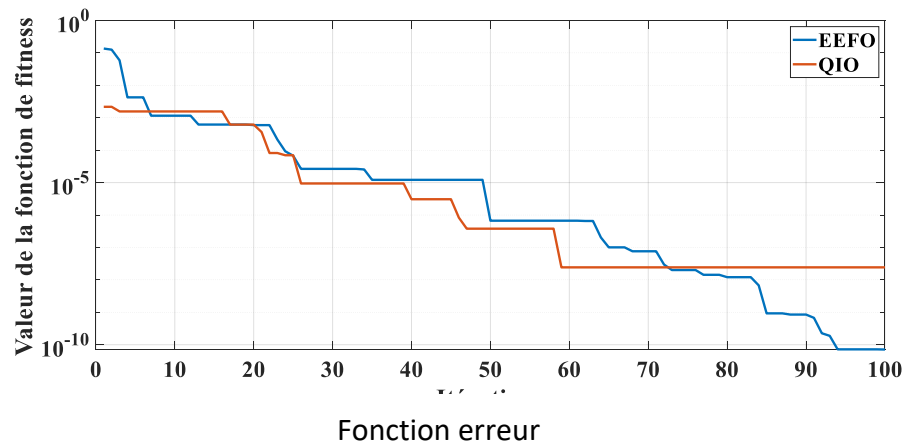


Figure 116 : Poutre simple – un seule endommagement – Réduction de rigidité avec 50population et 100 itération.

Figure 117 : Poutre simple – un seule endommagement – J.K.Sinha– 50population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

1	0.01267	0.01297
10	0.01189	0.01186
20	0.01204	0.01195
30	0.01199	0.012
40	0.012	0.012
50	0.012	0.012
55	0.012	0.012
80	0.012	0.012
100	0.012	0.012

EEFO QIO

Methode d'optimisation

1	0	0
10	70.78	69.73
20	149.4	147.2
30	228.1	224.7
40	306.7	302.2
50	385.3	379.6
55	424.7	418.4
80	621.3	612.1
100	778.6	767

EEFO QIO

Methode d'optimisation

1	0.01168	0.01116
10	0.01207	0.01205
20	0.01195	0.01203
30	0.01201	0.01201
40	0.012	0.012
50	0.012	0.012
55	0.012	0.012
80	0.012	0.012
100	0.012	0.012

EEFO QIO

Methode d'optimisation

1	0.8948	0.8747
10	0.8498	0.8508
20	0.8572	0.8567
30	0.8547	0.8546
40	0.8547	0.8547
50	0.8547	0.8547
60	0.8547	0.8547
69	0.8547	0.8547
70	0.8547	0.8547
76	0.8547	0.8547
80	0.8547	0.8547
90	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547

EEFO QIO

Methode d'optimisation

1	0.85	0.8524
10	0.8542	0.8519
20	0.8552	0.8546
30	0.8549	0.8549
40	0.8547	0.8547
50	0.8547	0.8547
60	0.8547	0.8547
69	0.8547	0.8547
70	0.8547	0.8547
76	0.8547	0.8547
80	0.8547	0.8547
90	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547

EEFO QIO

Methode d'optimisation

1	0	0
10	83.42	73.33
20	176.1	154.8
30	268.8	236.3
40	361.5	317.8
50	454.2	399.2
60	546.8	480.7
69	630.3	554
70	639.5	562.2
76	695.1	611.1
80	732.2	643.6
90	824.9	725.1
100	917.6	806.6

EEFO QIO

Methode d'optimisation

Sévérité – Élément 9

Sévérité – Élément 12

Temps

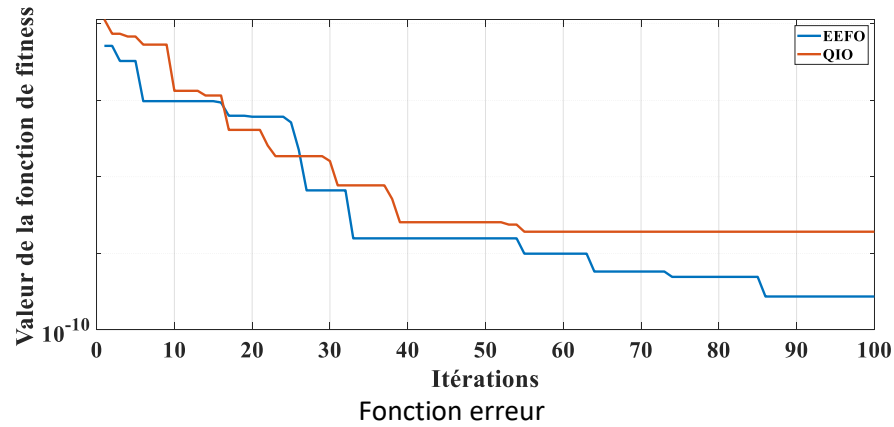


Figure 118 : Poutre simple – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 50population et 100 itération.

Sévérité – Élément 9

Sévérité – Élément 12

Temps

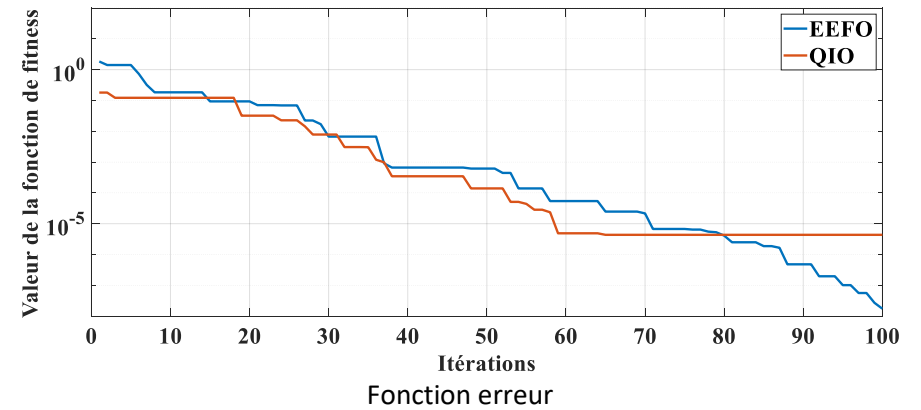


Figure 119 : Poutre simple – Deux endommagement – Réduction de rigidité E– 50population et 100 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Itérations	EEFO	QIO	Itérations	EEFO	QIO	Itérations	EEFO	QIO
1	0.01232	0.01238	1	0.01151	0.01334	1	0	0
10	0.01185	0.01193	10	0.01203	0.01207	10	72.1	70.18
20	0.012	0.012	20	0.01201	0.01199	20	152.2	148.2
23	0.01201	0.012	23	0.01199	0.012	23	176.3	171.5
30	0.012	0.012	30	0.012	0.012	30	232.3	226.1
33	0.012	0.012	33	0.012	0.012	33	256.4	249.5
39	0.012	0.012	39	0.012	0.012	39	304.4	296.3
40	0.012	0.012	40	0.012	0.012	40	312.4	304.1
50	0.012	0.012	50	0.012	0.012	50	392.6	382.1
90	0.012	0.012	90	0.012	0.012	90	713	694
100	0.012	0.012	100	0.012	0.012	100	793.1	772

Sévérité – Elément 9

Sévérité –
Elément 12

Temps

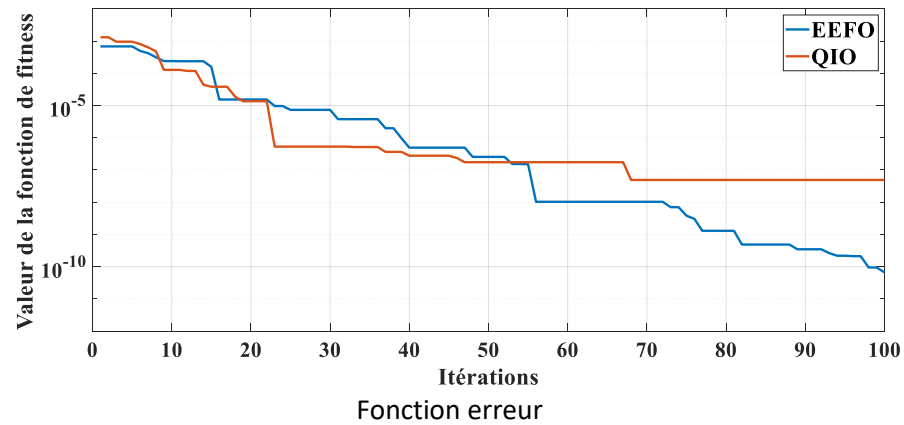


Figure 120 : Poutre simple – Deux endommagement – J.K.Sinha– 50 population et 100 itération.

Itérations	EEFO	QIO	Itérations	EEFO	QIO
1	0.007818	0.008	1	0	0
19	0.008	0.008	19	174.3	169.4
100	0.008	0.008	100	957.4	932.5
200	0.008	0.008	200	1928	1871
300	0.008	0.008	300	2895	2813
400	0.008	0.008	400	3862	3754
500	0.008	0.008	500	4841	4795

Sévérité – Elément 8

Temps

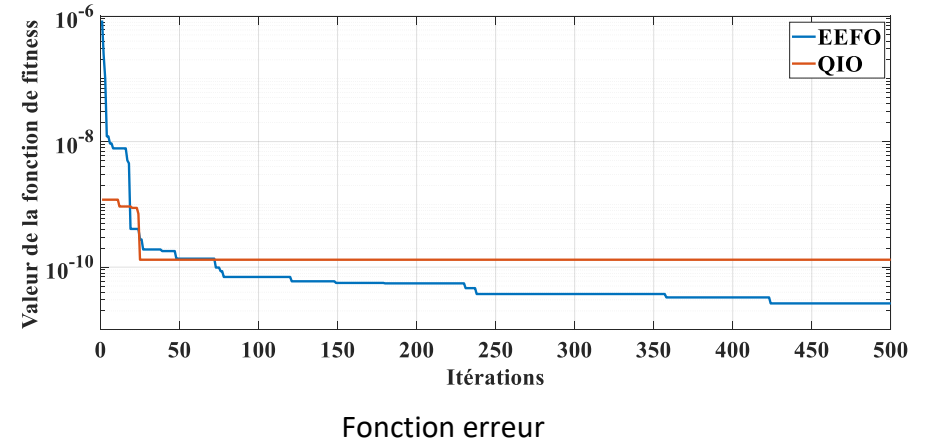


Figure 121 : Poutre simple – un seule endommagement – Paipetis & Dimarogonas avec 50population et 500 itération.

1	0.6733	0.669
33	0.6803	0.6803
34	0.6803	0.6803
100	0.6803	0.6803
200	0.6803	0.6803
300	0.6803	0.6803
400	0.6803	0.6803
500	0.6803	0.6803
	EEFO	QIO
	Methode d'optimisation	

(a) Sévérité – Elément 8

1	0	0
33	309.8	301.1
34	319.5	310.5
100	958.4	931.5
200	1927	1872
300	2895	2813
400	3863	3754
500	4831	4695
	EEFO	QIO
	Methode d'optimisation	

(b) Temps

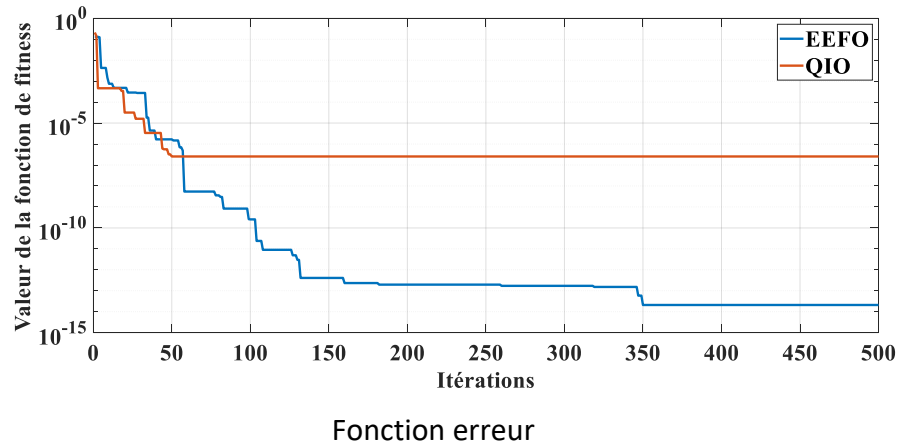


Figure 122 : Poutre simple – un seule endommagement – Réduction de rigidité avec 50population et 500 itération.

1	0.007992	0.007916
11	0.008001	0.008
15	0.008	0.008
100	0.008	0.008
200	0.008	0.008
300	0.008	0.008
400	0.008	0.008
500	0.008	0.008
	EEFO	QIO
	Methode d'optimisation	

(a) Sévérité – Elément 8

1	0	0
11	96.81	94.09
15	135.5	131.7
100	958.4	933.5
200	1928	1871
300	2899	2813
400	3863	3754
500	4891	4775
	EEFO	QIO
	Methode d'optimisation	

(b) Temps

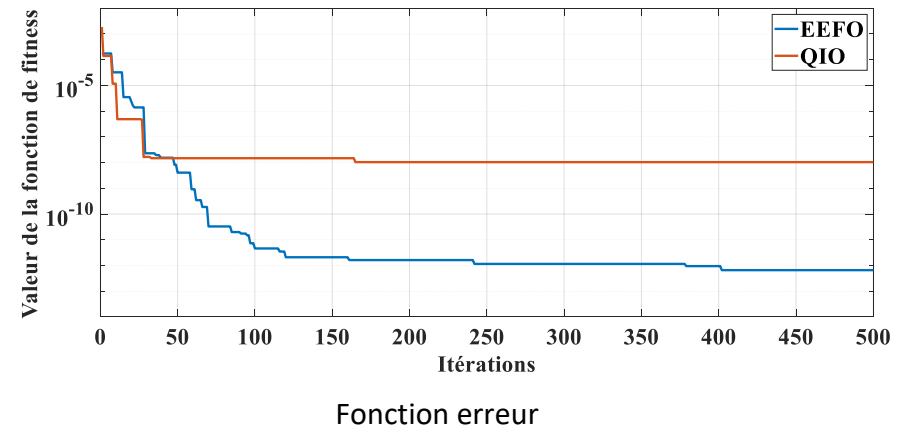


Figure 123 : Poutre simple – un seule endommagement – J.K.Sinha– 50population et 500 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

1	0.01282	0.01123
20	0.01196	0.01203
40	0.012	0.012
59	0.012	0.012
100	0.012	0.012
200	0.012	0.012
300	0.012	0.012
400	0.012	0.012
500	0.012	0.012
	EEFO	QIO
	Methode d'optimisation	

1	0.01114	0.01268
20	0.012	0.01201
40	0.012	0.012
59	0.012	0.012
100	0.012	0.012
200	0.012	0.012
300	0.012	0.012
400	0.012	0.012
500	0.012	0.012
	EEFO	QIO
	Methode d'optimisation	

1	0	0
20	149.5	160.6
40	306.9	329.7
59	456.3	490.4
100	778.9	837
200	1566	1682
300	2353	2528
400	3139	3373
500	3926	4219
	EEFO	QIO
	Methode d'optimisation	

1	0.8343	0.8074
52	0.8547	0.8547
63	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547
200	0.8547	0.8547
300	0.8547	0.8547
400	0.8547	0.8547
500	0.8547	0.8547
	EEFO	QIO
	Methode d'optimisation	

1	0.7601	0.8286
52	0.8547	0.8547
63	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547
200	0.8547	0.8547
300	0.8547	0.8547
400	0.8547	0.8547
500	0.8547	0.8547
	EEFO	QIO
	Methode d'optimisation	

1	0.8343	0.8074
52	0.8547	0.8547
63	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547
200	0.8547	0.8547
300	0.8547	0.8547
400	0.8547	0.8547
500	0.8547	0.8547
	EEFO	QIO
	Methode d'optimisation	

Sévérité – Elément 9

Sévérité –
Elément 12

Temps (f)

Sévérité – Elément 9

Sévérité –
Elément 12

Temps

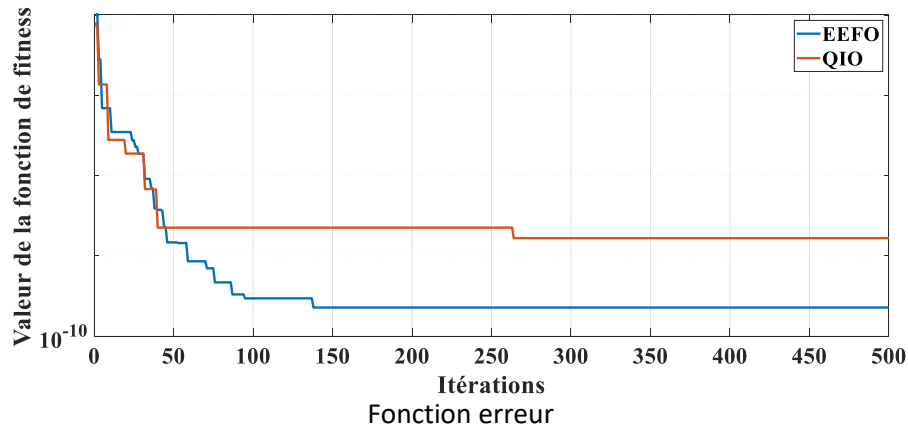


Figure 124 : Poutre simple – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 50population et 500 itération.

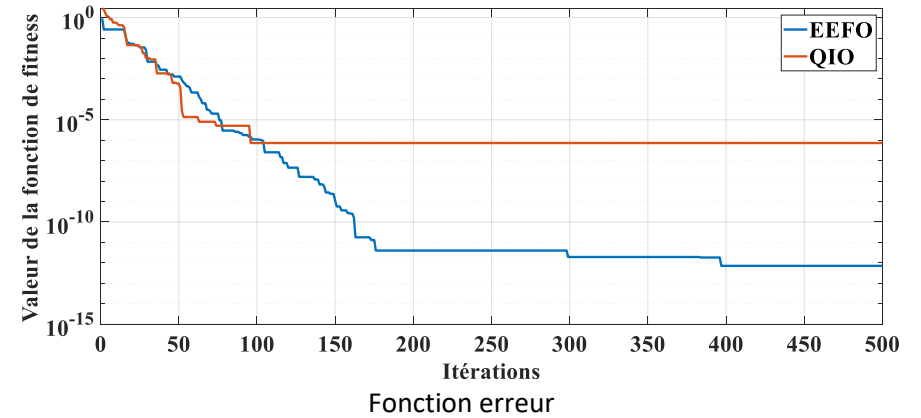


Figure 125. Poutre simple – Deux endommagement – Réduction de rigidité E– 50population et 500 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

1	0.0117	0.01624
40	0.012	0.012
100	0.012	0.012
200	0.012	0.012
300	0.012	0.012
400	0.012	0.012
500	0.012	0.012

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0.01223	0.01199
40	0.012	0.012
100	0.012	0.012
200	0.012	0.012
300	0.012	0.012
400	0.012	0.012
500	0.012	0.012

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0	0
40	302.9	301.9
100	768.9	766.3
200	1546	1540
300	2322	2314
400	3099	3089
500	3876	3863

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0.007927	0.00793
13	0.008	0.007999
16	0.008	0.008
100	0.008	0.008
200	0.008	0.008
300	0.008	0.008
400	0.008	0.008
500	0.008	0.008
900	0.008	0.008
1000	0.008	0.008

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0	0
13	102	105.1
16	127.5	131.4
100	841.4	867.1
200	1691	1743
300	2541	2619
400	3391	3495
500	4241	4371
900	7641	7874
1000	8490	8750

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Sévérité – Elément 9

Sévérité – Elément
12

Temps

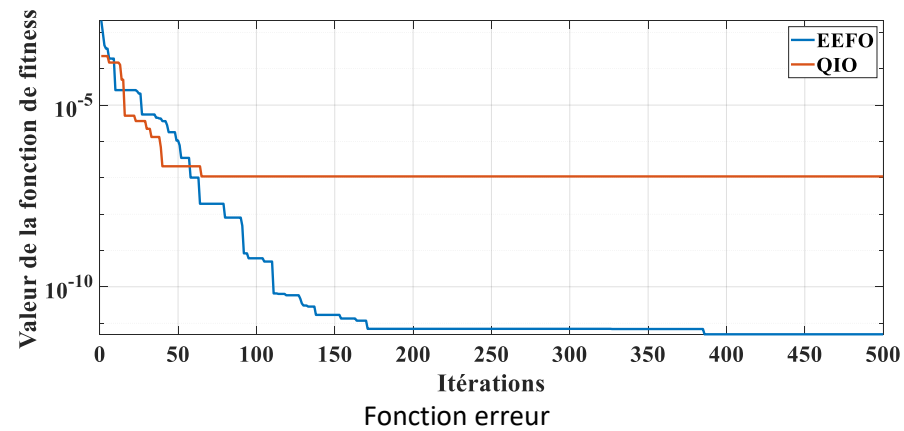


Figure 126 : Poutre simple – Deux endommagement – J.K.Sinha–
50population et 500 itérations

Sévérité – Elément 8

Temps

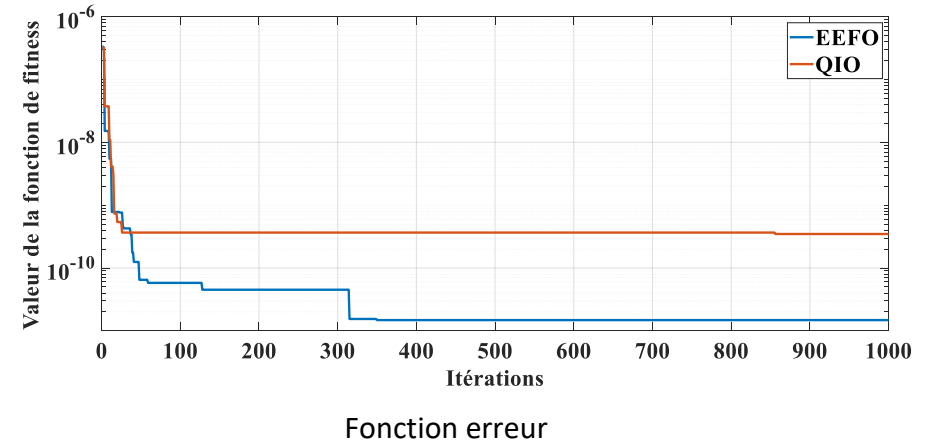


Figure 127 : Poutre simple – un seule endommagement – Paipetis &
Dimarogonas avec 50population et 1000 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

1	0.6793	0.6807
32	0.6803	0.6803
35	0.6803	0.6803
100	0.6803	0.6803
200	0.6803	0.6803
300	0.6803	0.6803
400	0.6803	0.6803
500	0.6803	0.6803
900	0.6803	0.6803
1000	0.6803	0.6803

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0	0
32	241.3	241.3
35	264.7	264.6
100	770.7	770.5
200	1549	1549
300	2328	2327
400	3106	3105
500	3884	3884
900	6998	6997
1000	7777	7775

EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0.007954	0.00796
18	0.007999	0.008
22	0.008	0.008
100	0.008	0.008
200	0.008	0.008
300	0.008	0.008
400	0.008	0.008
500	0.008	0.008
900	0.008	0.008
1000	0.008	0.008

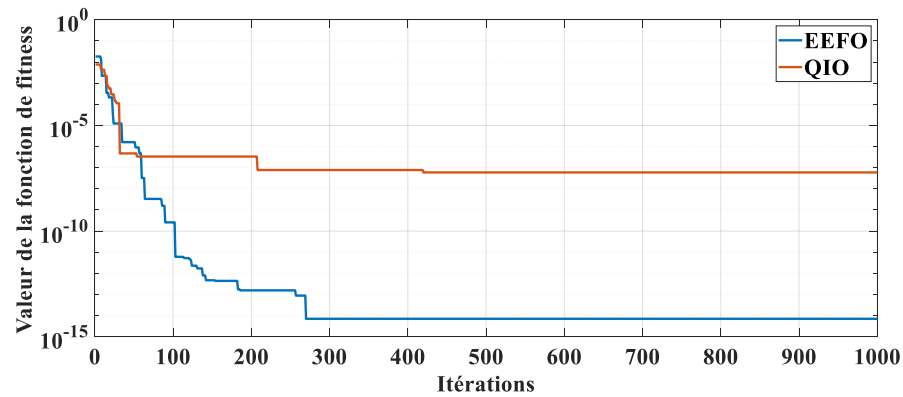
EEFO QIO
Methode d'optimisation

1	0	0
18	132.7	135.5
22	163.9	167.3
100	772.8	788.9
200	1553	1586
300	2334	2383
400	3114	3179
500	3895	3976
900	7017	7164
1000	7798	7961

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Sévérité – Elément 8

Temps

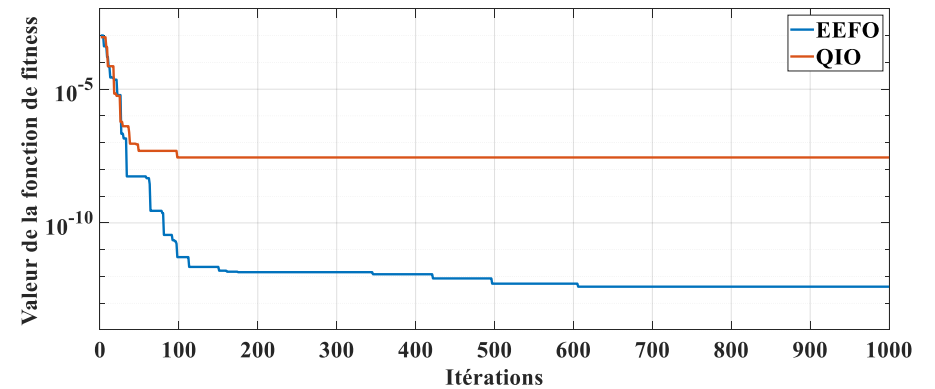


Fonction erreur

Figure 128 : Poutre simple – un seul endommagement – Réduction de rigidité avec 50population et 1000 itération.

Sévérité – Elément 8

Temps



Fonction erreur

Figure 129 : Poutre simple – un seul endommagement – J.K.Sinha– 50population et 1000 itération.

Chapitre IV : Optimisations et quantifications

Itérations	EEFO	QIO
1	0.01304	0.01203
32	0.012	0.01202
55	0.012	0.012
100	0.012	0.012
200	0.012	0.012
300	0.012	0.012
400	0.012	0.012
500	0.012	0.012
900	0.012	0.012
1000	0.012	0.012

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Sévérité – Elément
9

Itérations	EEFO	QIO
1	0.0117	0.01144
32	0.012	0.012
55	0.012	0.012
100	0.012	0.012
200	0.012	0.012
300	0.012	0.012
400	0.012	0.012
500	0.012	0.012
900	0.012	0.012
1000	0.012	0.012

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Sévérité – Elément
12

Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
32	209.3	203.5
55	364.7	354.5
100	668.6	649.9
200	1344	1306
300	2019	1963
400	2695	2619
500	3370	3276
900	6071	5901
1000	6746	6558

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Temps

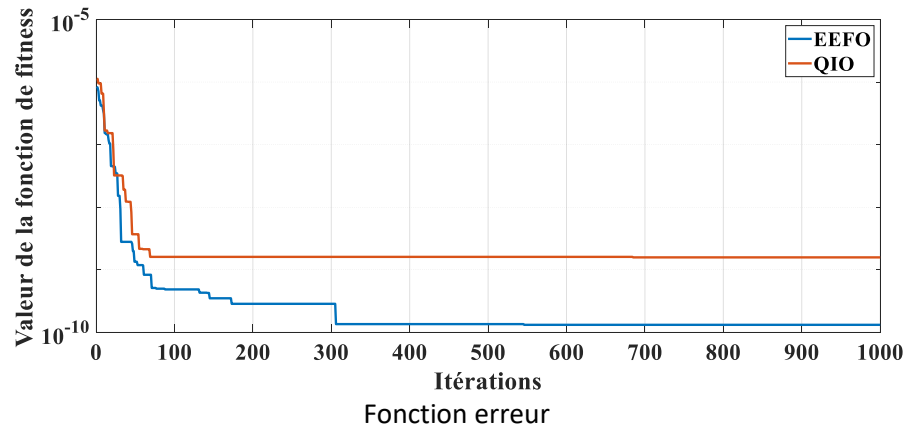


Figure 130 : Poutre simple – Deux endommagement – Paipetis & Dimarogonas– 50population et 1000 itération.

Itérations	EEFO	QIO
1	0.8286	0.863
56	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547
200	0.8547	0.8547
300	0.8547	0.8547
400	0.8547	0.8547
500	0.8547	0.8547
900	0.8547	0.8547
1000	0.8547	0.8547

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Sévérité – Elément
9

Itérations	EEFO	QIO
1	0.8354	0.8245
56	0.8547	0.8547
100	0.8547	0.8547
200	0.8547	0.8547
300	0.8547	0.8547
400	0.8547	0.8547
500	0.8547	0.8547
900	0.8547	0.8547
1000	0.8547	0.8547

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Sévérité – Elément
12

Itérations	EEFO	QIO
1	0	0
56	416.2	413.8
100	749.2	744.8
200	1506	1497
300	2263	2249
400	3019	3002
500	3776	3754
900	6803	6763
1000	7560	7516

EEFO QIO
Methode d'optimisation

Temps

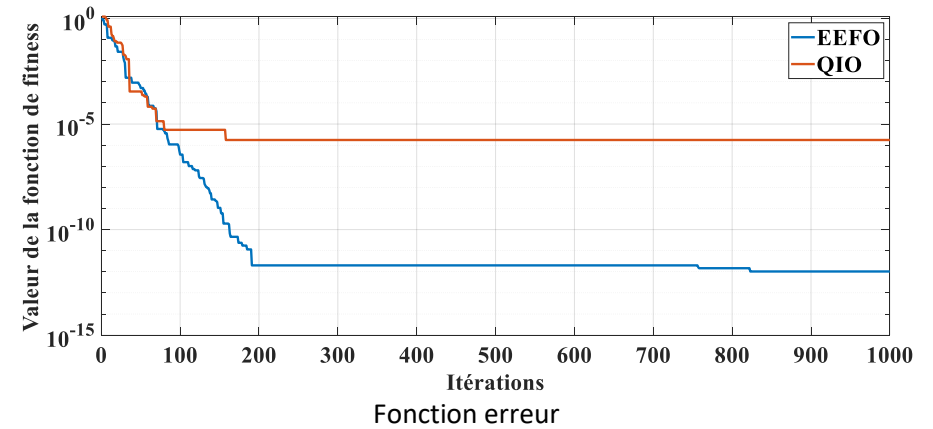


Figure 131 : Poutre simple – Deux endommagement – Réduction de rigidité E– 50population et 1000 itération.

Itérations	Sévérité – Elément 9		Sévérité – Elément 12		Temps	
	EEFO	QIO	EEFO	QIO	EEFO	QIO
1	0.01173	0.01225	0.01173	0.0127	0	0
35	0.012	0.012	0.012	0.012	272.5	272.4
38	0.012	0.012	0.012	0.012	295.8	295.7
100	0.012	0.012	0.012	0.012	778.4	778.3
200	0.012	0.012	0.012	0.012	1556	1557
300	0.012	0.012	0.012	0.012	2330	2332
400	0.012	0.012	0.012	0.012	3114	3113
500	0.012	0.012	0.012	0.012	3882	3841
900	0.012	0.012	0.012	0.012	7006	7004
1000	0.012	0.012	0.012	0.012	7797	7785

Sévérité – Elément 9

Sévérité – Elément 12

Temps

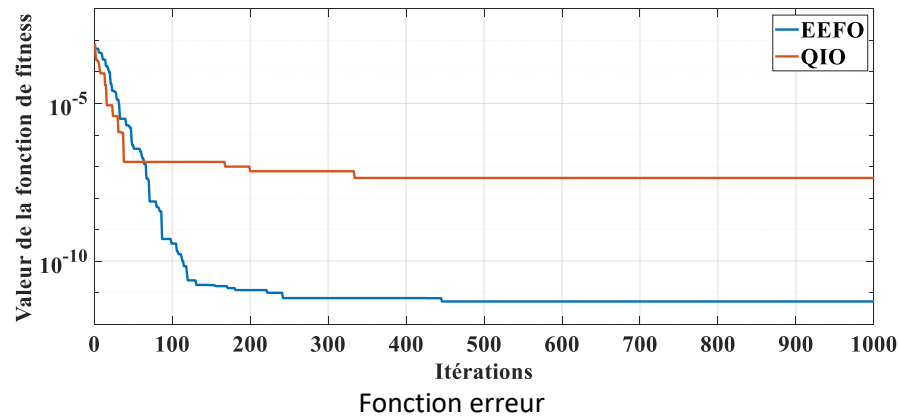


Figure 132 : Poutre simple – Deux endommagement – J.K.Sinha– 50population et 1000 itération.

Discussion sur les résultats

Les algorithmes précédemment mentionnés, l'étude a également évalué l'efficacité des deux techniques QIO et EEFO pour la quantification des dommages dans la poutre simple en aluminium qui est discrétisée en 30 éléments. Les résultats obtenus par ces deux méthodes d'optimisation ont également permis de converger avec précision vers la quantification des dommages pour ce modèle de structures mécaniques.

4.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisé sur les techniques d'optimisation qui sont QIO et EEFO. Ces deux techniques sont détaillées par des équations mathématiques utilisées pour optimiser une structure mécanique endommagée et on remarque que la fonction objective est très importante pour ces deux techniques.

Ainsi on a aussi démontré ces approches avec des résultats d'application sur les trois poutres 2D.

L'objectif de ces techniques est de quantifier les structures endommagées. Après les différents calculs on peut dire que ces deux approches EEFO et QIO ont fait leurs preuves dans la quantification des dommages pour le modèle de poutre et convergent avec succès vers une estimation fiable des dommages structurels.

Conclusion générale

Conclusion générale

La détection des dommages dans les structures mécaniques vibrantes revêt une importance capitale. Même si la zone endommagée est relativement limitée, elle peut mettre en péril l'intégrité et la fiabilité globale de la structure. De plus, ces dommages, aussi minimes soient-ils, peuvent avoir une influence significative sur la caractéristique dynamique de la structure. Par conséquent, la détection précoce de tels endommagements est primordiale pour assurer le bon fonctionnement et la sécurité de ces structures mécaniques.

Dans le cadre de cette présente étude, nous nous sommes concentrés sur la modélisation des poutres endommagées. Pour ce faire, nous avons procédé à une analyse approfondie de trois modèles distincts de poutres endommagées.

Tout d'abord, nous avons examiné le modèle proposé par J.K.Sinha et ses collaborateurs. Ensuite, nous nous sommes intéressés au modèle développé proposé par A.D.Dimarogonas et S.A.Paipetis. Enfin, le troisième modèle que nous avons analysé est basé sur la réduction de la raideur E d'un élément de poutre. Cette analyse comparative approfondie des différentes approches de modélisation des poutres endommagées.

L'étude comparative de ces différents modèles de fissuration commence par l'analyse de leurs prédictions concernant les fréquences propres de la structure. Ces fréquences propres calculées analytiquement à l'aide de ces modèles sont ensuite confrontées aux fréquences propres mesurées expérimentalement.

Dans un second temps, nous avons appliqué ces différents modèles de fissuration à une méthode d'identification des dommages. Cette méthode s'appelle : l'indicateur d'endommagement MSEBI. Cette méthode est basée sur la localisation des éléments endommagés, et de voir le pourcentage de la fissure.

On peut dire que les trois modèles peuvent être appliqués sur la méthode d'endommagement qui est basée sur l'énergie de déformation MSEBI.

Enfin, après avoir détecté les défauts dans la structure, on optimise et on quantifie les dommages de la poutre, alors nous nous sommes concentrés sur deux techniques d'optimisation qui s'appellent optimisation de la recherche de nourriture de l'anguille électrique QIO et EEFO.

On peut dire que les deux techniques d'optimisation sont applicables sur les trois modèles d'endommagement.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Khosravan, A., B. Asgarian, and H.R. Shokrgozar, *Improved Modal Strain Energy Decomposition Method for damage detection of offshore platforms using data of sensors above the water level*. Ocean Engineering, 2021. **219**: p. 108337.
2. Huang, M., et al. *Structural damage identification based on modal frequency strain energy assurance criterion and flexibility using enhanced Moth-Flame optimization*. in *Structures*. 2020. Elsevier.
3. Jayasundara, N., et al., *Damage detection and quantification in deck type arch bridges using vibration based methods and artificial neural networks*. Engineering Failure Analysis, 2020. **109**: p. 104265.
4. Yang, D., et al., *On the study of element modal strain energy sensitivity for damage detection of functionally graded beams*. Composite Structures, 2019. **224**: p. 110989.
5. Kaveh, A. and A. Zolghadr, *Cyclical parthenogenesis algorithm for guided modal strain energy based structural damage detection*. Applied Soft Computing, 2017. **57**: p. 250-264.
6. Vo-Duy, T., et al., *A two-step approach for damage detection in laminated composite structures using modal strain energy method and an improved differential evolution algorithm*. Composite Structures, 2016. **147**: p. 42-53.
7. Nick, H., et al., *Damage identification in steel girder bridges using modal strain energy-based damage index method and artificial neural network*. Engineering Failure Analysis, 2021. **119**: p. 105010.
8. Tan, Z.X., et al., *Detecting damage in steel beams using modal strain energy based damage index and Artificial Neural Network*. Engineering Failure Analysis, 2017. **79**: p. 253-262.
9. Ramesh, L. and P.S. Rao, *Damage detection in structural beams using model strain energy method and wavelet transform approach*. Materials Today: Proceedings, 2018. **5**(9): p. 19565-19575.
10. Li, Y., et al., *An improved modal strain energy method for damage detection in offshore platform structures*. Journal of Marine Science and Application, 2016. **15**(2): p. 182-192.
11. Dewangan, P., et al., *Damage detection in wind turbine gearbox using modal strain energy*. Engineering Failure Analysis, 2020. **107**: p. 104228.
12. Hosseini, S.M., M.M. Dehcheshmeh, and G.G. Amiri, *Experimental and numerical structural damage detection using a combined modal strain energy and flexibility method*. Structural Engineering and Mechanics, 2023. **87**(6): p. 555-574.
13. Le, T.-C., et al. *Damage Detection in Plates with Different Boundary Conditions Using Improved Modal Strain Energy Method*. in *ICSCEA 2019: Proceedings of the International Conference on Sustainable Civil Engineering and Architecture*. 2020. Springer.
14. Amiri, G.G., M.M. Dehcheshmeh, and A.Z. Hosseinzadeh, *Feasibility study on model-based damage detection in shear frames using pseudo modal strain energy*. Smart Structures and Systems, An International Journal, 2020. **25**(1): p. 47-56.

Références bibliographiques

15. Ghasemi, M.R., M. Nobahari, and N. Shabakhty, *Enhanced optimization-based structural damage detection method using modal strain energy and modal frequencies*. Engineering with Computers, 2018. **34**: p. 637-647.
16. Ashory, M.-R., A. Ghasemi-Ghalebahman, and M.-J. Kokabi, *An efficient modal strain energy-based damage detection for laminated composite plates*. Advanced Composite Materials, 2018. **27**(2): p. 147-162.
17. Moradi Pour, P., T. Chan, and C. Gallage, *An improved modal strain energy method for structural damage detection, 2D simulation*. Structural Engineering and Mechanics, 2015. **54**(1): p. 105-119.
18. Wu, S., et al., *Reformulation of elemental modal strain energy method based on strain modes for structural damage detection*. Advances in Structural Engineering, 2017. **20**(6): p. 896-905.
19. Xu, M. and S. Wang, *Cross modal strain energy-based structural damage detection in the presence of noise effects*. Advances in Mechanical Engineering, 2017. **9**(12): p. 1687814017744122.
20. Chen, Q., et al., *High-Accuracy Shape Sensing Method for Deformation Digital Twin Monitoring of Composite Structures Using Full-Field Corrected Ifem*. Available at SSRN 4744084.
21. Cha, Y.J. and O. Buyukozturk, *Structural damage detection using modal strain energy and hybrid multiobjective optimization*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2015. **30**(5): p. 347-358.
22. Teng, S., et al., *Modal strain energy-based structural damage detection using convolutional neural networks*. Applied Sciences, 2019. **9**(16): p. 3376.
23. Khosraviani, M.J., O. Bahar, and S.H. Ghasemi, *Damage detection using both energy and displacement damage index on the ASCE benchmark problem*. Struct Eng Mech, 2021. **77**(2): p. 151-165.
24. Xu, M., S. Wang, and Y. Jiang, *Structural damage identification by a cross modal energy sensitivity based mode subset selection strategy*. Marine Structures, 2021. **77**: p. 102968.
25. Ahmadi-Nedushan, B. and H. Fathnejat, *A modified teaching-learning optimization algorithm for structural damage detection using a novel damage index based on modal flexibility and strain energy under environmental variations*. Engineering with Computers, 2022. **38**(1): p. 847-874.
26. Xu, M., S. Wang, and H. Li, *A residual strain energy based damage localisation method for offshore platforms under environmental variations*. Ships and Offshore Structures, 2019. **14**(7): p. 747-754.
27. Wang, S. and M. Xu, *Modal strain energy-based structural damage identification: a review and comparative study*. Structural Engineering International, 2019. **29**(2): p. 234-248.
28. Xu, M., S. Wang, and Y. Jiang, *Iterative two-stage approach for identifying structural damage by combining the modal strain energy decomposition method with the multiobjective particle*

Références bibliographiques

- swarm optimization algorithm*. Structural Control and Health Monitoring, 2019. **26**(2): p. e2301.
29. Wei, Z., J. Liu, and Z. Lu, *Damage identification in plates based on the ratio of modal strain energy change and sensitivity analysis*. Inverse Problems in Science and Engineering, 2016. **24**(2): p. 265-283.
30. Zhong, H. and M. Yang, *Damage detection for plate-like structures using generalized curvature mode shape method*. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2016. **6**: p. 141-152.
31. Alkayem, N.F., et al., *Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms: a survey*. Neural Computing and Applications, 2018. **30**: p. 389-411.
32. Seo, J., J.W. Hu, and J. Lee, *Summary review of structural health monitoring applications for highway bridges*. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016. **30**(4): p. 04015072.
33. Loendersloot, R., et al. *Vibration based structural health monitoring of a composite plate with stiffeners*. in *24th International Conference on Noise and Vibration Engineering, ISMA 2010*. 2010. Katholieke Universiteit Leuven.
34. Wang, S., M. Zhang, and H. Li, *Damage localization of an offshore platform considering temperature variations*. Mathematical Problems in Engineering, 2015. **2015**(1): p. 954926.
35. Entezami, A., H. Shariatmadar, and H. Sarmadi, *Structural damage detection by a new iterative regularization method and an improved sensitivity function*. Journal of Sound and Vibration, 2017. **399**: p. 285-307.
36. Wang, S., Y. Li, and H. Li, *Structural model updating of an offshore platform using the cross model cross mode method: An experimental study*. Ocean Engineering, 2015. **97**: p. 57-64.
37. Doebling, S.W., C.R. Farrar, and M.B. Prime, *A summary review of vibration-based damage identification methods*. Shock and vibration digest, 1998. **30**(2): p. 91-105.
38. Salawu, O.S., *Detection of structural damage through changes in frequency: a review*. Engineering structures, 1997. **19**(9): p. 718-723.
39. Friswell, M.I., et al., *Finite element modelling*. 1995: Springer.
40. Ricles, J. and J. Kosmatka, *Damage detection in elastic structures using vibratory residual forces and weighted sensitivity*. AIAA journal, 1992. **30**(9): p. 2310-2316.
41. Farhat, C. and F.M. Hemez, *Updating finite element dynamic models using an element-by-element sensitivity methodology*. AIAA journal, 1993. **31**(9): p. 1702-1711.
42. Sinha, J. and M. Friswell, *The location of spring supports from measured vibration data*. Journal of sound and vibration, 2001. **244**(1): p. 137-153.
43. Sinha, J.K., M. Friswell, and S. Edwards, *Simplified models for the location of cracks in beam structures using measured vibration data*. Journal of Sound and vibration, 2002. **251**(1): p. 13-38.
-

Références bibliographiques

44. Staszewski, W.J., *Advanced data pre-processing for damage identification based on pattern recognition*. International Journal of Systems Science, 2000. **31**(11): p. 1381-1396.
45. Bayissa, W.L. and N. Haritos, *Experimental investigation into vibration characteristics of a cracked RC T-beam*. Melbourne University Private Ltd Report, 2006.
46. Kisa, M. and J. Brandon, *The effects of closure of cracks on the dynamics of a cracked cantilever beam*. Journal of sound and vibration, 2000. **238**(1): p. 1-18.
47. Christides, S. and A. Barr, *One-dimensional theory of cracked Bernoulli-Euler beams*. International Journal of Mechanical Sciences, 1984. **26**(11-12): p. 639-648.
48. Wahab, M.A., G. De Roeck, and B. Peeters, *Parameterization of damage in reinforced concrete structures using model updating*. Journal of Sound and Vibration, 1999. **228**(4): p. 717-730.
49. CARNEIRO, S.S., et al., *Comments on the free vibrations of beams with a single-edge crack. Authors reply*. Journal of sound and vibration, 2001. **244**(4): p. 729-737.
50. Lee, Y.-S. and M.-J. Chung, *A study on crack detection using eigenfrequency test data*. Computers & structures, 2000. **77**(3): p. 327-342.
51. Dimarogonas, A.D., S.A. Paipetis, and T.G. Chondros, *Analytical methods in rotor dynamics*. 2013: Springer Science & Business Media.
52. Samir, K., et al., *Damage detection in CFRP composite beams based on vibration analysis using proper orthogonal decomposition method with radial basis functions and cuckoo search algorithm*. Composite Structures, 2018. **187**: p. 344-353.
53. Capozucca, R., *Vibration of CFRP cantilever beam with damage*. Composite Structures, 2014. **116**: p. 211-222.
54. Capozucca, R. and B. Bonci, *Notched CFRP laminates under vibration*. Composite Structures, 2015. **122**: p. 367-375.
55. Frey, F. and J. Jirousek, *Analyse des structures et milieux continus: Méthode des éléments finis*. Vol. 6. 2001: PPUR presses polytechniques.
56. Cazenave, M., *Méthode des éléments finis-2e éd.: Approche pratique en mécanique des structures*. 2013: Dunod.
57. Boltezar, M., B. Strancar, and A. Kuhelj, *Identification of transverse crack location in flexural vibrations of free-free beams*. Journal of sound and vibration, 1998. **211**(5): p. 729-734.
58. Zheng, D.Y. and N. Kessissoglou, *Free vibration analysis of a cracked beam by finite element method*. Journal of Sound and vibration, 2004. **273**(3): p. 457-475.
59. Creed, S., *Assessment of large engineering structures using data collected during in-service loading*. 1987: Butterworths, London, England.
60. Aktan, A., et al. *Modal testing for structural identification and condition assessment of constructed facilities*. in *Proceedings-spie the International Society for Optical Engineering*. 1994. SPIE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL.

Références bibliographiques

61. Cawley, P. and R.D. Adams, *The location of defects in structures from measurements of natural frequencies*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1979. **14**(2): p. 49-57.
62. Topole, K.G. and N. Stubbs, *Nondestructive damage evaluation in complex structures from a minimum of modal parameters*. 1995.
63. Gudmundson, P., *Eigenfrequency changes of structures due to cracks, notches or other geometrical changes*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1982. **30**(5): p. 339-353.
64. Ju, F.D. and M. Mimovich, *Experimental diagnosis of fracture damage in structures by the modal frequency method*. 1988.
65. Law, S., L. Xun, and H. Ward. *A vibration technique for structural stiffness identification*. in *Proceedings of International Conference on Vibration Problems in Engineering*. 1990.
66. Moradalizadeh, M., *Evaluation of crack defects in framed structures using resonant frequency techniques*. 1990, University of Newcastle upon Tyne.
67. Ågårdh, L., *Modal analyses of two concrete bridges in Sweden*. Structural Engineering International, 1991. **1**(4): p. 35-39.
68. Hearn, G. and R.B. Testa, *Modal analysis for damage detection in structures*. Journal of structural engineering, 1991. **117**(10): p. 3042-3063.
69. Hasan, W.M., *Crack detection from the variation of the eigenfrequencies of a beam on elastic foundation*. Engineering Fracture Mechanics, 1995. **52**(3): p. 409-421.
70. Osegueda, R.A., P.D. DSouza, and Y. Qiang, *Damage evaluation of offshore structures using resonant frequency shifts*. Serviceability of Petroleum, Process, and Power Equipment, ASME PVP, 1992. **239**: p. 31-37.
71. Silva, M.E. and A. Araujo Gomes, *Crack identification on simple structural elements through the use of natural frequency variations: The inverse problem*. Proceedings of the 12th International Modal Analysis, 1994. **2251**: p. 1728.
72. Hassiotis, S. and G.D. Jeong, *Identification of stiffness reductions using natural frequencies*. Journal of engineering mechanics, 1995. **121**(10): p. 1106-1113.
73. Sinou, J.-J. and A. Lees, *The influence of cracks in rotating shafts*. Journal of sound and vibration, 2005. **285**(4-5): p. 1015-1037.
74. Vestroni, F. and D. Capecchi, *Damage detection in beam structures based on frequency measurements*. Journal of engineering mechanics, 2000. **126**(7): p. 761-768.
75. Kim, J.-T., et al., *Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method*. Engineering structures, 2003. **25**(1): p. 57-67.
76. Greś, S., M. Döhler, and L. Mevel, *Uncertainty quantification of the modal assurance criterion in operational modal analysis*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021. **152**: p. 107457.

Références bibliographiques

77. Farrar, C.R. and D. Jauregui, *Damage detection algorithms applied to experimental and numerical modal data from the I-40 bridge*. 1996: Los Alamos National Laboratory.
78. Li, Y., et al., *Identification of damage locations for plate-like structures using damage sensitive indices: strain modal approach*. Computers & structures, 2002. **80**(25): p. 1881-1894.
79. Biswas, M., A. Pandey, and M. Samman, *Diagnostic experimental spectral/modal analysis of a highway bridge*. The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 1990. **5**(1): p. 33-42.
80. Salane, H. and J. Baldwin Jr, *Identification of modal properties of bridges*. Journal of Structural Engineering, 1990. **116**(7): p. 2008-2021.
81. Mazurek, D.F. and J.T. DeWolf, *Experimental study of bridge monitoring technique*. Journal of Structural Engineering, 1990. **116**(9): p. 2532-2549.
82. Alampalli, S., G. Fu, and E.W. Dillon. *On the use of measured vibration for detecting bridge damage*. in *Proceedings Fourth International Bridge Engineering Conference*. 1995.
83. Rizos, P., N. Aspragathos, and A. Dimarogonas, *Identification of crack location and magnitude in a cantilever beam from the vibration modes*. Journal of sound and vibration, 1990. **138**(3): p. 381-388.
84. Fox, C. *The location of defects in structures-A comparison of the use of natural frequency and mode shape data*. in *10th International modal analysis conference*. 1992.
85. Salawu, O.S. and C. Williams, *Bridge assessment using forced-vibration testing*. Journal of structural engineering, 1995. **121**(2): p. 161-173.
86. Lam, H., J. Ko, and C. Wong. *Detection of damage location based on sensitivity analysis*. in *Proceedings of the 13th international modal analysis conference*. 1995.
87. Dado, M. and O. Abuzeid, *Coupled transverse and axial vibratory behaviour of cracked beam with end mass and rotary inertia*. Journal of sound and vibration, 2003. **261**(4): p. 675-696.
88. Ostachowicz, W. and M. Krawczuk, *Analysis of the effect of cracks on the natural frequencies of a cantilever beam*. Journal of sound and vibration, 1991. **150**(2): p. 191-201.
89. Alamdari, M.M., *An evolutionary vehicle scanning method for bridges based on time series segmentation and change point detection*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024. **210**: p. 111173.
90. Mahmood, A.H. and S.J. Foster, *THE UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES*. Update, 2021.
91. Dimarogonas, A.D., et al., *Variational formulation of consistent: continuous cracked structural members*. Analytical Methods in Rotor Dynamics: Second Edition, 2013: p. 221-250.
92. Adams, R., et al., *Vibration testing as a nondestructive test tool for composite materials*, in *Composite reliability*. 1975, ASTM International.
93. Chondros, T. and A. Dimarogonas, *Identification of cracks in welded joints of complex structures*. Journal of sound and vibration, 1980. **69**(4): p. 531-538.

Références bibliographiques

94. Liang, R.Y., F.K. Choy, and J. Hu, *Detection of cracks in beam structures using measurements of natural frequencies*. Journal of the Franklin Institute, 1991. **328**(4): p. 505-518.
95. Liang, R.Y., J. Hu, and F. Choy, *Theoretical study of crack-induced eigenfrequency changes on beam structures*. Journal of Engineering Mechanics, 1992. **118**(2): p. 384-396.
96. Zenzen, R., et al., *A modified transmissibility indicator and Artificial Neural Network for damage identification and quantification in laminated composite structures*. Composite Structures, 2020. **248**: p. 112497.
97. Behtani, A., *Identification en dynamique linéaire et non linéaire de structures en matériaux multicouches*. 2020, Université Mouloud MAMMERI Tizi-Ouzou.
98. Lee, L.S., V.M. Karbhari, and C. Sikorsky, *Structural health monitoring of CFRP strengthened bridge decks using ambient vibrations*. Structural Health Monitoring, 2007. **6**(3): p. 199-214.
99. Seyedpoor, S., *A two stage method for structural damage detection using a modal strain energy based index and particle swarm optimization*. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2012. **47**(1): p. 1-8.
100. TCVN 4506:2012, *Water for concrete and mortar - Technical specification*. 2012, Ministry of Science and Technology: Vietnam.
101. Xu, X., et al. *Damage identification of simply-supported bridges using impact response-based recurrence graph*. in *Structures*. 2024. Elsevier.
102. Melman, A. and O. Evsutin, *Comparative study of metaheuristic optimization algorithms for image steganography based on discrete Fourier transform domain*. Applied Soft Computing, 2023. **132**: p. 109847.
103. Diop, L., et al., *Annual rainfall forecasting using hybrid artificial intelligence model: integration of multilayer perceptron with whale optimization algorithm*. Water Resources Management, 2020. **34**: p. 733-746.
104. Hosseiny, H., *Implementation of heuristic search algorithms in the calibration of a river hydraulic model*. Environmental Modelling & Software, 2022. **157**: p. 105537.
105. Foroughi, S., et al., *The integrated optimization of underground stope layout designing and production scheduling incorporating a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)*. Resources Policy, 2019. **63**: p. 101408.
106. Vandebogert, K., *Method of quadratic interpolation*. PhD Thesis, 2017.
107. Sun, W. and Y.-X. Yuan, *Optimization theory and methods: nonlinear programming*. Vol. 1. 2006: Springer Science & Business Media.
108. Sun, Y., T. Yang, and Z. Liu, *A whale optimization algorithm based on quadratic interpolation for high-dimensional global optimization problems*. Applied Soft Computing, 2019. **85**: p. 105744.
109. Deep, K. and K.N. Das, *Quadratic approximation based hybrid genetic algorithm for function optimization*. Applied Mathematics and Computation, 2008. **203**(1): p. 86-98.

Références bibliographiques

110. Zhao, W., et al., *Electric eel foraging optimization: A new bio-inspired optimizer for engineering applications*. Expert Systems with Applications, 2024. **238**: p. 122200.
111. Bastos, D.A., et al., *Social predation in electric eels*. Ecology and evolution, 2021. **11**(3): p. 1088-1092.
112. Tahani, M. and N. Babayan, *Flow Regime Algorithm (FRA): a physics-based meta-heuristics algorithm*. Knowledge and Information Systems, 2019. **60**: p. 1001-1038.
113. Catania, K.C., *Electric eels concentrate their electric field to induce involuntary fatigue in struggling prey*. Current Biology, 2015. **25**(22): p. 2889-2898.
114. Catania, K.C., *Electric eels use high-voltage to track fast-moving prey*. Nature Communications, 2015. **6**(1): p. 8638.
115. Zhao, S., et al., *Sea-horse optimizer: A novel nature-inspired meta-heuristic for global optimization problems*. Applied Intelligence, 2023. **53**(10): p. 11833-11860.
116. Wang, J.-S. and S.-X. Li, *An improved grey wolf optimizer based on differential evolution and elimination mechanism*. Scientific reports, 2019. **9**(1): p. 7181.
117. Heidari, A.A., et al., *Harris hawks optimization: Algorithm and applications*. Future generation computer systems, 2019. **97**: p. 849-872.
118. Alamdari, M.M., *An evolutionary vehicle scanning method for bridges based on time series segmentation and change point detection*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024. **210**: p. 111173.
119. Sinha, J.K., M. Friswell, and S. Edwards, *Simplified models for the location of cracks in beam structures using measured vibration data*. Journal of Sound and vibration, 2002. **251**(1): p. 13-38.
120. Dimarogonas, A.D., et al., *Variational formulation of consistent: continuous cracked structural members*. Analytical Methods in Rotor Dynamics: Second Edition, 2013: p. 221-250.
121. Adams, R., et al., *Vibration testing as a nondestructive test tool for composite materials, in Composite reliability*. 1975, ASTM International.
122. Chondros, T. and A. Dimarogonas, *Identification of cracks in welded joints of complex structures*. Journal of sound and vibration, 1980. **69**(4): p. 531-538.
123. Liang, R.Y., F.K. Choy, and J. Hu, *Detection of cracks in beam structures using measurements of natural frequencies*. Journal of the Franklin Institute, 1991. **328**(4): p. 505-518.
124. Liang, R.Y., J. Hu, and F. Choy, *Theoretical study of crack-induced eigenfrequency changes on beam structures*. Journal of Engineering Mechanics, 1992. **118**(2): p. 384-396.

References bibliographies
