

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département Génie Mécanique

Laboratoire de Mécanique des Solides et Systèmes



Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : Electromécanique

Spécialité : Mécatronique

THEME

Conception optimale des pièces et systèmes automobiles à l'aide
des algorithmes bio-inspirés

Présenté par :

Hamadache Ikram

Promoteur : Dr. M. A. Mellal

Co-promoteur : Dr. S. Alem

Promotion : 2018-2019

Résumé

La concurrence dans l'industrie automobile force les constructeurs à optimiser toutes les parties des véhicules, que ce soit pour la sécurité ou l'amélioration du confort.

L'objectif de ce travail est d'optimiser la sécurité latérale (portière automobile) et les paramètres d'un système de freinage. Deux algorithmes bio-inspirés (Particle Swarm Optimization et Grey Wolf Optimizer), appelés aussi méthodes de l'intelligence artificielle, sont implémentés afin de résoudre ces problèmes. Les résultats obtenus comparent les performances des deux algorithmes.

Mots clés : Systèmes automobiles, Systèmes de sécurité, Mécatronique, Intelligence artificielle, Optimisation.

Abstract

Competition in the automotive industry pressures manufacturers to optimize all parts of the vehicles, whether for safety or comfort improvement.

The aim of the present work is to optimize the side safety (car door) and the parameters of a braking system. Two bio-inspired algorithms (Particle Swarm Optimization and Grey Wolf Optimizer), also called artificial intelligence methods, are implemented to solve these problems. The results obtained compare the performances of both algorithms.

Keywords: Automotive systems, Safety systems, Mechatronics, Artificial intelligence, Optimization.

ملخص

توجب المنافسة في مجال السيارات، المصنعين على تحسين جميع أجزائها، سواء لضمان السلامة أو الراحة. الهدف من هذا العمل هو تحسين السلامة الجانبية (باب سيارة) و معايير نظام الكبح، و من أجل هذا سيتم استعمال نوعان من الخوارزميات المستوحاة من الطبيعة (Particle Swarm Optimization و Grey Wolf Optimizer)، التي تسمى أيضا أساليب الذكاء الاصطناعي، النتائج المتحصل عليها تمكن من المقارنة بينهما.

الكلمات المفتاحية: أنظمة السيارات، أنظمة السلامة، الميكاترونيك، الذكاء الاصطناعي، التحسين.

Remerciements

Avant tout, j'adresse mes remerciements en premier lieu, à Dieu, le tout puissant pour la volonté, la santé, le courage et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces longues années de formation.

Je tiens à remercier mon promoteur Monsieur Dr. M. A. Mellal pour sa patience, ses précieux conseils et ses orientations. Je le remercie encore une fois pour avoir consacré son énergie et ses efforts afin de me donner toutes les informations que j'avais besoin. J'ai bien profité de son savoir.

Mes remerciements vont aussi à mon Co-promoteur Dr. S. Alem pour ses conseils et son accompagnement.

Je remercie également les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail.

Je présente enfin, ma profonde gratitude à ma famille, ainsi qu'à tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près à réaliser ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ma chère mère ;

A mon cher père ;

A mes chères nièces : Ihssane, Ines, Merieme et Safaa ;

A mes chers neveux : Walid et Ilyes ;

Sans eux j'aurai terminé ce travail plutôt...

A mes chères copines : Yasmine, Sarah et Abir ;

A toutes mes camarades du groupe MMTR-17.

Sommaire

Résumé

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures VI

Liste des tableaux VIII

Introduction générale 1

Chapitre I : Systèmes de sécurité dans l'automobile

I.1 Introduction..... 2

I.2 Généralités sur les systèmes mécatroniques dans l'automobile 2

I.3 Conception des pièces automobiles 3

I.3.1 Structure de l'automobile..... 3

I.3.1.1 Hydroformage 4

I.3.1.1 Sertissage..... 5

I.4 Systèmes de sécurité 6

I.4.1 Sécurité passive..... 7

I.4.2 Sécurité active..... 7

I.4.2.1 Sécurité conditionnelle..... 8

I.4.2.2 Sécurité de conduite 8

I.5 Système de freinage 11

I.5.1 Conception des pièces du système freinage..... 11

I.5.1.1 Frein à tambour 12

I.5.1.2 Frein à disque 12

I.5.2 Comparaison entre frein à disque et frein à tambour..... 14

I.5.3 Critères d'évaluation d'un système de freinage..... 16

I.5.4 Types de systèmes de freinage..... 17

I.5.4.1 Système de freinage hydraulique 18

I.5.4.2 Système de freinage pneumatique..... 19

I.5.4.3 Système de freinage électro hydraulique 19

I.5.4.4 Système de freinage à coin électronique 21

I.5.4.5 Système de freinage antiblocage des roues (ABS) 22

Sommaire

I.6	Etat de l'art sur l'optimisation du système de freinage et des pièces automobiles	23
I.7	Conclusion	24

Chapitre II : Etat de l'art sur l'optimisation

II.1	Introduction.....	26
II.2	Optimisation	26
II.3	Types d'optimisation	27
II.3.1	Optimisation mono-objectif.....	27
II.3.2	Optimisation multi-objectif	27
II.3.2.1	Paréto optimum.....	27
II.3.2.2	Somme pondérée.....	28
II.4	Contraintes	29
II.4.1	Types de contraintes	29
II.4.2	Maîtrise des contraintes	30
II.5	Méthodes de résolution.....	30
II.5.1	Heuristiques.....	31
II.5.2	Méta-heuristiques	32
II.5.2.1	Algorithmes bio-inspirés.....	32
II.5.2.2	Quelques algorithmes bio-inspirés.....	33
II.6	Conclusion	38

Chapitre III : Optimisation des systèmes de sécurité automobile

III.1	Introduction.....	39
III.2	Optimisation d'un système de freinage automobile	39
III.3	Optimisation d'un système de sécurité latérale	41
III.4	Solutions proposées	44
III.4.1	Particul swarm optimization (PSO)	45
III.4.2	Grey wolf optimization (GWO).....	46
III.5	Résultats et commentaires	47
III.6	Comparaison entre les deux algorithmes	78
III.7	Conclusion	80
	Conclusion générale.....	81
	BIBLIOGRAPHIE.....	XXXVI

Liste des figures

Figure I.1 : Champs disciplinaires concernant la mécatronique.....	3
Figure I.2 : Structure d'automobile (châssis, carrosserie)	4
Figure I.3 : Différents ouvrants d'une voiture obtenus par emboutissage.	6
Figure I.4 : Schéma montre les éléments de système freinage.....	8
Figure I.5 : Fonction globale de système de freinage.....	9
Figure I.6 : Tambour de frein.	12
Figure I.7 : Disque de frein.....	13
Figure I.8 : Frein a disque montage rigide.	14
Figure I.9 : Frein a disque montage flottant.	14
Figure I.10 : Comparaison de frein à disque par rapport à celui à tambour	15
Figure I.11 : Simple principe de transmission de force hydraulique.....	18
Figure I.12: Eléments de système hydraulique.....	19
Figure II.1 : Position de solution optimale globale	26
Figure II.2 : Front de Paréto	28
Figure II.3 : Effet des contraintes sur les régions optimales.	29
Figure II.4 : Méthodes de résolution de l'optimisation.....	31
Figure III.1 : Disque de frein.	39
Figure III.2 : Schéma de test de la barrière	41
Figure III.3 : Modèle d'impact latéral du véhicule.....	42
Figure III.7 : Graphe de meilleure solution (cas 1, scénario 1).	49
Figure III.8 : Graphe des solutions générales (cas 2, scénario 1).	51
Figure III.9 : Graphe de meilleure solution (cas 1, scénario 1).	51
Figure III.10 : Graphe des solutions générales (cas 1, scénario 2).	53
Figure III.11 : Graphe de meilleure solution (cas 1, scénario 2).	54
Figure III.12 : Graphe des solutions générales (cas 2, scénario 2).	56
Figure.III.13 : Graphe de la meilleure solution (cas 2, scénario 2).....	56
Figure III.14 : Graphe des solutions générales (cas 1, scénario 1).	58
Figure III.16 : Graphe des solutions générales (cas 2, scénario 1).	60
Figure III.17 : Graphe de la meilleure solution (scénario 1, cas 2).....	60
Figure III.18 : Graphe des solutions générales (cas 2, scénario 1).	62
Figure III.19 : Graphe de la meilleure solution (scénario 1, cas 1).....	63
Figure III.20 : Graphe des solutions générales (cas 2, scénario 2).	65
Figure III.21 : Graphe de la meilleure solution (scénario 2, cas 2).....	65
Figure III.22 : Graphe des solutions (masse) (cas 1).	68
Figure III.24 : Graphe des solutions (cas 2).....	71
Figure III.25 : Meilleure solution (cas 1).....	71
Figure III.26 : Graphe des solutions (masse) (cas 1).	74
Figure III.27 : Meilleure solution (cas 1).....	74

Liste des figures

Figure III.28 : Graphe des solutions (masse) (cas 2).	77
Figure III.29 : Meilleure solution (cas 2).	77
Figure III.30 : Histogramme de NFE et CPU des deux algorithmes (scénario 1).	78
Figure III.31 : Histogramme de NFE et CPU des deux algorithmes (scénario 2).	79
Figure III.32 : Histogramme de NFE et CPU des deux algorithmes (problème 2).	79
Figure III.33 : Courbe des meilleures solutions	80

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Description des différents systèmes de la sécurité passive.....	7
Tableau I.2 : Désignation des repères donner dans la figure I.4.	9
Tableau I.3 : Avantages et inconvénients des freins à disque et à tambour.....	15
Tableau I.4 : Critères d'efficacité de freinage.....	16
Tableau II.1 : Quelques algorithmes de l'intelligence artificielle.....	37
Tableau II.2 : Domaine d'application de GWO et PSO.....	38
Tableau III.1 : Résumé de problème d'optimisation du système de freinage automobile.	41
Tableau III.2 : Résumé du problème d'optimisation du système de freinage automobile.	44
Tableau III.3 : Paramètres utilisés pour les deux problèmes.	47
Tableau III.4 : Résultats de l'optimisation du système de freinage (scenario1, cas 1).	48
Tableau III.5 : Résultats des variables (cas 1).	48
Tableau III.6 : Résultats des contraintes (cas 1).	48
Tableau III.9 : Résultats des variables (cas 2)	50
Tableau Résultat	50
Tableau III.10 : Résultats des contraintes (cas 2).	50
Tableau III.11 : Classification de solution (cas 2).	51
Tableau III.12 : Résultats de l'optimisation du système de freinage (scenario 2, cas 1).	52
Tableau III.13 : Résultats des variables (scénario 2, cas 1).....	52
Tableau III.14 : Résultats des contraintes (scénario 2, cas 1).....	53
Tableau III.15 : Classification de solution (cas 1).	53
Tableau III.16 : Résultats de l'optimisation du système de freinage (scenario 2, cas 2).	54
Tableau III.17 : Résultats des variables (scenario 2, cas 2).....	55
Tableau III.18 : Résultats des contraintes (scenario 2, cas 2).....	55
Tableau III.19 : Classification de solution (scenario 2, cas 2).....	55
Tableau III.20 : Résultats de l'optimisation du système de freinage (scénario 1, cas 1)	57
Tableau III.21 : Résultats des variables (scenario 1, cas 1).	57
Tableau III.22 : Résultats des contraintes (scenario 1, cas 1).....	57
Tableau III.23 : Classification de solution (scenario 1, cas 1).....	58
Tableau III.24 : Résultats de l'optimisation du système de freinage (scénario 1, cas 2).	59
Tableau III.25 : Résultats des variables (scenario 1, cas 2).	59
Tableau III.27 : Classification de solution (scenario 1, cas 2).....	59
Tableau III.28 : Résultats de l'optimisation du système de freinage (scénario 2, cas 1).	61
Tableau III.29 : Résultats variables (scenario 1, cas 1).	61

Liste des tableaux

Tableau III.30 : Résultats des contraintes (scenario 2, cas 1).....	62
Tableau III.31 : Classification de solution (scénario 1, cas 1).....	62
Tableau III.33 : Résultats des variables (scénario 2, cas 2).....	64
Tableau III.34 : Résultats des contraintes (scénario 2, cas 2).....	64
Tableau III.35 : Classification de solution (scénario 2, cas 2).....	64
Tableau III.36 : Résultats de l'optimisation du système sécurité latérale (cas 1).....	66
Tableau III.37 : Résultats des variables (cas 1).	66
Tableau III.38 : <i>Suite du tableau III.37.</i>	66
Tableau III.39 : Résultats des contraintes (cas 1).	67
Tableau III.40 : <i>Suite du tableau III.39.</i>	67
Tableau III.41 : Classification de solution (cas 1).	67
Tableau III.42 : Résultats d'optimisation de système de sécurité latérale (cas2).	69
Tableau III.43 : Variables des résultats (cas 2).....	69
Tableau III.44 : <i>Suite du tableau III.43.</i>	69
Tableau III.45 : Résultats des contraintes (cas 2).	70
Tableau III.46 : <i>Suite du tableau III.45.</i>	70
Tableau III.47 : Classification de solution (cas 2).	70
Tableau III.48 : Résultats de l'optimisation du système de sécurité latérale (cas 1)..	72
Tableau III.49 : Variables des résultats (cas 1).....	72
Tableau III.50 : <i>Suite du tableau III.49.</i>	72
Tableau III.51 : Résultats des contraintes (cas1).	73
Tableau III.52 : <i>Suite du tableau III.51.</i>	73
Tableau III.53 : Classification de solution.....	73
Tableau III.54 : Résultats de l'optimisation du système de sécurité latérale (cas 2)..	75
Tableau III.55 : Variables des résultats (cas 2).....	75
Tableau III.56 : <i>Suite du tableau III.55.</i>	75
Tableau III.57 : Résultats des contraintes (cas 2).	76
Tableau III.58 : <i>Suite du tableau III.57.</i>	76
Tableau III.59 : Classification de solution (cas 2).	76
Tableau III.60 : Comparaison des résultats des performances du 1 ^{er} problème entre les deux algorithmes (scénarios 1 et 2).	78
Tableau III.61 : Comparaison des résultats des performances de 2 ^{ème} problème entre les deux algorithmes.	79
Tableau III.62 : Résultats de littérature.	80

Introduction générale

Introduction générale

Lorsqu'il s'agit d'un produit d'utilité et de consommation importante comme l'automobile, l'industrie doit satisfaire la clientèle au titre de la concurrence et de la sécurité publique imposée par la réglementation. Pour assurer ces exigences, les constructeurs doivent mobiliser leurs énergies et consacrer leurs efforts dont le but d'avoir un véhicule performant. Les critères qu'il va falloir suivre sont la sécurité, la qualité, la disponibilité ainsi que le coût. Si le prix et la disponibilité sont des objectifs quantifiables et faciles à déterminer ; bien que les critères de qualité peuvent être chiffrables néanmoins, ils sont souvent subjectifs, complexes et très importants que ce soit pour le client ou le fabricant. Pour cela, il est primordial de faire une démarche rationnelle de conception des pièces ainsi que les systèmes mécatroniques de l'automobile.

Le monde assiste à un grand développement technologique concernant les véhicules, et cette technologie est faite à l'aide des méthodes d'optimisation (maximiser ou minimiser une fonction ou des fonctions). Dans ce contexte, les constructeurs doivent optimiser les pièces automobiles ainsi que les systèmes mécatroniques dont le but est d'avoir une fonction requise du véhicule, c'est à dire, donner plus de satisfaction à la clientèle concernant la sécurité active e.g, freinage (ABS), le confort, le design, la structure, et tous ce qui peut être amélioré pour atteindre ces objectifs.

Le but de ce travail est d'optimiser des systèmes de sécurité de l'automobile, à l'aide des algorithmes bio-inspirés (méthodes de l'intelligence artificielle) afin de maximiser : les critères de performances (système de sécurité latérale) et des pièces du système de freinage (sécurité active).

Ce mémoire est subdivisé comme suit :

- Le premier chapitre illustre différents systèmes mécatroniques ainsi que les composants de l'automobile et leurs états dans l'art de l'optimisation.
- Le deuxième chapitre est consacré à un état de l'art sur l'optimisation afin de connaître ces différents types et les méthodes de résolution.
- Le troisième chapitre est consacré à deux applications : l'optimisation d'un système de freinage et d'un système de protection latérale de la voiture.

Chapitre I

Systemes de sécurité dans l'automobile

I.1 Introduction

L'automobile est un produit indispensable dans la vie moderne. Les constructeurs n'ont cessé d'apporter des améliorations à leurs modèles. La prolifération des véhicules contient son lot de danger, d'où le besoin de perfectionner les systèmes de sécurité dans l'automobile. Les systèmes de freinage sont de plus en plus performants d'une part, et des habitacles de plus en plus sophistiqués d'autre part. La mécatronique a permis d'avoir des systèmes de sécurité plus accessibles, tel que l'ABS. Les différents composants ainsi que le fonctionnement de ces systèmes sont expliqués dans ce premier chapitre.

I.2 Généralités sur les systèmes mécatroniques dans l'automobile

La mécatronique est un mot composé de deux termes « mécanique et électronique ». Elle est d'abord apparue au Japon en 1969 dans une société appelée Yaskawa Electric pour faire l'intégration de l'électronique programmable dans un système purement mécanique. Cette invention a été plus développée au fil des années [1], [2].

Aujourd'hui les systèmes mécatroniques sont si importants, qu'ils incluent quatre différentes disciplines [3]. La figure I.1 montre la représentation schématique de l'implication des différentes disciplines.

- La mécanique regroupe celle des solides et des fluides ainsi que la science des matériaux (mécanique des milieux continus).
- L'électronique est la discipline qui étudie et fabrique des composants électroniques nécessaires au contrôle des systèmes mécaniques, comme les microcontrôleurs et les convertisseurs A/N et N/A.
- L'informatique est la discipline qui fournit l'ensemble des outils logiques (logiciels) et permet d'assurer le traitement du signal en temps réel ainsi que la connectivité des systèmes mécatronique dans des réseaux.
- L'automatique est la discipline qui fournit les systèmes d'asservissements de différents types aux systèmes mécatroniques, ainsi que les outils de régulation et de commandes.

La figure I.1 fait l'apparition des quatre champs disciplinaires.

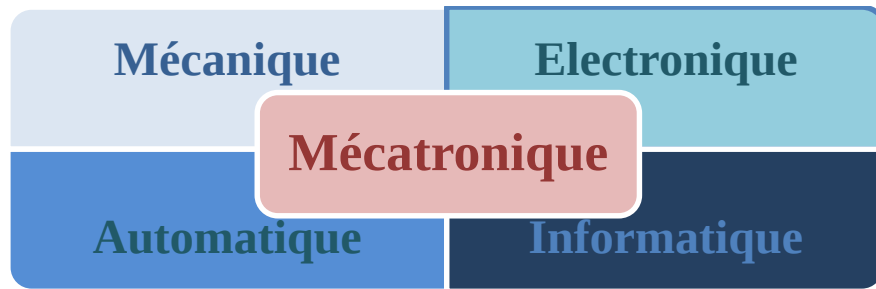


Figure I.1 : Champs disciplinaires concernant la mécatronique.

On peut trouver la mécatronique dans plusieurs domaines avec différentes normes. Dans notre projet on va se baser sur la norme citée dans [3], i. e. une démarche visant l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et la fabrication des pièces dont le but est d'optimiser leurs fonctionnalités. Le domaine que nous allons aborder concerne les systèmes mécatroniques dans l'automobile [3].

Initialement, les systèmes automobiles étaient entièrement mécaniques et électriques, il n'existait pas de systèmes de sécurité intelligents. Cependant, de nos jours la mécatronique des automobiles est basée sur l'intelligence artificielle. Parmi les systèmes inventés pour la sécurité est le système anti blocage des roues (ABS) lors du freinage, qui était introduit à la fin des années 70. Il est utilisé pour réduire le patinage et augmenter le contrôle du véhicule dans les situations d'arrêt d'urgence. Ce système a été suivi par le système de contrôle de traction (TCS) en 1980 [4].

I.3 Conception des pièces automobiles

I.3.1 Structure de l'automobile

La structure de l'automobile est toute l'enveloppe qui porte les pièces. Le premier élément très essentiel est le châssis, ajoutant à ce dernier toutes les tôles de carrosserie qui le couvre.

La figure I.2 montre la structure générale d'une automobile.

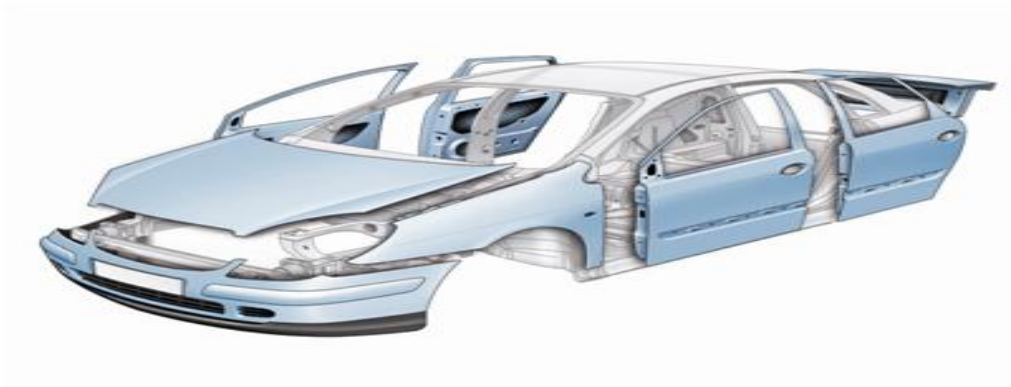


Figure I.2 : Structure d'automobile (châssis, carrosserie).

La conception de structure d'automobile passe par plusieurs étapes, on cite quelques méthodes :

I.3.1.1 Hydroformage

Cette méthode est utilisée pour la fabrication des pièces automobiles, comme le châssis, le support du moteur...etc. Cela concerne toutes les pièces qui ont une faible épaisseur. La procédure utilisée pour avoir la déformation des matériaux est d'appliquer une forte pression sur le métal. La pièce retenue appelée matrice (mâle ou femelle) possède alors la forme souhaitée pour être installée. Il existe plusieurs variantes d'hydroformage comme c'est expliqué dans [5] :

- **Formage avec matériau élastomère :** utilisé beaucoup plus pour la conception des pièces d'aviation, mais aussi pour les pièces d'automobile, appliqué sur le métal ou le bois (procédé Geurin) ou sur l'acier poli et aluminium (procédé Marform).
- **Formage avec cellule de fluide :** utilise une grande pression uniforme sur un acier ou un alliage pour l'emboutissage des petites pièces d'intérieure et des grandes pièces de l'extérieure d'automobile, ainsi que la possibilité de couper la tôle (procédé Flexforme).
- **Formage contre pression hydraulique :** utilisé pour réduire le coût en outillage dans l'industrie d'automobile. Il permet de minimiser les étapes nécessaires pour la réalisation de la pièce.
- **Formage de flan double :** utilisé spécialement pour les pièces automobiles creuses et le châssis.

Suite aux procédures d'emboutissage, les pièces à faibles épaisseur doivent être assemblées par une technique appelée **sertissage** [6] :

I.3.1.1 Sertissage

C'est une méthode qui permet d'assembler deux pièces métalliques embouties en repliant le bord de tôle extérieure sur le panneau intérieur. Il s'agit d'un assemblage à froid consacré aux pièces des automobiles, telles que les potières, les volets, les capots (les ouvrants). Ces derniers sont constitués de trois types de pièces :

- Pièces de peau extérieure visible au client.
- Pièces de renfort permettant de rigidifier la structure.
- Pièces de doublure composant le panneau intérieur et permettant le garnissage intérieur des cotés des portes.

La Figure I.3 montre une vue générale de la caisse en blanc du véhicule Peugeot 307 ainsi que les différents ouvrants en vue assemblée [6].

A ₀ : capot	C : portes (gauche et droite)
A ₁ : raidisseur de capot	C ₁ : raidisseur horizontal central
A ₂ : renfort d'articulation (droite et gauche)	C ₂ : raidisseur horizontal
A ₃ : doublure de capot	C ₃ : cadre coulisseau
A ₄ : support de gâche	C ₄ : renfort d'encadrement
	C ₅ : renfort d'encadrement arrière
	C ₆ : raidisseur de doublure
	C ₇ : liaison gousset rétroviseur
	C ₈ : doublure de porte
	C ₉ : renfort de charnière supérieure
	C ₁₀ : renfort de charnière inférieure

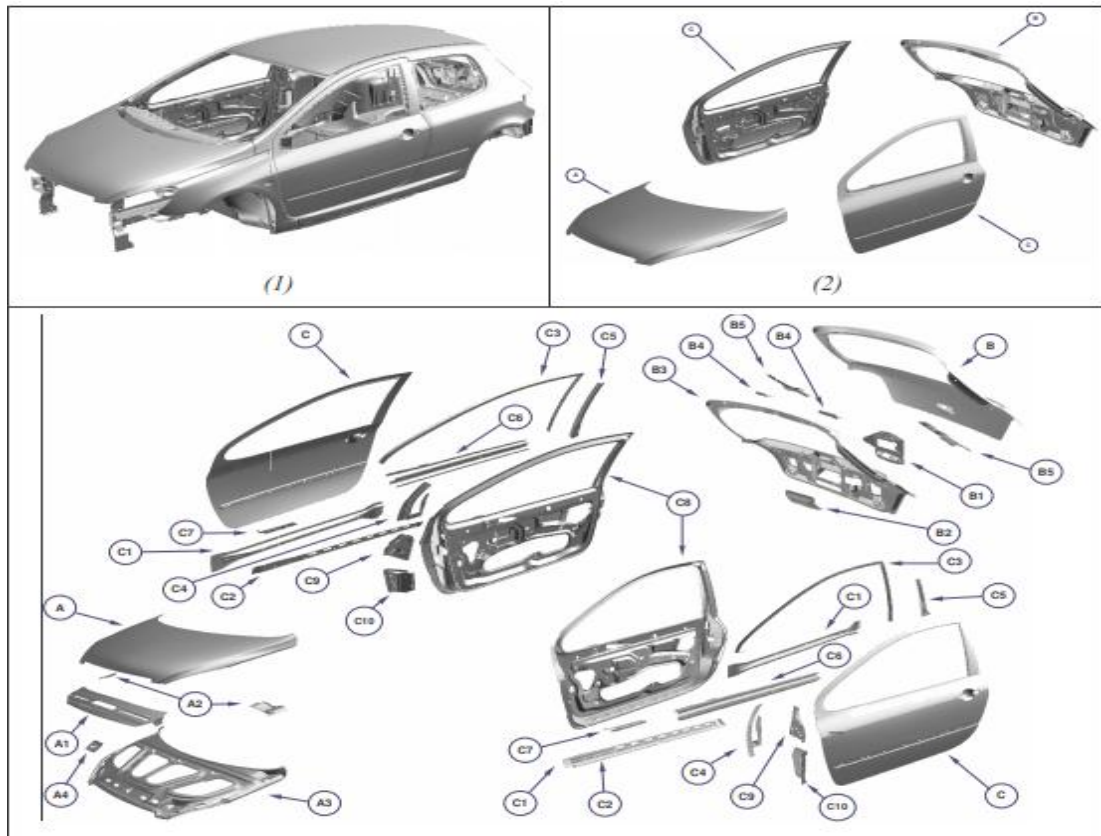


Figure I.3 : Différents ouvrants d'une voiture obtenus par emboutissage.

Pour tester la performance des tôles, on peut faire des crash tests tel que Euro NCap, noté avec des étoiles (les étoiles reviennent au comportement des voitures au cours du crash test) [7].

I.4 Systèmes de sécurité

Les besoins en systèmes de sécurité automobile augmentent considérablement afin de fournir plus de protection pour les personnes (que ce soit des usagers ou des passants) et pour la sécurité publique en général. Au même titre que le confort, la sécurité des véhicules roulant est devenue un critère de concurrence entre les différents fabricants. De plus, de nos jours, les normes de sécurité évoluent rapidement vu les statistiques d'incidents de tout genre impliquant des véhicules roulants ainsi que les transformations que l'industrie automobile est en train de vivre avec les véhicules autonomes et électriques. Les constructeurs sont obligés de réaliser des véhicules plus performants en termes de système de sécurité. Dans ce contexte on trouve que la sécurité est divisée en deux catégories, la sécurité active, qui intervient au cours de la conduite et, la sécurité passive, qui intervient au cours d'accident, cette distinction est définie dans [4].

I.4.1 Sécurité passive

La sécurité passive cherche à minimiser l'impact du conducteur et des passagers au moment de l'incident. Avant l'ère de la mécatronique, les composants de sécurité passive ont été juste des dispositifs purement mécaniques comme la ceinture de sécurité et les pare-chocs à l'avant et à l'arrière du véhicule. Aujourd'hui, la sécurité est modernisée et ceci est dû à l'intégration des composants électroniques et des programmes logiciels. La performance de sécurité a augmenté en ajoutant d'autres systèmes qui sont résumés dans le Tableau I.1. La description des outils de la sécurité passive sont données par [8], [9].

Tableau I.1 : Description des différents systèmes de la sécurité passive.

Système	Description
Airbag	C'est un coussin gonflable qui se déclenche lorsqu'un capteur détecte un choc. Il envoie l'ordre pour que la réaction entre l'acide de sodium et le potassium donne l'azote sous forme de gaz qui gonfle l'airbag pour amortir la dynamique aléatoire des passagers.
Structure d'automobile avec déformation programmée	C'est une enveloppe rigide qui doit se déformer selon un plan préétablie.
Colonne de direction rétractable	C'est un arbre qui relie le volant au boîtier de direction, sert à changer la direction de véhicule en cas de danger, le volant se rétracte afin de ne pas blesser le conducteur.
Appuie-tête	C'est un coussinet qui évite, en cas de choc, au conducteur et aux passagers la rupture de la colonne vertébrale.
Sièges à effet « anti-sous-marin »	C'est un dispositif métallique qui se situe à l'intérieure du siège pour absorber l'énergie d'impact.

I.4.2 Sécurité active

La sécurité active est basée sur la comparaison de la commande du conducteur par rapport aux éléments actifs assistée par un ordinateur, par exemple le système anti blocage des roues, en prenant les conditions de la route en considération afin d'éviter les accidents [4].

I.4.2.1 Sécurité conditionnelle

Le conducteur peut être perturbé par des conditions extérieures, et dans ce contexte les chercheurs ont intégré le domaine d'ergonomie dans la sécurité automobile car l'homme est le seul maillon flexible de la chaîne (conducteur, automobile, route), dont l'état du conducteur impose une grande responsabilité afin d'éviter les accidents en ajoutant à ceci les conditions climatiques.

I.4.2.2 Sécurité de conduite

Ce type dépend de la liaison des roues motrices au sol, la suspension, le freinage, et d'autres éléments qui aident pour une bonne conduite.

- ✓ **Liaison au sol** : l'utilisation du pneu d'hiver pour conduite sur moyenne ou basse adhérence, comme les pneus saisonniers, pneus autoporteur, pneus pax, etc. La liaison roue-sol possède une puissance donnée par la formule suivante :

$$P_R = -\mu_R Mg \chi' \quad (I.1)$$

$$\mu_R = a + b \chi' \quad (I.2)$$

où P_R est la puissance développée par les actions roue et sol, μ_R est le coefficient de résistance ou roulement, M est la masse du véhicule, g est la gravité, et x est la vitesse [10].

- ✓ **Freinage** : le système freinage est un mécanisme qui permet de ralentir ou arrêter un véhicule selon le besoin du conducteur, il fonctionne contrairement au moteur à combustion interne, il transforme l'énergie mécanique en énergie calorifique (chaleur) [4]. Le véhicule est constitué d'un dispositif de frein de service, frein de secours, frein de stationnement.

Les éléments d'un système freinage sont présentés dans la figure I.4 [11].

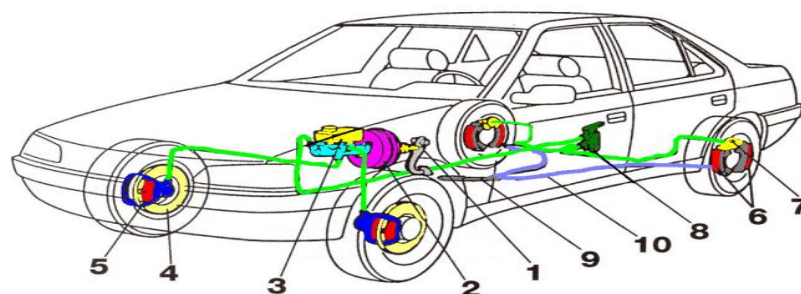
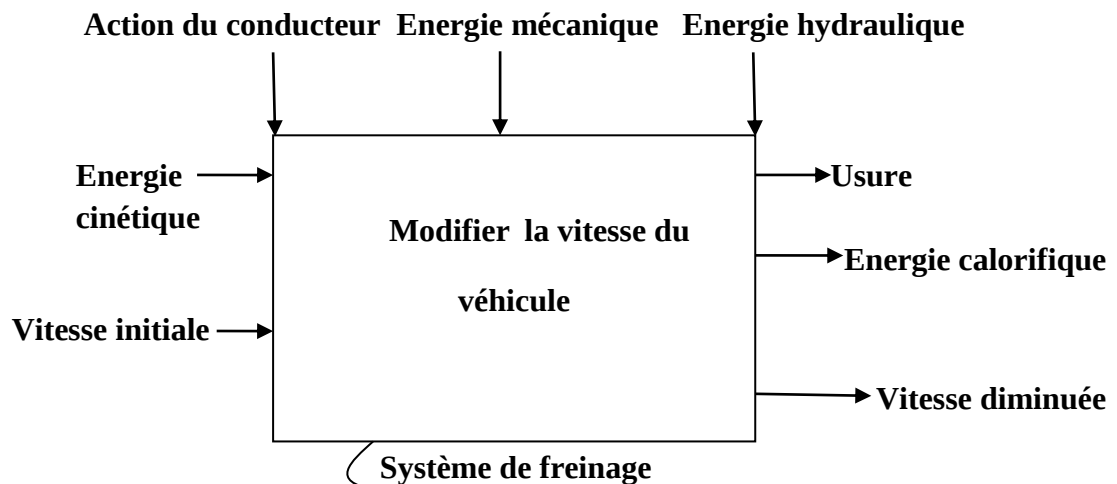


Figure I.4 : Eléments du système de freinage.

Tableau I.2 : Désignation des repères donner dans la figure I.4.

Repère	Désignation	Repère	Désignation
1	Pédalier	6	Segments de freins
2	Master-vac	7	Cylindres de roues
3	Maître cylindre	8	Correcteurs
4 et 5	Disque entier et étrier	9 et 10	Commande et câble de frein de stationnement

Le fonctionnement global du système de freinage est résumé dans la figure I.5.

**Figure I.5 :** Fonction global du système de freinage.

➤ Notion d'énergie cinétique

La mise en marche de véhicule retient une énergie cinétique, qui est donné par l'équation suivante [11] :

$$E_c = \frac{1}{2} MV^2 \quad (I.3)$$

où E_c est l'énergie cinétique en Joule, M est la masse du véhicule en Kg, et V est la vitesse du véhicule en m/s (mètre par seconde).

Pour ralentir le véhicule, il faut absorber une partie de l'énergie cinétique, pour l'arrêter il faut l'absorber complètement et la transformer en énergie calorifique.

Le système de freinage dépend des critères suivants :

➤ **Distance d'arrêt**, elle dépendra des facteurs suivants :

- De la vitesse du véhicule.
- De sa suspension.
- De ses pneumatiques.
- De son système de freinage.
- Du coefficient d'adhérence (selon la conception des pneumatiques et l'état de la route : sèche ou humide).
- Du temps de réaction du conducteur (attentif, somnolant, sous l'effet d'alcool ou barbiturique).
- La charge de l'automobile (selon le nombre de passager et des bagages).

➤ **Distance de freinage**, c'est la distance parcourue pendant l'opération de freinage, celle-ci dépend de la vitesse de l'automobile et de la décélération possible. Elle est calculée par la relation suivante :

$$D_f = \frac{(V_i - V_t)^2}{2\gamma} \quad (I.4)$$

où D_f est la distance de freinage en m, V_i est la vitesse initiale en m/s, V_t est la vitesse finale en m/s, et γ est la décélération en m/s².

La formule pour calculer la décélération est donnée comme suit :

$$\gamma = \frac{1}{m} \cdot \left(\frac{C_{av}}{R_{av}} + \frac{C_{ar}}{R_{ar}} \right) \quad (I.5)$$

où m est la masse du véhicule, C_{av} est le couple de freinage sur l'ensemble des roues d'avant, R_{av} est le rayon des roues d'avant, C_{ar} est le couple de freinage sur l'ensemble des roues d'arrière, et R_{ar} est le rayon des roues d'arrière.

Pour obtenir la distance d'arrêt, on doit ajouter la distance parcourue pendant le temps de réaction du conducteur à la distance de freinage.

- **Accélération** : lorsque le véhicule s'accélère, il se soulève à l'avant et se baisse à l'arrière. Cette opération s'appelle le cabrage, donc : $x'' = \gamma$ avec $\gamma > 0$ [14].
- **Glissement** défini par l'accélération et le freinage dans une ligne droite ou un virage. Dans une ligne droite, on a :

$$\lambda_A = \frac{v_r - v}{v_r} \quad (I.6)$$

Où A est pour l'accélération, v est la vitesse de déplacement de la roue, et $v_r = r \omega$ est la vitesse longitudinale du pneu au niveau de surface de contact [12].

- **Masse du véhicule :** le freinage dépend aussi du poids du véhicule selon la variation de la charge.

Le système de freinage joue un grand rôle dans la sécurité des automobiles. Dans ce mémoire on va se focaliser sur tous les détails de ce système dans la section qui suit [4].

I.5 Système de freinage

Le système de freinage automobile joue un rôle important, non seulement dans les processus de décélération et d'arrêt, mais également dans de nombreuses stratégies de contrôle de la stabilité. Comme on a déjà mentionné dans la section précédente (les éléments et la fonction globale du système de freinage) dans cette section, on va détailler sa fonctionnalité ainsi que ses types [11].

I.5.1 Conception des pièces du système freinage

Au début, les véhicules étaient dotés exclusivement de frein à tambour. Avec l'invention du système de freinage à disque, il fut installé dans le train avant pour la plupart des véhicules. Bien que onéreux, certains modèles sont dotés du même système pour l'ensemble des roues.

I.5.1.1 Frein à tambour

Il est constitué de deux mâchoires en acier recouvert d'une garniture en matériau composite, qui a un bon coefficient de frottement (0.35 à 0.40), les mâchoires sont pressées contre le tambour par un cylindre. Le tambour est une cloche en acier doux solidaire de la roue et monté sur roulement. Ce dernier est monté sur l'essieu et sertie par un circlip. Un cabochon retient le lubrifiant du roulement (graisse mécanique) (voir figure I.6) [11].



Figure I.6 : Tambour de frein [13].

Les principaux paramètres des bruits :

- Caractéristiques frictionnelles du couple disque/plaquette.
- Géométrie des structures.

I.5.1.2 Frein à disque

Le frein à disque est constitué des éléments suivants :

- **Disque** le matériau idéal pour la fabrication d'un disque de frein, c'est celui qui stocke plus de chaleur et résiste aux efforts mécaniques. Le disque est généralement en acier. Pour une température si forte. (la variation de températures d'utilisation est entre 0 C° et 800 C°) [14]. Pour cela, on trouve dans certains véhicules des disques pleins. Dans le but d'augmenter l'échange thermique entre le disque et l'air environnant, on utilise des disques ventilés ou ajouré. En diminuant ainsi la température, on garantit une meilleure ventilation et réduire le frottement des garnitures sur le disque [13].
- **Plaquettes** de part et d'autre du disque, sont composées chacune d'une garniture en matériau composite collée ou rivetée sur un support métallique. Les plaquettes contiennent une ou plusieurs rainures qui influe sur le comportement thermique de celle-ci par :
 - Une bonne résistance à l'usure.
 - Non agressivité des pistes de frottement.
 - Absence du bruit.
 - Haute résistance thermique. La température des garnitures peut atteindre 600° C à 700° C [13].

- **Étrier** en acier, solidaire de l'essieu, qui supporte les plaquettes, en forme de chape, il recouvre un secteur du disque, il existe deux types d'étrier coulissants ou fixes. [13].
- **Piston hydraulique** dans le cas d'un étrier flottant ou coulissant ou deux pistons dans le cas d'un étrier fixe posés contre les supports des plaquettes [13].



Figure I.7 : Disque de frein [13]

Il existe deux types de montage d'étrier :

- Montage rigide.
- Montage flottant.

❖ **Montage rigide (étrier fixe)**

Dans le cas de l'étrier fixe, qui est rigidement attaché à l'essieu et qui comporte deux pistons opposés alimentés par un même circuit hydraulique, les deux pistons viennent presser les deux plaquettes sur le disque lors de la mise en pression (voir figure I.8) [15].

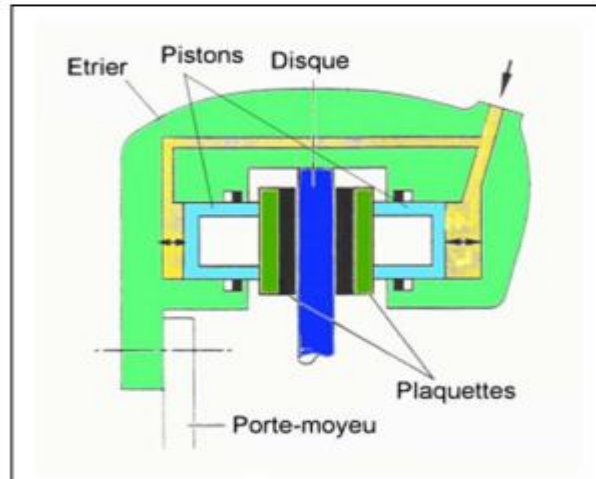


Figure I.8 : Frein à disque (montage rigide).

❖ Montage flottant (étrier coulissant)

Le piston pousse la plaquette contre le disque, il sera coincé, donc l'étrier se déplace par rapport à la chape pour pousser la deuxième plaquette contre le disque (voir figure I.9) [15].

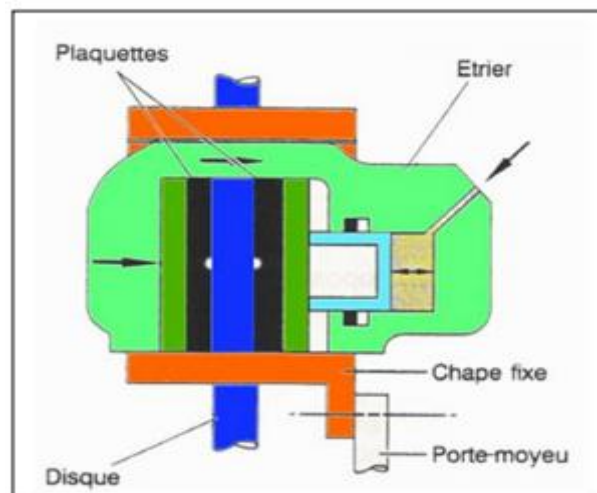


Figure I.9 : Frein à disque (montage flottant).

I.5.2 Comparaison entre frein à disque et frein à tambour

Les automobiles modernes ont un système de freinage avec des freins à disque à l'avant, et à tambour à l'arrière (voir figure I.10 et tableau I.3). Certains modèles sont dotés tant à l'avant qu'à l'arrière de frein à disques. Ce système est relié par des tuyaux qui relient le frein de chaque roue au maître cylindre. Ceci est expliqué dans la section suivante [12].

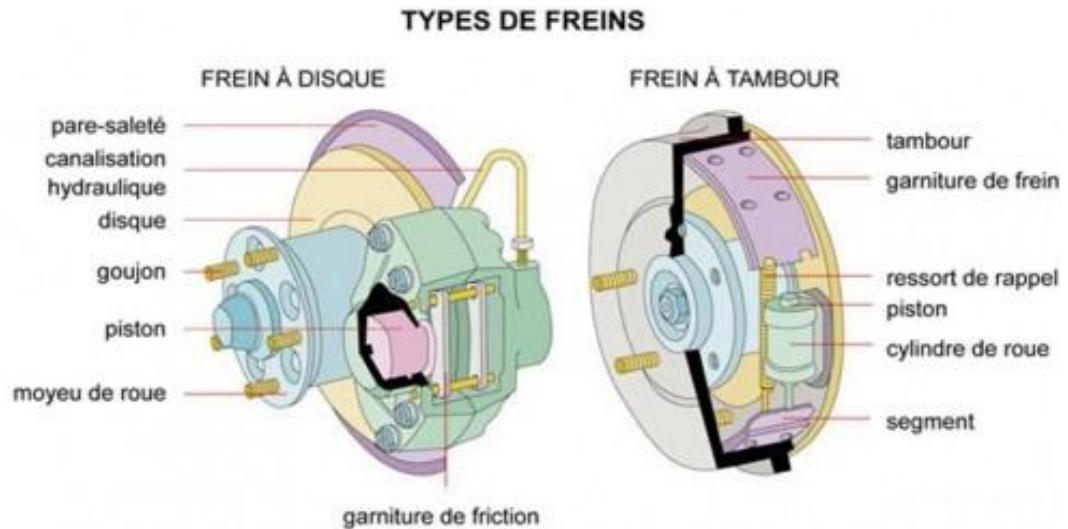


Figure I.10 : Comparaison entre le frein à disque et le frein à tambour.

Tableau I.3 : Avantages et inconvénients des freins à disque et à tambour [13].

A disque (Avantages)	A tambour (Inconvénients)
• Meilleur refroidissement. • L'expansion n'affecte pas la qualité du freinage. • Une action rapide grâce au faible jeu fonctionnement. • Bonne progressivité. • Une pression distribuée uniformément. • Absence de déformation. • La même pression de freinage (en arrière et en avant) • Réglage du jeu automatique. • Facilité d'emplacement des garnitures.	• L'effort est mal distribué. • Mauvaise résistance à la chaleur. • Le tambour se dilate et se déforme rapidement. • L'usure sur le segment primaire est plus claire.

I.5.3 Critères d'évaluation d'un système de freinage

Le frein à disque doit répondre à différents types d'exigence [16], dont les principaux sont :

- L'efficacité de freinage.
- L'endurance du système.
- Le confort d'utilisation.

❖ Efficacité

L'efficacité du freinage (voir tableau I.4) est l'arrêt du véhicule en mouvement avec une distance minimale. Pour assurer cette dernière, il faut augmenter l'effort tangentiel qui vient des frottements entre les plaquettes et le disque, ainsi que : la pression de contact, la surface de frottement et le coefficient de frottement. Une relation inverse relie ces valeurs à la distance ? (lorsque les valeurs augmentent, la distance diminue).

Tableau I.4 : Critères d'efficacité de freinage.

Pression de contact disque/garnitures	Coefficient de frottement	Surface de frottement
• Elle varie entre 0 et 80bars. Dépend de : • L'état de surface. • L'usure. • Rigidités des matériaux. • Dilatation thermique.	Il doit rester stable le plus normalement possible pour la stabilité de freinage. Il dépend de : • La vitesse de rotation. • L'hygrométrie. • La température de fonctionnement.	La surface réelle peut être différente par rapport à la surface potentielle avec des variations dues aux couplages entre les dilatations thermiques, la pression, et de l'usure.

❖ Confort

Il dépend des vibrations ainsi que des bruits. Les vibrations sont classées en deux catégories par rapport à leurs modes de génération :

- Le cold-judder causé par un défaut d'assemblage de disque qui provoque les jeux.

- Le hot-judder relié à l'apparition des points chauds

L'état d'équilibre du système de freinage est accumulé par le vecteur de la force appliquée et le vecteur de la force non linéaire de raideur. La non-linéarité est due au couple disque/plaquette. La relation est donnée par l'équation suivante [16], [17]:

$$F_k(y) = F(\dot{y}, y) \quad (I.7)$$

où $F_k(y)$ est le vecteur de la force appliquée, $F(\dot{y}, y)$ est le vecteur de force non linéaire de raideur, y est le vecteur de déplacement à l'état d'équilibre, et $\dot{y}$ est la dérivée première de y en fonction du temps.

Une fois la stabilité est effectuée l'équation du mouvement est donnée par la matrice de la masse M et la matrice d'amortissement D :

$$M\ddot{y} + D\dot{y} + F_k(y) = F(\dot{y}, y) \quad (I.8)$$

où $\ddot{y}$ est la deuxième dérivée de y en fonction du temps.

Le système peut être linéaire dans l'état d'équilibre par la relation :

$$y = y_0 + \Delta y \quad (I.9)$$

où y_0 est le vecteur de déplacement à l'état d'équilibre et Δy note une petite perturbation à proximité de l'état d'équilibre.

L'instabilité des frottements provoque des bruits. Ces derniers sont classés par intervalle de fréquence :

- Le stick-slip ($f < 200$ Hz).
- Le squeal ($500 \text{ Hz} < f < 3000 \text{ Hz}$).
- Le crissement ($2000 \text{ Hz} < f < 5000 \text{ Hz}$).

Il existe aussi des vibrations qui viennent des éléments comme l'étrier [16].

I.5.4 Types de systèmes de freinage

Le freinage commence quand une force est exercée sur la pédale de frein ou le frein à main. Cette force va être transmise aux roues par une multiplication de dix fois plus par rapport à la force exercée au niveau de la pédale pour actionner les freins (la plupart des

véhicules sont dotés de système de freins situés dans les roues), l'augmentation de la force des jambes ou des mains est faite par des phénomènes physiques. C'est par ces phénomènes que les types de freinage sont classés [12]. Ces types sont expliqués dans les sections suivantes :

I.5.4.1 Système de freinage hydraulique

Le système hydraulique est un système où une force est appliquée sur un point (la pédale) et sera transmise à un autre point (les roues) par un fluide (liquide de freinage) qui est généralement de l'huile par une multiplication de 10. Ceci est dû au rayon des pistons. La force est exercée sur un petit piston qui envoie le fluide dans l'autre piston au diamètre plus grand. La figure I.12 explique le principe de cette transmission de force.

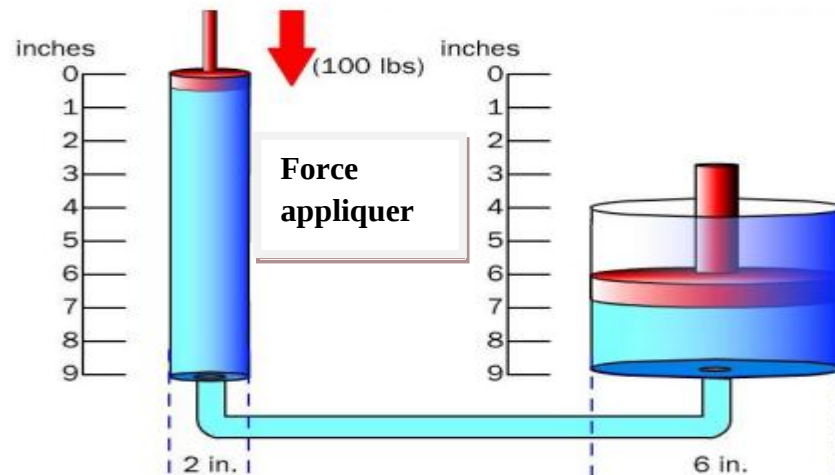


Figure I.11 : Simple principe de transmission de force hydraulique [18].

Le système hydraulique est constitué d'un maître-cylindre relié par des tuyaux et des tubes flexibles aux cylindres. Les cylindres de roue contrôlent le mouvement des mâchoires de frein de chaque roue. Lorsque la pédale de frein est enfoncée, le fluide hydraulique force les pistons du cylindre de roue contre les mâchoires de frein pour le frein à tambour et les plaquettes pour le frein à disque, ce qui permet au frottement d'apparaître, entre le tambour (ou plaquette) de frein et les garnitures. Ensuite, le frottement freine les roues, puis le véhicule s'arrête. Lorsque le conducteur relâche la pédale, les freins sont relâchés, le ressort de rappel rétracte les mâchoires et les roues tournent librement (voir figure I.12) [18].

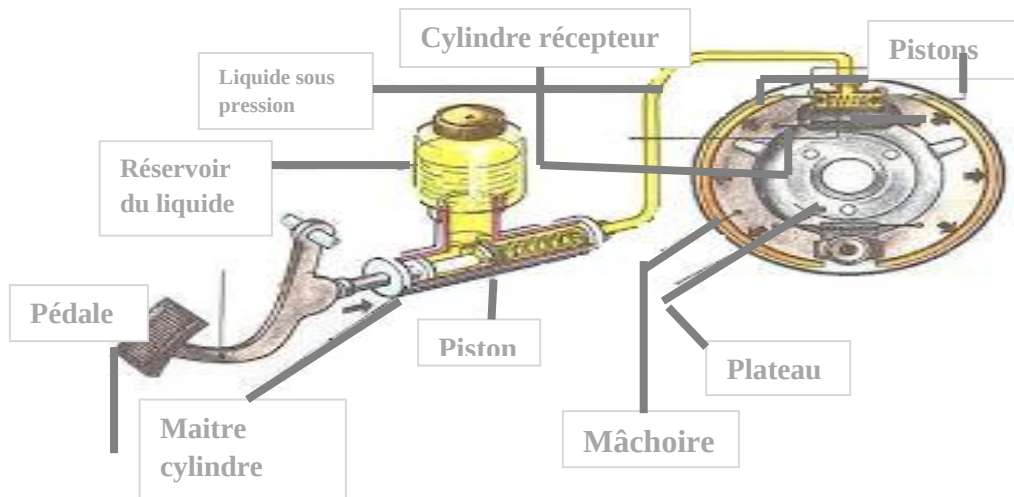


Figure I.12 : Eléments du système hydraulique.

I.5.4.2 Système de freinage pneumatique

Les informations de cette section sont retirées depuis le document cité dans [19]. La plupart des véhicules lourds (semi-remorques, camions, et autobus), ont un système de freinage à air comprimé. Le système est constitué d'un compresseur qui fonctionne de la même façon que le moteur à combustion interne (cycle d'admission et de compression) qui est la source d'air comprimé munis d'un régulateur pour contrôler la pression d'air, lorsque la pression est augmentée la soupape d'échappement s'ouvre, l'air remplit le réservoir, ce dernier comporte des robinets de vidange. Ceci serve à vider l'humidité condensé afin d'éviter les défaillances (rouille et la corrosion). Le nombre de réservoirs dépend de la taille des cylindres de frein. La force exercée sur la pédale permet au réservoir de remplir les chambres, l'actionnement des freins est fait par deux circuits (circuits primaire et secondaire). Le primaire pour actionner les freins arrière et le secondaire pour les freins avant. Dans ce type de freinage, les feins sont généralement à tambour mais on peut trouver des véhicules qui ont des freins à disque.

I.5.4.3 Système de freinage électro hydraulique

C'est un système de freinage où la puissance est générée par une pompe hydraulique. Pour activer la pompe, il faudra un signal électrique afin de contrôler la quantité de pression. Le système nécessite des composants complémentaires :

- Un réservoir pour emmagasiner le liquide.
- Des soupapes d'admission qui conduisent l'huile.
- Une vanne pour faire le retour d'huile au réservoir.

- Des vannes d'arrêt assurant la connexion directe entre la sortie du maître cylindre et les cylindres de roue.
- Un calculateur.
- Un ensemble de capteurs.
- Un simulateur.

En cas de défaillance électrique, les soupapes seront coupées et la commande de pression revient au conducteur tout comme un système freinage classique.

Les servo-électrovannes sont activées par un signal électrique. Ce signal est calculé en fonction du taux de patinage, des conditions de conduite, du besoin du conducteur, de la vitesse de la roue, et de l'angle de patinage.

Le débit de l'orifice est calculé par l'équation suivante [12] :

$$Q_L = C_d h x_s \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (\text{I.10})$$

où C_d est le coefficient de décharge, h et x_s sont la largeur de l'orifice et l'ouverture de l'orifice. Δp est la différence de pression entre la pompe et le cylindre de roue lorsque le frein est appliqué et entre le cylindre de la roue et le réservoir lorsque le frein est relâché.

La forme linéarisée de la force du fluide peut s'écrire comme suit :

$$F_x = \left\{ -\rho L K_q \dot{x}_s - K_{fq} x_s \right\} \quad (\text{I.11})$$

où L est la distance entre deux orifices de la vanne, K_{fq} est le coefficient de force d'écoulement sous pression qui est calculé par l'expression suivante [16] :

$$K_{fq} = 2P_0 C_d^2 \cos(\theta) h \quad (\text{I.12})$$

où θ est l'angle de jet pour la vanne.

On écrit l'équation du couple du modèle électrique comme suit [16] :

$$T_m - T_L - T_F = J\ddot{\theta} \quad (\text{I.13})$$

où T_m est le couple moteur, T_L est le couple de charge, T_F est couple de frottement, J est l'inertie, et $\ddot{\theta}$ est l'accélération angulaire de moteur.

I.5.4.4 Système de freinage à coin électronique

Il est considéré comme le système le plus développé dans les catégories du mécanisme de freinage par fil. Les avantages de ce type de mécanisme sont [16] :

- La réduction de la force d'actionnement.
- L'économie de l'énergie,
- Un rendement plus élevé.
- Un temps de réponse plus rapide par rapport au freinage hydraulique.

D'où, l'obtention une distance de freinage minimale.

L'équation de la force de freinage par frottement est la suivante :

$$F_b = \frac{\mu_p}{\tan \beta - \mu_p} F_s \quad (I.14)$$

où F_b est la force de freinage par friction, μ_p est le coefficient de friction du patin, β est l'angle de coin et F_s est la force de la vis. Cette dernière est calculée par cette équation :

$$F_s = \frac{2\pi\eta_s\eta_{\text{actuateur}}}{P_s} T_{\text{actuateur}} \quad (I.15)$$

où $\eta_{\text{actuateur}}$ est l'efficacité de l'actionneur, η_s est l'efficacité de la vis et P_s est le pas de la vis.

La force de frottement peut être calculée par la force normale de patin :

$$\mu_p F_{cl} = \mu_p 2F_N = 2F_b \quad (I.16)$$

Grâce à l'invention de la mécatronique, les systèmes de freinage ont été développés en intégrant des composants électroniques et des logiciels pour plus de sécurité d'automobile. Ces types sont cités dans la section suivante.

I.5.4.5 Système de freinage antiblocage des roues (ABS)

Le système ABS est une technologie moderne qui contient des composants électroniques pour plus de performance du freinage. Le système est équipé de plusieurs dispositifs mécatroniques. L'étude de développement de ce système de freinage était basée sur la mise en place d'un outil pour évaluer la sensation de freinage. Les modèles mathématiques sont appliqués par des simulations informatiques. La modalisation de la pédale de frein est présentée sous forme d'impédance pour la conception optimale du système de freinage. L'ABS est considéré comme le système le plus performant pour la sécurité active dans les automobiles. Un ABS classique peut être hydraulique ou pneumatique, il possède une source d'énergie, un capteur de vitesse angulaire de roue et une unité de contrôle électronique. L'ABS peut être considéré comme un outil de contrôle du glissement longitudinal, qui est presque standard dans les véhicules actuels. Il détecte le blocage des roues et le réduit par la réduction de la quantité du fluide ou pression de l'air [4]. La conception du système ABS de sécurité, prend en compte tout chargement ainsi que les conditions de la route et la vitesse du véhicule. Les développements novateurs dans ce domaine pourraient être les ajustements techniques de l'ABS pour les systèmes de contrôle de l'alimentation, tels que les véhicules alimentés par batterie et les véhicules à pile à combustible, ainsi que les véhicules électriques hybrides avec entraînement électrique par poussée (traction) [4]. Le déclenchement de l'ABS peut provoquer des dégâts en cas où la route est mouillée, couverte de verglas, de neige...etc. Dans ce contexte, les constructeurs ont ajouté le PCAN pour plus de sécurité lors du déclenchement de l'ABS. Le PCAN est un système embarqué automatique et intelligent pour une détection d'un danger proche avant le déclenchement de l'ABS. L'opération est faite par un bus CAN constitué de cartes électroniques, d'un système de communication sans fil, et d'un ordinateur embarqué [20].

I.6 Etat de l'art sur l'optimisation du système de freinage et des pièces automobiles

Comme on a déjà vu dans les sections précédentes, le système de freinage est l'un des systèmes de sécurité les plus importants dans l'automobile. Pour cela, les constructeurs ont travaillé afin d'optimiser les paramètres pour plus de précision dans le fonctionnement. Dans les paragraphes suivants, on va citer quelques exemples des

problèmes d'optimisation déjà étudiés sur les systèmes de sécurité, ainsi que les pièces automobiles.

En 2009, Yildiz et al. [21] ont publié un article dans lequel ils proposent une approche d'évaluation des algorithmes génétiques. Cette dernière peut être appliquée pour résoudre les problèmes d'optimisations multi-objectifs. Ils ont appliqué cette évaluation dans la conception et la fabrication de la forme d'un composant automobile dans le but de faire une minimisation de son design. L'algorithme utilisé est un algorithme immunitaire basé sur la méthode de Taguchi, appelé HTIA, les résultats affirment que la présence de l'approche d'optimisation hybride a aidé pour obtenir les meilleurs solutions.

En 2012, Yaldiz et Saitou [22] ont développé une nouvelle approche pour l'optimisation de la topologie multi-composante pour l'optimisation de la conception. Cette approche est appliquée dans le cadre de plancher du véhicule. L'objectif est de minimiser le coût sous les conditions données en utilisant PSO (particule swarm optimization), ainsi que d'autres méthodes. Les résultats montrent que les performances ont amélioré en utilisant cette approche en comparant avec d'autres.

En 2016, Hui et Dejie [17] ont publié un article dans lequel ils traitent un problème d'optimisation d'un disque de frein automobile (les vibrations). Le modèle reliability based design optimisation RBDO est utilisé pour minimiser le crissement afin d'assurer la stabilité du système freinage. Les résultats optimaux montrent que les conditions des contraintes sont violées, si les incertitudes hybrides existent dans le système de frein à disque.

En 2019, Chuang et Kevin [23] ont publié un article qui contient une application d'optimisation de la conception des systèmes de retenue de véhicule afin de minimiser le score de risque relatif (SRR) dans le mode de l'impact frontal défini par le programme d'évaluation des voitures neuves (NCAP) de la National Highway Traffic Safety Administration. Ils ont utilisé cinq algorithmes de l'intelligence artificielle appelés MOGA-II, NSGA-II, FAST et MOGA-II, FAST avec NSGA-II, piLOPT afin de résoudre le problème. Cette variation aidera les ingénieurs de conception de connaître l'algorithme le plus efficace. Le système est constitué de 30 variables de conception et 32 contraintes qui doivent être respectées pour répondre aux exigences des impacts. Les résultats donnés dans l'article indiquent que le piLOPT qui a réalisé le plus de

performance suivi par le MOGA-II. Ces deux derniers non seulement ils ont donné de meilleures performances, mais ont également réalisé des conceptions plus faisables dans l'espace de conception plus large.

En 2012 Durgun et Yaldiz [24], ont fait l'optimisation de la forme d'un composant automobile (pièce de support) (optimisation topologique) en utilisant la méthode de recherche de coucou « cuckoo » dont le but est de minimiser le volume. L'algorithme de coucou a fourni des meilleurs résultats, donc il est convenable pour la conception industrielle.

Le tableau I.5 résume cet état de l'art.

Tableau I.5 : Résumé de l'état de l'art.

Référence	Problème	Méthode
[21]	Forme d'une pièce automobile	HTIA
[22]	Cadre de plancher de véhicule	PSO
[17]	Stabilité de frein à disque	RBDO
[23]	Systèmes de retenue de véhicule	MOGA-II, NSGA-II, FAST et MOGA-II, FAST avec NSGA-II, piLOPT
[24]	Pièce de support	CS

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents systèmes de sécurités automobiles : actif, passif, et latérale. Le développement de ces systèmes est primordial pour assurer la protection des usagers. Pour cela, les constructeurs ont utilisé les méthodes d'optimisation afin d'avoir une conception optimale des pièces, des systèmes d'une façon spécifique, et un véhicule performant d'une façon générale. Dans le chapitre suivant, nous verrons les types ainsi que les méthodes de résolution des problèmes d'optimisation.

Chapitre II

Etat de l'art sur l'optimisation

II.1 Introduction

L'optimisation est une branche mathématique qui sert à résoudre des problèmes complexes, tels que les systèmes de sécurités automobiles que nous avons déjà cité au premier chapitre. Dans celui-ci, nous allons apprendre les principaux types de problèmes d'optimisation ainsi que leurs méthodes de résolution.

II.2 Optimisation

L'optimisation est la recherche de l'extrémum (maximum ou minimum) d'un objectif en traduisant le problème à une fonction (ou des fonctions) mathématique appelée « fonction objectif » ou « fonction de coût ». Elle associe un scalaire dans $\mathbb{R}$. Le problème de la résolution se fait analytiquement : problème d'optimisation, et numériquement : programme mathématique. L'optimisation est appliquée dans plusieurs domaines comme la recherche opérationnelle, l'analyse numérique, automatique, l'ingénierie...etc, avec différents types. Afin de résoudre ce problème et trouver la meilleure solution qui est nommée « optimale » ou « optimum globale », (voir la figure II.1), il faut utiliser de nombreuses méthodes de résolution qui sont désignées à un type d'optimisation précis [25]. Le problème d'optimisation est défini comme suit :

$$\min_{x \in S} f(x) \quad \text{ou} \quad \max_{x \in S} f(x) \quad (\text{II.1})$$

- Les variables : des paramètres qui sont choisis pour agir sur le problème, ils peuvent être d'une nature réelle, entière, ou binaire [25].
- La fonction objectif dépend des variables qui sont notées généralement x .

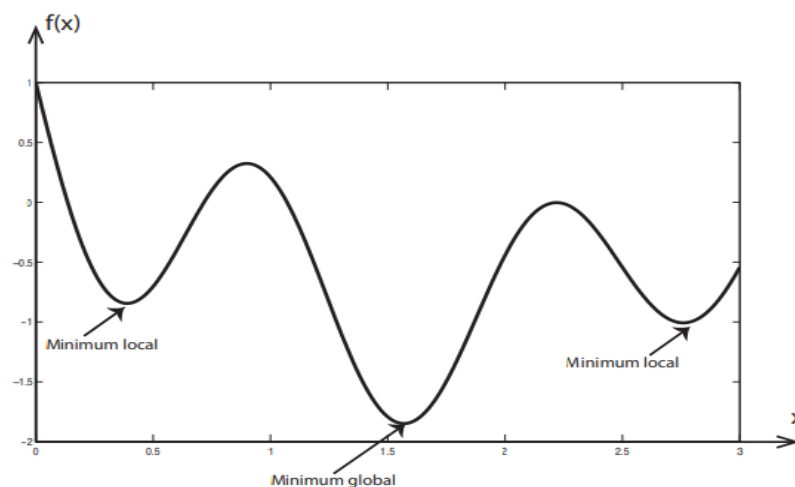


Figure II.1 : Position de la solution optimale globale [26].

II.3 Types d'optimisation

Il existe de nombreux types de problèmes d'optimisation classifiés selon plusieurs critères : type de la fonction objectif (linéaire et non linéaire), suivant le type des variables (continus, discrets, ou combinatoires), selon l'espace de recherche de solution (convexe ou non convexe). Ces types peuvent être sans ou avec contraintes (contraintes d'égalités ou d'inégalités). On peut subdiviser ces problèmes selon le nombre des fonctions objectif en deux principaux groupes comme suit :

II.3.1 Optimisation mono-objectif

Le problème mono-objectif est considéré comme un problème moins complexe car il contient une seule fonction objectif, dont le but de la maximiser ou la minimiser [27].

Il est défini comme suit :

$$\text{Min ou Max } f(x) \quad (\text{II.2})$$

II.3.2 Optimisation multi-objectif

Le problème contient plusieurs fonctions objectifs (critères), il est défini comme suit [27] :

$$F(X) = \{f_1(X), f_2(X), \dots, f_m(X)\} \quad (\text{II.3})$$

où $F(X)$ est la fonction objectif globale, X est le vecteur des variables de décisions $X \in [x_1, x_2, \dots, x_n]$. $f_m(X)$ est la fonction d'un critère, et m est le nombre de fonctions.

Pour traiter les problèmes multi-objectifs, on peut utiliser des méthodes accessibles pour ce cas.

II.3.2.1 Paréto optimum

La méthode de Paréto est utilisée pour définir l'ensemble des solutions efficaces. Pour assurer cette technique, il faut appliquer les relations suivantes [27] :

- Relation de dominance :

$$\begin{cases} m \geq 2 \\ x \in X \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

où m est le nombre de fonctions objectifs, X est le vecteur des variables de discision.

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (\text{II.5})$$

Ce qui caractérise ce type, c'est que la solution optimale n'est pas qu'une seule solution, mais elle dépend du nombre de fonctions objectif, ce qu'on appelle "bons compromis".

$$\begin{aligned} \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad f_i(a) \geq f_i(b) \\ \exists_j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad f_j(a) > f_j(b) \end{aligned} \quad \text{et} \quad (\text{II.6})$$

Donc : $a \succ b$

- Individu non dominé : si aucun individu ne le domine dans la population.
- L'optimalité au sens de Paréto : C'est lorsque un vecteur $\vec{x}$ est dominé par un autre vecteur $\vec{x}'$.

Ceci est appelé le front de Paréto, (voir figure II.2) :

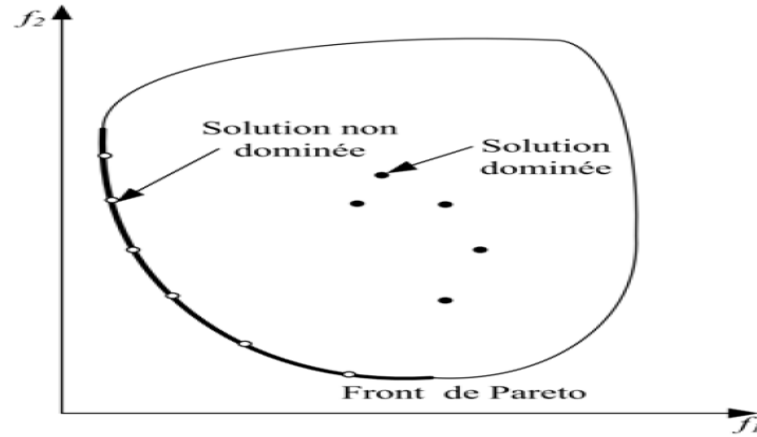


Figure II.2 : Front de Paréto [28].

II.3.2.2 Somme pondérée

Cette technique est basée sur la conversion de plusieurs fonctions objectifs en une seule fonction objectif en attribuant des poids objectifs notés w [29].

La relation suivante explique mathématiquement cette technique :

$$\text{Min } F(x) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(x) \quad (\text{II.7})$$

où w est le poids des objectifs, $\sum w_i = 1$, F est la fonction objectif globale, f est la fonction secondaire.

II.4 Contraintes

Ce sont des fonctions qui doivent être prises en charge par l'algorithme de résolution, noté g [30]. Ces derniers peuvent être non-actives (n'agissent pas sur les solutions optimales), ou actives (les régions optimales sont discontinues), (voir figure II.3). On distingue deux types de contraintes qui vont être expliqués dans la section suivante.

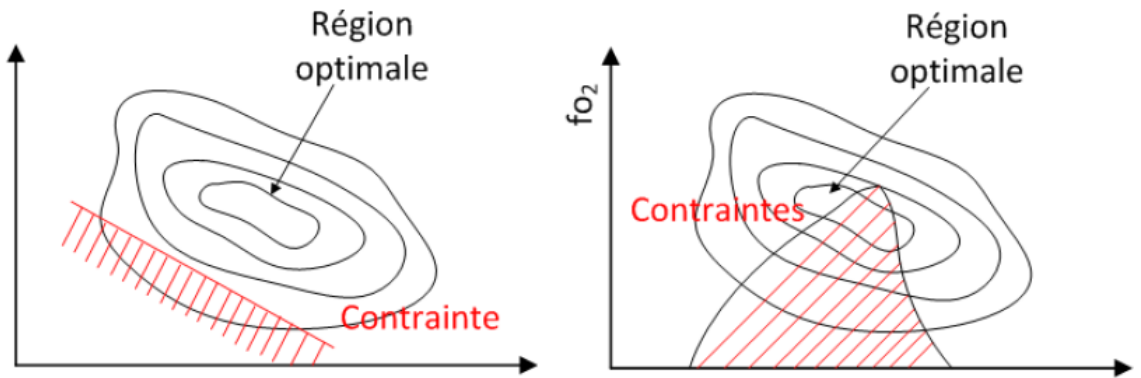


Figure II.3 : Effet des contraintes sur les régions optimales [31].

II.4.1 Types de contraintes

Il existe deux types de contraintes :

- Les contraintes d'égalité sont définies comme suit :

$$\begin{cases} f(X) \\ g_i(X) = 0 \quad i = 1+l, m \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

- Les contraintes d'inégalité sont définies comme suit :

$$\begin{cases} f(X) \\ g_i(X) \leq 0 \quad i = 1, l \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Tel que :

$$X \min_j \leq X_j \leq X \max_j, j = 1, k \quad (\text{II.10})$$

où f est la fonction objectif, x est le vecteur de décision, g est la fonction des contraintes, et k est la dimension du vecteur x [30].

II.4.2 Maîtrise des contraintes

La maîtrise des contraintes est faite par des techniques auxquelles elles transforment les problèmes d'optimisation d'un problème sous contraintes à un autre sans contraintes [30]. On cite les méthodes les plus utilisées [32] :

1. Pénalité : cette méthode est faite à l'aide d'une fonction. Pour l'appliquer, il faut d'abord savoir choisir sa valeur convenable pour donner la meilleure solution (région faisable) dans l'espace de recherche, sans violer les contraintes.

2. Hybride : c'est faire la combinaison entre deux méthodes parmi eux combiner un algorithme génétique ainsi que d'autres techniques de l'optimisation numérique et l'intelligence artificielle, le processus d'évolution est fait en deux étapes :

- Le rassemblement des solutions réalisable ou pris-réalisable.
- La réalisation de la faisabilité se faire par la fonction de Lagrangien.

D'autres, ils ont remplacé la fonction de pénalité (utiliser dans la méthode de pénalité) par la fonction de Lagrangien.

3. Méthode basée sur la faisabilité des solutions : cette méthode est basée sur la réparation des solutions irréalisables. Les problèmes aux simples contraintes peuvent être réparés facilement. Contrairement aux problèmes complexes la réparation se fait sur la base d'une cartographie homomorphe proposée par Koziel et Michaelwicz qui sert à transformer la région réalisable d'origine du problème en un cube dimensionnel.

II.5 Méthodes de résolution

Les méthodes de résolution servent à trouver les solutions pour les problèmes d'optimisation déjà cités dans la section précédente.

La figure II.3 présente la classification des méthodes d'optimisation.

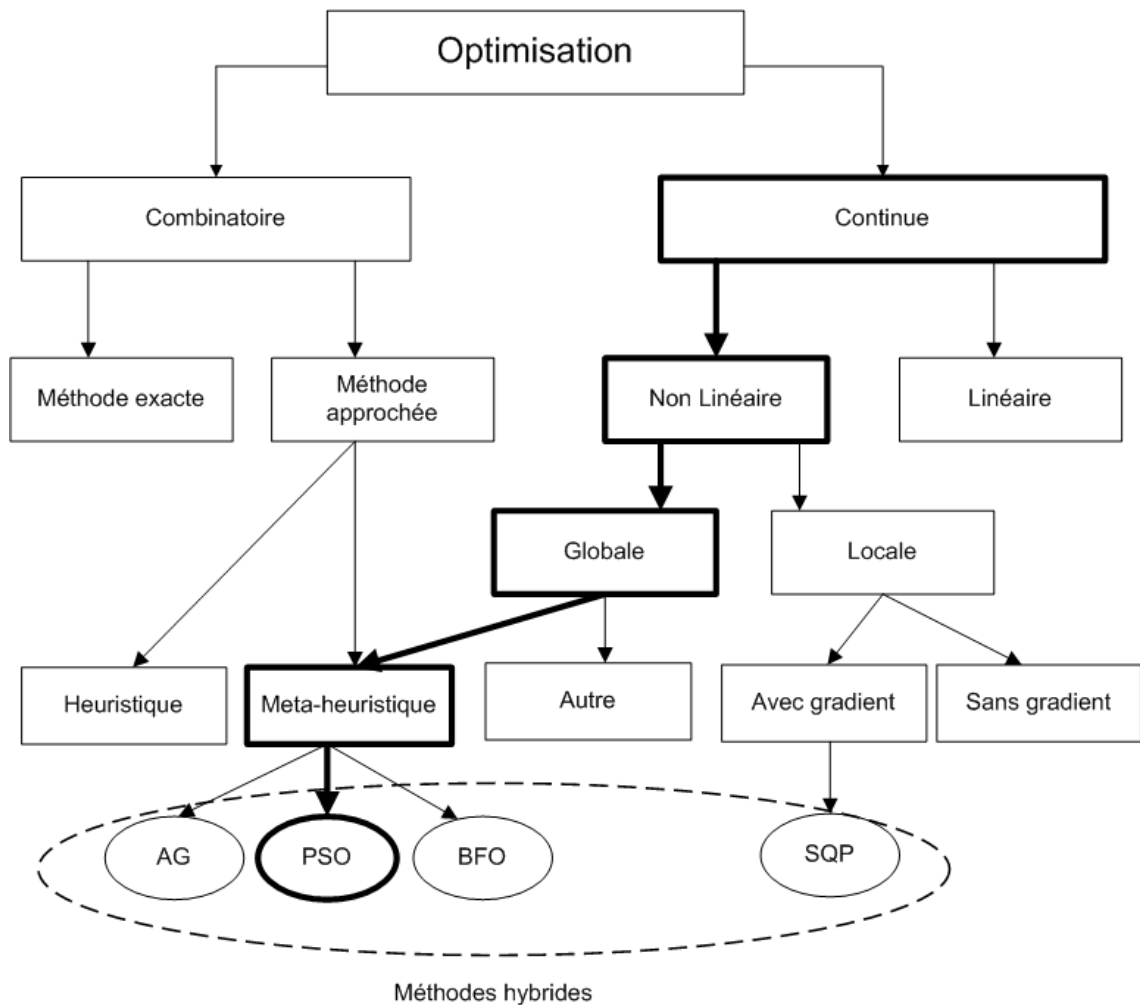


Figure II.4 : Méthodes de résolution de l'optimisation [31].

La résolution des problèmes d'optimisation est difficile et approximative. Pour cela, l'application des méthodes (méthodes étudiées) plus précises est nécessaire. Ces méthodes sont utilisées pour obtenir les optimaux locaux les plus convenables pour le problème étudié. Ils peuvent être subdivisés en deux catégories : heuristique et méta-heuristique.

II.5.1 Heuristiques

C'est un algorithme (algorithme déterministe) qui donne rapidement une solution réalisable, mais pas forcément optimale. Elle résout les problèmes combinatoires particuliers en suivant sa propre structure [26].

Dans ce mémoire, on va se focaliser sur les méthodes méta-heuristiques. Pour cette catégorie, il existe deux variations des méta-heuristiques : à solution unique, et à population de solution.

- La solution unique est basée sur les méthodes suivantes : méthode de descente, le recuit simulé (Les méthodes d'acceptation avec seuil), la méthode de recherche avec tabous, la méthode GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), la recherche à voisinage variable, et la recherche locale itérée [26].
- La population de solution est similaire à notre travail, donc on l'expliquera dans la section suivante.

II.5.2 Méta-heuristiques

La méta-heuristique est une méthode d'optimisation devenue très populaire ces dernières années. Ces techniques ont été inspirées par un concept de simplicité lié généralement à des phénomènes physiques [27], [33].

La résolution dans cette catégorie est faite par les algorithmes évolutionnaires et les algorithmes de l'intelligence en essaim, qui sont inspirés de la nature. La solution s'améliore au fur des itérations [31].

La plupart des algorithmes de nos jours sont des algorithmes bio-inspirés car la nature présente beaucoup d'avantages.

II.5.2.1 Algorithmes bio-inspirés

Ce sont des algorithmes inspirés de la nature. Cette catégorie englobe les algorithmes génétiques, les stratégies d'évolution, la programmation évolutive, et la programmation génétique. Pour obtenir un optimum global, les chercheurs ont utilisé les algorithmes génétiques. En utilisant les principes d'évolution et d'hérédité. Cette évolution est faite par les opérations suivantes : sélection, croisement, et mutation.

- Sélection : c'est-à-dire sélectionner les individus qui peuvent se reproduire le plus. Les techniques utilisées dans cette opération sont : la sélection par tirage à la roulette, la sélection par tournoi, la sélection par rang...etc.
- Croisement : c'est la combinaison des caractéristiques des parents pour générer des nouveaux individus (enfants). Il existe plusieurs façons de croisement e.g le croisement en un point, le croisement en n-points ($n \geq 2$) et le croisement uniforme.
- Mutation : une modification aléatoire d'une partie du génotype.

- Remplacement : c'est faire remplacer des individus par d'autres qui sont meilleurs tout en respectant la taille de population qui était au début de l'itération.

Ceci est introduit par le codage binaire ou le codage réel [26].

II.5.2.2 Quelques algorithmes bio-inspirés

il existe de nombreux algorithmes bio-inspirés. Dans ce travail, on va citer quatre exemples.

1. Algorithme par essaim de particules (PSO)

Les algorithmes en essaim sont inspirés de la nature, plus précisément des états biologiques caractérisés. Par exemple les animaux (les fourmis, les oiseaux,...etc), les cellules immunitaires...etc, qui exercent une interaction les uns avec les autres et leur environnement. Cette catégorie est caractérisée par le travail de groupe des individus [31]. On prend le PSO comme exemple afin de savoir le principe de son fonctionnement ainsi que son pseudo code, Essaim de particules (Particle Swarm Optimization PSO en anglais). Il a été développé en 1995 par Kennedy et Eberhart [34], l'algorithme fait partis des méthodes d'optimisation stochastique, inspiré des actions d'animaux qui vivent en essaim, exp : poissons et oiseaux à la recherche des meilleures régions de nourriture. Chaque individu garde la mémoire personnelle de son expérience ainsi que toutes les informations fournies par son groupe [26]. Cet individus est appelé particule i , il est caractérisé par :

- Vecteur de la vitesse : $v_i(t)$.
- Vecteur de la position : $x_i(t)$.

Cette méthode est bien adaptée pour la résolution des problèmes non linéaire et non convexe. Récemment les constructeurs l'ont utilisé dans la conception des systèmes automobiles [34].

Le pseudo code de cet algorithme peut s'écrire comme suit :

Algorithme 1 : Pseudo code de PSO [34] :

```

Initialisation aléatoire de tout l'essaim ;
Répéter
Évaluer  $f(x_i)$  ;
Pour chaque particule  $i$  faire
Mettre à jour les vitesses ;
Déplacez vers la nouvelle position ;
Si  $f(x_i) < f(p \text{ meilleur } i)$  alors  $p \text{ meilleur}_i = x_i$  ;
Si  $f(x_i) < f(g \text{ meilleur})$  alors  $g \text{ meilleur} = x_i$  ;
Mise à jour  $(x_i, v_i)$ ;
Fin pour
Mise à jour Jusqu'au critère d'arrêt
    
```

2. Optimisateur par loups gris (GWO)

L'optimisation des loups gris (en anglais Greys Wolf Optimizer GWO) a été proposée par Mirjalili et al en 2014. Cet algorithme est inspiré à partir de la stratégie de la chasse des loups gris. Le processus de GWO est simulé à l'hiérarchie des dirigeants. Dans la meute des loups, le chef peut être mâle ou femelle qui est appelé Alpha (α), les sous chefs sont les Bêtas (β). La tâche du loup Bêta est d'aider les chefs (Alpha) à prendre des décisions. Si les loups alpha meurent ou vieillissent, les bêtas vont les remplacer (pour prendre les décisions). Les derniers loups dans la classification hiérarchique sont appelés Oméga (ω). Ces derniers ne peuvent manger sans autorisation des chefs. Les autres loups nommés les subordonnés ou Delta(δ) sont classés les 3ème dans l'hiérarchie des loups [35].

Le GWO est décrit dans les étapes suivantes [35] :

Etape 1 : Introduire les paramètres des agents (G_s), les vecteurs a , A , et C ainsi que le nombre d'itération.

$$\vec{A} = 2 \vec{a} \cdot rand_1 - \vec{a} \quad (II.11)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot rand_2 \quad (II.12)$$

Où $\vec{a}$ varie de 2 à 0 selon le déroulement des itérations.

Etape 2 : Générer les loups aléatoirement.

Etape 3 : Estimer la valeur de mise en forme des agents.

Etape 4 : Trouver le meilleur agent de recherche (G_α), (G_β), et (G_δ).

Etape 5 : Renouveler la position de l'agent de recherche.

Etape 6 : Estimer la meilleure valeur de tous les agents.

Etape 7 : Mise à jour de G_α , G_β , et G_δ .

Etape 8 : Si les itérations sont terminées il affiche les résultats, si non il répète à partir de l'étape 5.

Le pseudo code de cet algorithme peut s'écrire comme suit :

Algorithme 2 : Pseudo code de GWO [36] :

```
Initialiser la population des loups gris ;
Initialiser  $a$ ,  $A$ , et  $C$  ;
Calculer l'aptitude de chaque agent de recherche ;
 $X_\alpha$ = le meilleur agent de recherche ;
 $X_\beta$ =le deuxième meilleur agent de recherche ;
 $X_\delta$ =le troisième meilleur agent de recherche ;
Tant que ( $t < \text{nombre max d'itérations}$ ) ;
    Pour chaque agent de recherche
        Mettre à jour la position de l'agent de recherche actuel ;
    Fin pour
Mettre à jour  $a$ ,  $A$ , et  $C$  ;
    Calculer l'aptitude de tous les agents de recherche ;
    Mettre à jour  $X_\alpha$ ,  $X_\beta$ , et  $X_\delta$  ;
     $t=t+1$ 
Fin tant que
Retour  $X_\alpha$  ;
```

3. Optimisation par l'algorithme de coucou (COA) et (CS)

L'algorithme a été développé par Yang et Deb en 2009, et aussi par Rjabioun en 2011. En anglais est nommé (Cuckoo Optimization Algorithm). Cette méthode est inspirée de la vie d'une famille des coucous. Ces oiseaux posent leurs œufs dans des nids des autres oiseaux car ils ne construisent jamais leurs propres nids. Ces derniers ont la capacité de

mimer les motifs et la couleur des œufs des espèces parasitées. Ils seront détruits s'ils sont reconnus. Après l'éclosion des poussins, certains meurent à cause du manque de nourriture (la faim ou leur besoin de manger plus les parasités). Lorsque les poussins deviennent matures, ils se dirigent vers le meilleur habitat. Le COA cherche les solutions optimales telles que la recherche des coucous a leur meilleur habitat [37].

Le COA est défini par l'habitat qui présente l'ensemble de solutions potentielles :

$$\text{Habitat} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (\text{II.13})$$

L'œuf est posé à une distance (ELR) :

$$ELR = \alpha \times \frac{\text{Nombre des oeufs du coucou actuels}}{\text{Nombre total des oeufs}} \times (\text{var}_{haut} - \text{var}_{bas}) \quad (\text{II.14})$$

où α est un entier introduit pour traiter la valeur de ELR, var_{haut} est la limite supérieure, var_{bas} est la limite inférieure.

Le pseudo code de COA est défini comme suit :

Algorithme 3 : Pseudo code de COA [37] :

Début

Initialisation ;

Pour Itéra= Itér_{coucou} **faire**

Calculez le ELR pour chaque coucou;

Détruire des œufs;

Évaluer l'habitat ;

Limiter le nombre de coucous;

Appliquez le regroupement et la migration de K-means,

Fin pour ;

Répétez les étapes jusqu'à ce que la condition de terminaison soit atteinte.

4. Optimisation par colonies de fourmis (ACO)

Cet algorithme est apparu en 1992 est développé par Dorigo. Il est inspiré du mode de vie des fourmis. Les fourmis vivent dans une colonie. Cependant, lors de leur déplacement à travers la nourriture, les fourmis utilisent des phéromones afin de

détecter et mémoriser le chemin. Une concentration élevée sert à connaître l'odeur laissée sur la trajectoire [37].

Algorithme 4 : Pseudo code d'ACO [37] :

Initialiser les traces de phéromones;

Répéter ;

Pour chaque fourmi **faire**

 Construction de la solution en utilisant la piste de phéromone;

 Mettez à jour les pistes de phéromone:

 Évaporation;

 Renforcement;

Mise à jour jusqu'au critère d'arrêt

Résultat : La meilleure solution trouvée ou un ensemble de solutions.

Il existe de nombreux d'algorithmes de l'intelligence artificielle, pour les citer tous, il nous faudra un mémoire complet. Dans ce travail, on résume quelques algorithmes ainsi que leurs inspirations dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Quelques algorithmes de l'intelligence artificielle.

Algorithme	Référence	Inventeur	Inspiration
FFA	[38]	XS Yang (2008)	Inspiré du comportement social des lucioles dans la nature.
FPA	[39]	Yang (2012)	Mécanismes de pollinisation des fleurs.
APO	[40]	Cui et Cai (2013)	Phénomène croissant d'une plante.
BFO	[40]	Dasgupta et al (2009)	Alimentation bactérienne.
SFLA	[41]	Eusuff et Lansey (2003)	Saute des grenouilles.
BA	[40]	Yang et He (2013)	Bactéries.

Les algorithmes utilisés dans ce mémoire (GWO et PSO) ont été appliqués dans de nombreux domaines industriels. Le tableau II.2 donne quelques domaines.

Tableau II.2 : Domaine d'application de GWO et PSO.

	Réf	Application
PSO	[42]	Paramètres d'usinage
	[43]	Conception mécanique (structure aéronautique)
	[44]	Robotique/médecine
	[45]	Fiabilité
GWO	[46]	Domaine d'environnement
	[47]	automatique
	[48]	Régulation
	[49]	Photovoltaïque

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les différents types d'optimisation ainsi que les méthodes de résolution (algorithme génétique, intelligence par essaim des particules, etc.) ont été présentés. L'optimisation est le refuge le plus agréable pour la conception des systèmes mécatroniques et aussi des pièces. Dans le chapitre qui suit, nous allons traiter deux problèmes d'optimisation en automobile à l'aide des algorithmes bio-inspirés déjà mentionnés.

Chapitre III

Optimisation des systèmes de sécurité automobile

III.1 Introduction

Comme on a déjà vu dans le premier chapitre et vu l'importance de la sécurité automobile, nous allons traiter deux applications de l'optimisation : un système de freinage automobile et un système de sécurité latérale (porte de voiture), afin d'avoir un véhicule plus sécurisé.

III.2 Optimisation d'un système de freinage automobile

Le problème d'optimisation considéré dans cette première application est un système de freinage (voir figure III.1) [17]. Ce dernier est un problème multi-objectif dont le but est de minimiser la masse de ce système, le temps d'arrêt et la force d'engagement.

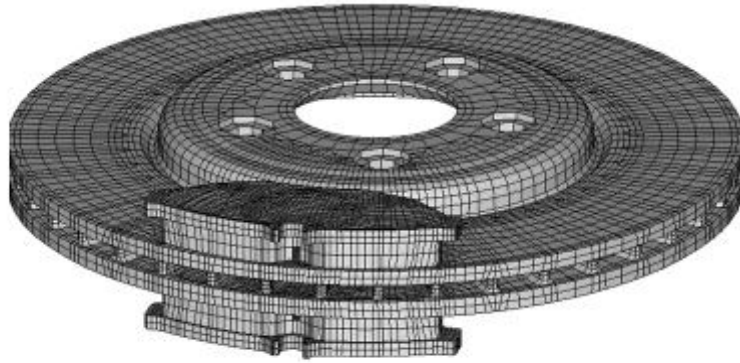


Figure III.1 : Disque de frein [17].

Ces trois objectifs sont présentés en trois fonctions à minimiser [21], [50] :

Masse du système en kg :

$$f_1(x) = 4.9 \times 10^{-5} (x_2^2 - x_1^2)(x_4 - 1) \quad (\text{III.1})$$

Temps d'arrêt en s :

$$f_2(x) = \frac{9.82 \times 10^6 (x_2^2 - x_1^2)}{x_3 x_4 (x_2^3 - x_1^3)} \quad (\text{III.2})$$

Force d'engagement en N :

$$f_3(x) = x_3 \quad (\text{III.3})$$

Les variables de décision de ce problème (x_1 , x_2 et x_3) sont des réelles, sauf x_4 qui est discrète, où :

- x_1 : rayon du disque intérieur des disques, en mm.
- x_2 : rayon extérieur des disques, en mm.
- x_3 : force d'engagement, en N.
- x_4 : nombre de surfaces de friction.

Afin de résoudre le problème, on a utilisé la méthode des sommes pondérées en considérant deux scénarios au niveau du poids [29]. Ceci est de faire inclure les trois objectifs dans un seul, par l'équation suivante :

$$z = w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3 \quad (\text{III.4})$$

où z est la fonction objectif globale, w_1 , w_2 et w_3 sont les poids des objectifs, f_1 , f_2 et f_3 sont les fonctions objectifs.

Le problème est relativement difficile car il contient des variables mixtes (réelles et entières), ainsi que des contraintes :

Limites des variables

$$55 \leq x_1 \leq 80 \quad \text{en mm} \quad (\text{III.5})$$

$$75 \leq x_2 \leq 110 \quad \text{en mm} \quad (\text{III.6})$$

$$1000 \leq x_3 \leq 3000 \quad \text{en N} \quad (\text{III.7})$$

$$2 \leq x_4 \leq 20 \quad (\text{III.8})$$

Contraintes géométriques

Distance minimale entre le rayon :

$$g_1(x) \equiv (x_2 - x_1) - 20 \geq 0 \quad (\text{III.9})$$

Longueur maximale du frein :

$$g_2(x) \equiv 30 - 2.5(x_4 + 1) \geq 0 \quad (\text{III.10})$$

Contraintes de comportement

Contrainte de pression :

$$g_3(x) \equiv 0.4 - \frac{x_3}{3.14(x_2^2 - x_1^2)} \geq 0 \quad (\text{III.11})$$

Contrainte température :

$$g_4(x) \equiv 1 - \frac{2.66 \times 10^{-3} x_3 (x_2^3 - x_1^3)}{(x_2^2 - x_1^2)^2} \geq 0 \quad (\text{III.12})$$

Contrainte de couple générée :

$$g_5(x) \equiv \frac{2.66 \times 10^{-2} x_3 x_4 (x_1^3 - x_2^3)}{(x_2^2 - x_1^2)} - 900 \geq 0 \quad (\text{III.13})$$

Le tableau III.1 résume ce problème :

Tableau III.1 : Résumé de problème d'optimisation du système de freinage automobile.

Nombre de variables	Nature	Fonctions objectifs	Nombre de contraintes	Nature
4	Réelle Entière	3	9	Inégalité

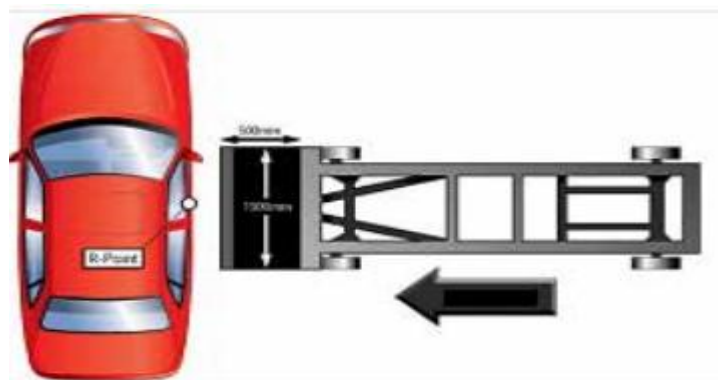
III.3 Optimisation du système de sécurité latérale

Figure III.2 : Schéma de test de la barrière [51].

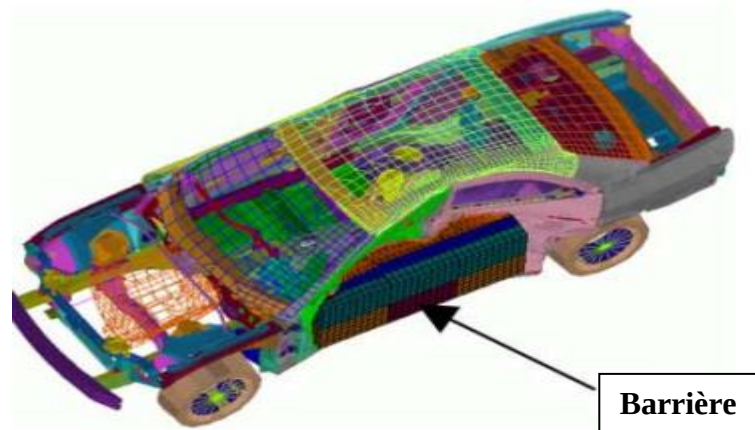


Figure III.3 : Modèle d'impact latéral du véhicule [46].

Le deuxième problème d'optimisation étudié dans cette section est le système de sécurité latérale (voir figures III.2 et III.3). L'objectif est de réduire la masse de la porte de l'automobile tout en respectant la sécurité. Le problème est mono-objectif qui utilise 11 variables décrites comme suit [52], [53] :

- x_1 : Épaisseur de la barre B
- x_2 : Épaisseur de la barre B du renforcement
- x_3 : Épaisseur du côté intérieur du sol
- x_4 : Épaisseur des membres de croix
- x_5 : Épaisseur du faisceau de porte
- x_6 : Épaisseur du renforcement de la ligne de ceinture de porte
- x_7 : Épaisseur du rail de toit
- x_8 : Matériau de l'intérieur de la barre B
- x_9 : Matériau du plancher intérieur
- x_{10} : Hauteur de la barre
- x_{11} : Barrière en position de frappe

La fonction objectif de minimisation est :

$$\text{Min } f(x) = 1.98 + 4.90x_1 + 6.67x_2 + 6.98x_3 + 4.01x_4 + 1.78x_5 + 2.73x_7 \quad (\text{III.14})$$

Le problème est sous les contraintes suivantes :

Limites des variables

Toutes les variables d'épaisseur sont continues. Les variables x_8 et x_9 sont des variables relatives aux matériaux utilisés (acier doux et acier dur) sont prises dans un ensemble (ensemble des variables entières), ce qui rend le problème encore plus difficile. Ceci nécessite la maîtrise de ces variables et la maîtrise des contraintes.

$$0.5 \leq x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7 \leq 1.5 \quad (\text{III.15})$$

$$x_8, x_9 \in \{0.192, 0.345\} \quad (\text{III.16})$$

$$-30 \leq x_{10}, x_{11} \leq 30 \quad (\text{III.17})$$

Autres contraintes

$$g_1(x) = F_a \leq 1 \quad \text{en KN} \quad (\text{III.18})$$

$$g_2(x) = VC_u \leq 0.32 \quad \text{en m/s} \quad (\text{III.19})$$

$$g_3(x) = VC_m \leq 0.32 \quad \text{en m/s} \quad (\text{III.20})$$

$$g_4(x) = VC_l \leq 0.32 \quad \text{en mm} \quad (\text{III.21})$$

$$g_5(x) = \Delta_{ur} \leq 32 \quad \text{en mm} \quad (\text{III.22})$$

$$g_6(x) = \Delta_{mr} \leq 32 \quad \text{en mm} \quad (\text{III.23})$$

$$g_7(x) = \Delta_k \leq 32 \quad (\text{III.24})$$

$$g_8(x) = F_p \leq 4 \quad \text{en KN} \quad (\text{III.25})$$

$$g_9(x) = V_{MBP} \leq 9.9 \quad \text{en mm/ms} \quad (\text{III.26})$$

$$g_{10}(x) = V_{FD} \leq 15.7 \quad \text{en mm/ms} \quad (\text{III.27})$$

Avec :

$$F_a = 1.16 - 0.003717x_2x_4 - 0.00931x_2x_{10} - 0.484x_3x_9 + 0.01343x_6x_{10} \quad (\text{III.28})$$

$$VC_u = 0.261 - 0.0159x_1x_2 - 0.188x_1x_8 - 0.019x_2x_7 + 0.0144x_3x_5 + 0.0008757x_5x_{10} + 0.08045x_6x_9 + 0.00139x_8x_{11} + 0.00001575x_{10}x_{11} \quad (\text{III.29})$$

$$VC_m = 0.214 + 0.00817x_5 - 0.131x_1x_8 - 0.0704x_1x_9 + 0.03099x_2x_6 - 0.018x_2x_7 + 0.0208x_3x_8 + 0.121x_3x_9 - 0.00364x_5x_6 + 0.0007715x_5x_{10} - 0.0005354x_6x_{10} + 0.00121x_8x_{11} \quad (\text{III.30})$$

$$VC_l = 0.74 - 0.61x_2 - 0.163x_3x_8 + 0.001232x_3x_{10} - 0.166x_7x_9 + 0.227x_2^2 \quad (\text{III.31})$$

$$\Delta_{ur} = 28.98 + 3.818x_3 - 4.2x_1x_2 + 0.0207x_5x_{10} + 6.63x_6x_9 - 7.7x_7x_8 + 0.32x_9x_{10} \quad (\text{III.32})$$

$$\Delta_{mr} = 33.86 + 2.95x_3 + 0.1792x_{10} - 5.057x_1x_2 - 11.0x_2x_8 - 0.0215x_5x_{10} - 9.98x_7x_8 + 22.0x_8x_9 \quad (\text{III.33})$$

$$\Delta_{lr} = 46.36 - 9.9x_2 - 12.9x_1x_8 + 0.1107x_3x_0 \quad (\text{III.34})$$

$$F_p = 4.72 - 0.5x_4 - 0.19x_2x_3 - 0.0122x_4x_{10} + 0.09325x_6x_{10} + 0.000191x_{11}^2 \quad (\text{III.35})$$

$$V_{MBP} = 10.58 - 0.674x_1x_2 - 1.95x_2x_8 + 0.02054x_3x_{10} - 0.0198x_4x_{10} + 0.028x_6x_{10} \quad (\text{III.36})$$

$$V_{FD} = 16.45 - 0.489x_3x_7 - 0.843x_5x_6 + 0.0432x_9x_{10} - 0.0556x_9x_{11} - 0.000786x_{11}^2 \quad (\text{III.37})$$

Le tableau III.2 résume ce problème.

Tableau III.2 : Résumé du problème d'optimisation du système de freinage automobile.

Nombre de variables	Nature	Fonctions objectif	Nombre de contraintes	Nature
11	Réelle	1	21	Inégalité

III.4 Solutions proposées

Afin de résoudre les problèmes d'optimisation de ces applications, on utilise deux algorithmes bio-inspirés (déjà mentionnés dans le chapitre II), Grey Wolf Optimiser (GWO) et Partical Swarm Optimization (PSO) dont le but est de les implémenter aux problèmes et de faire une comparaison entre les résultats.

Le premier et le deuxième algorithme représentent les pseudos codes de PSO et GWO, où N_{pop} est la taille des particules et N_{it} est le nombre d'itération.

III.4.1 Particle swarm optimization (PSO)

Introduction des paramètres : N_{pop} , N_{it}

Générer aléatoirement les particules

Tant que $N \leq N_{it}$ **faire**

Evaluation de la fonction objectif : Eq. (III.4) ou (III.15) ;

Maîtrise des contraintes ;

Vitesse de chaque particule ;

Vitesse de la meilleure particule ;

Mise à jour des positions des particules ;

Fin Tant que

Affichage des résultats

La figure III.4 présente les principales opérations du code PSO implémenté.

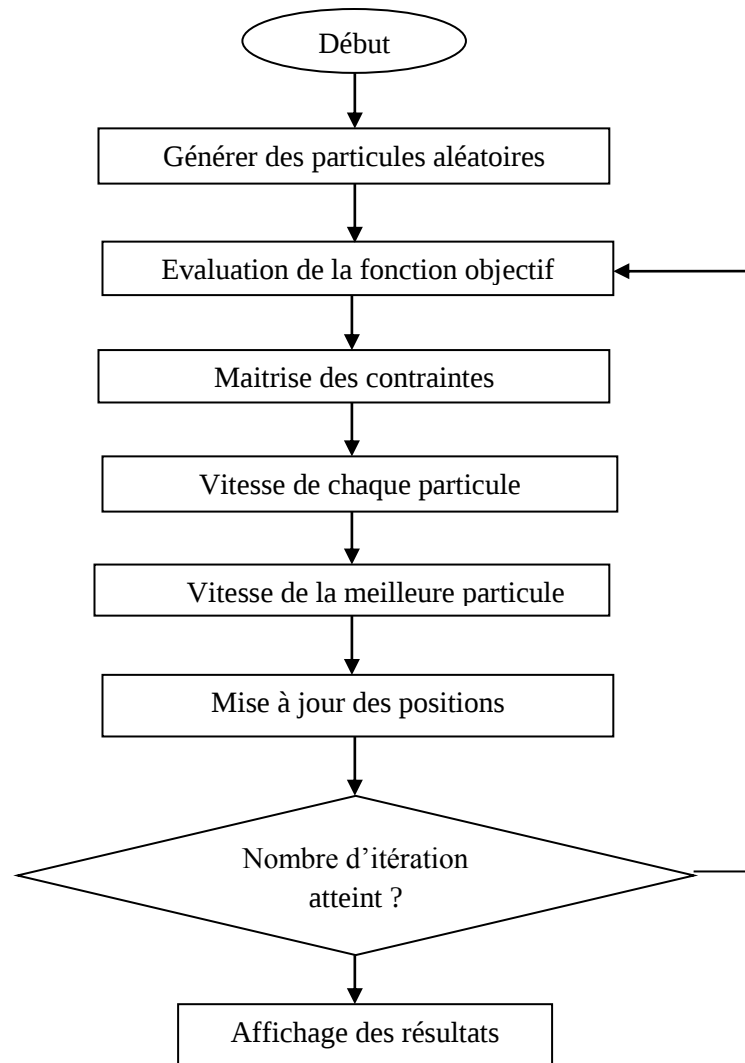


Figure III.4 : Organigramme du PSO implémenté.

III.4.2 Grey wolf optimizer (GWO)

Introduction des paramètres: N_{pop} , N_{it}

Générer les agents aléatoirement ;

Tant que $1 \leq N_{it}$ **faire**

Evaluation de fonction objective : Eq.(III.4) ou (III.15) ;

Maitrise des contraintes ;

Pour $j=1$: taille (position, 1)

Renvoie les agents qui dépassent les limites de l'espace de recherche

Estimer la valeur de remise en forme de chaque agent de chasse (alpha, beta, delta) ;

Calculer la fonction d'objectif pour chaque agent de recherche

Donner les relations de r_1 , A_1 , C_2 , A_3 , C_3 , X_1 , X_2 , X_3 ;

Position (i , j) = $(X_1 + X_2 + X_3)/3$

Fin Tant que

Affichage des résultats ;

La figure III.5 présente l'organigramme du GWO implémenté :

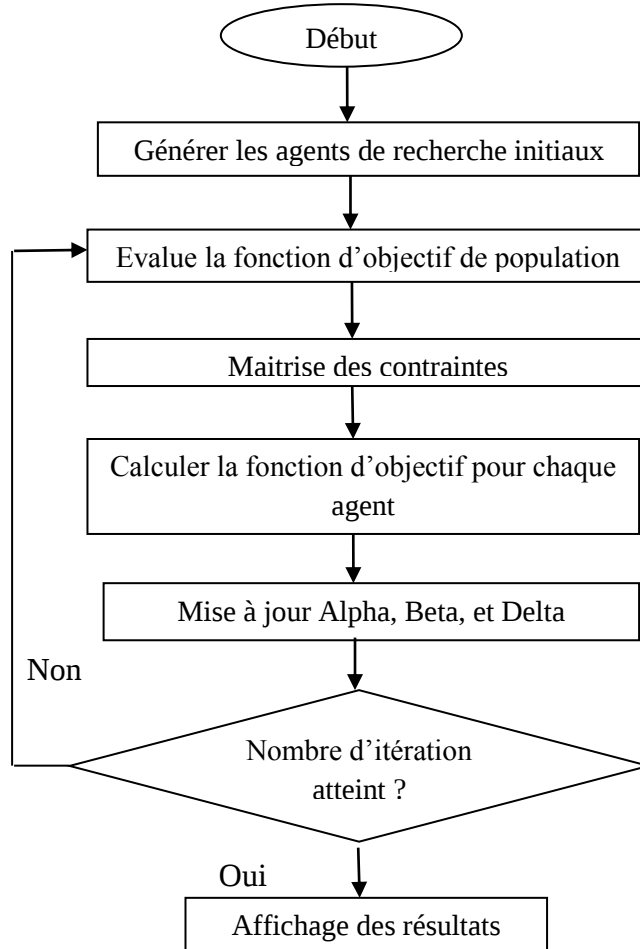


Figure III.5 : Organigramme du GWO implémenté.

III.5 Résultats et commentaires

Les deux algorithmes cités précédemment ont été implémentés sous MATLAB R2017a et exécutés sur un PC avec les caractéristiques suivantes : processeur Intel(R) Core (TM) i5-3230M CPU, 4 Go de RAM avec un système d'exploitation de 64bits version Windows 7.

Les tableaux III.4-III.59 présentent les résultats des deux problèmes obtenus par les deux algorithmes bio-inspirés GWO et PSO déjà mentionné dans la section II.4.2 après 10 exécutions indépendantes. Les valeurs écrites en gras sont les meilleures. Les paramètres d'optimisation utilisés sont présentés dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Paramètres utilisés pour les deux problèmes.

	Problème 1		Problème 2	
	N_{pop}	N_{it}	N_{pop}	N_{it}
Paramètres 1	50	100	50	100
Paramètres 2	100	1000	100	1000

Problème 1 : Optimisation de système de freinage automobile qui contient 2 scénarios.

- Scenario1 : $w_1=w_2=w_3=0,33$.
- Scenario2 : $w_1=0,8$ $w_2=w_3=0,1$.

Problème 2 : Optimisation de système de sécurité latérale.

Les paramètres de performances utilisés sont :

- z : Solution générale
- f_1, f_2, f_3 : Masse de frein, temps d'arrêt, force d'engagement.
- **NFE** : Nombre de fonctions d'évolution.
- **CPU** : Temps consommé en une seule exécution.
- σ : Ecart type.
- x : Variables.
- g : Contraintes.

Scenario 1 (GWO) : Poids des objectif : $w_1=w_2=w_3=0,33$.

Cas 1 : $N_{pop}=50$, $N_{it}=100$.

Tableau III.4 : Résultats de l'optimisation du système de freinage (scenario1, cas 1).

No	f_1 (kg)	f_2 (s)	f_3 (N)	z	NFE	CPU (s)	σ
1	1,765316	6,585518	1000	332,755774	4800	0,117076	2,3775E-04
2	1,767342	6,584363	1000	332,756063	3500	0,037078	
3	1,766431	6,584726	1000	332,755881	4350	0,035688	
4	1,764159	6,585629	1000	332,755430	5000	0,032152	
5	1,766798	6,585241	1000	332,756170	4950	0,073393	
6	1,765425	6,585125	1000	332,755682	4750	0,072339	
7	1,766505	6,584696	1000	332,755896	4950	0,043173	
8	1,768602	6,583862	1000	332,756313	4950	0,043442	
9	1,766185	6,584823	1000	332,755833	4950	0,034835	
10	1,766068	6,584870	1000	332,755809	4650	0,046245	

Tableau III.5 : Résultats des variables (cas 1).

No	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (s)	x_4
1	79,994612	100,009123	1000	11
2	80	100,034106	1000	11
3	80	100,024806	1000	11
4	80	100,001627	1000	11
5	79,989781	100,020381	1000	11
6	80	100,014549	1000	11
7	80	100,025568	1000	11
8	80	100,046950	1000	11
9	80	100,022296	1000	11
10	80	100,021102	1000	11

Tableau III.6 : Résultats des contraintes (cas 1).

No	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	0,014510	0	0,311601	0,916467	38764,60
2	0,034105	0	0,311703	0,916548	38771,56
3	0,024805	0	0,311657	0,916510	38769,38
4	0,001626	0	0,311543	0,916414	38763,93
5	0,030600	0	0,311675	0,916534	38766,27
6	0,014549	0	0,311607	0,916467	38766,97
7	0,025568	0	0,311661	0,916513	38769,55
8	0,046949	0	0,311765	0,916601	38774,58
9	0,022295	0	0,311645	0,916499	38768,79
10	0,021101	0	0,311639	0,916494	38768,51

On peut constater à partir des tableaux III.4-6 que la meilleure solution est ($z=332,755430$) avec une consommation de temps ($0,032152s$), où le $NFE=5000$, et $\sigma=2,3775e-04$.

Tableau III.7 : Classification de solution (cas 1).

Mauvaise z	Meilleure z	Moyenne de z
332,756313	332,755430	332,755885

Le tableau III.3 présente trois valeurs, la mauvaise solution ($z=332,756313$), la meilleure ($z=332,755430$) et la moyenne de toutes les solutions après 10 exécutions ($z= 332,755885$).

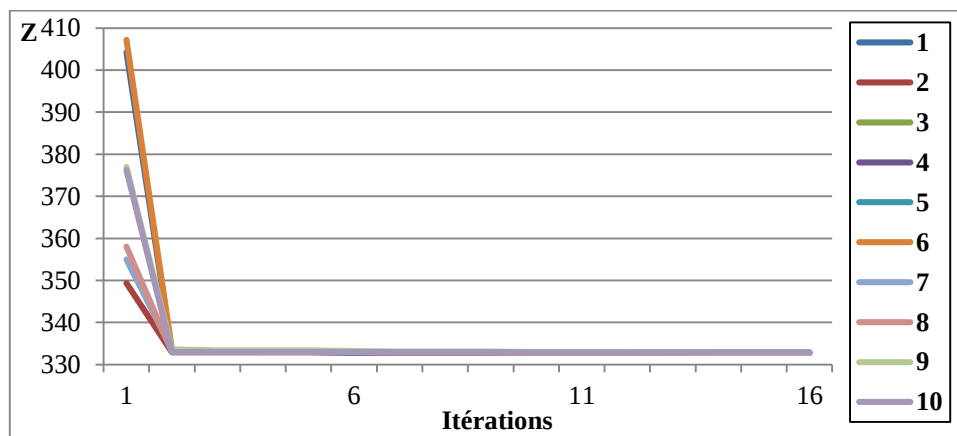


Figure III.6 : Graphe des solutions (cas 1, scénario 1).

La figure III.6 présente les courbes des solutions. On remarque que toutes les courbes renoncent jusqu'à la meilleure solution, puis se stabilisent à cette valeur là.

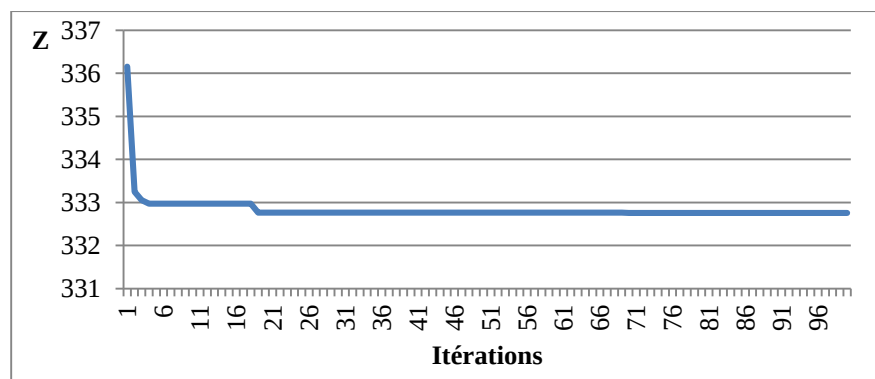


Figure III.7 : Graphe de la meilleure solution (cas 1, scénario 1).

A partir du graphe de la meilleure solution, on remarque que la courbe descend puis se stabilise à la meilleure solution ($z=332,755430$).

Cas 2 : $N_{pop}=100$, $N_{it}=1000$.

Tableau III.8 : Résultats de l'optimisation du système de freinage (scenario 1, cas 2).

No	f_1 (kg)	f_2 (s)	f_3 (N)	z	NFE	CPU (s)	σ
1	1,764257	6,585590	1000	332,755449	94000	0,913927	1,7658E-05
2	1,764281	6,585580	1000	332,755454	96100	0,610700	
3	1,764278	6,585582	1000	332,755454	89400	0,575412	
4	1,764126	6,58620	1000	332,755416	68600	0,591999	
5	1,764067	6,585666	1000	332,755412	99900	0,576005	
6	1,764154	6,585631	1000	332,755429	98300	0,619772	
7	1,764006	6,585690	1000	332,755399	97200	0,594816	
8	1,764160	6,585629	1000	332,755430	99800	0,633241	
9	1,764220	6,585605	1000	332,755442	99800	0,666013	
10	1,764163	6,585627	1000	332,755431	97400	0,606312	

Tableau III.9 : Résultats des variables (cas 2)

No	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (s)	x_4
1	80	100,002513	1000	11
2	80	100,002623	1000	11
3	80	100,002874	1000	11
4	80	100,002844	1000	11
5	80	100,000931	1000	11
6	80	100,000690	1000	11
7	80	100,001575	1000	11
8	80	100,000062	1000	11
8	80	100,001637	1000	11
10	80	100,002245	1000	11

Tableau III.10 : Résultats des contraintes (cas 2).

No	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	0,002623	0	0,311548	0,916418	38764,17
2	0,002874	0	0,311549	0,916419	38764,23
3	0,002843	0	0,311549	0,916419	38764,22
4	9,309e-04	0	0,311540	0,916411	38763,77
5	6,900e-04	0	0,311539	0,916410	38763,71
6	0,001575	0	0,311543	0,916413	38763,92
7	6,249e-05	0	0,311536	0,916407	38763,57
8	0,001637	0	0,311543	0,916414	38763,93
9	0,002245	0	0,311546	0,916416	38764,08
10	0,001670	0	0,311543	0,916414	38763,94

On peut constater à partir des tableaux III.8-10 que la meilleure solution est ($z=332,755399$) avec une consommation de temps (0,594816), où le NFE=97200 et $\sigma=1,7658e-05$ et les contraintes sont respectées.

Tableau III.11 : Classification de solution (cas 2).

Mauvaise z	Meilleure z	Moyenne de z
332,755454	332,755399	332,755431

On constate du tableau III.11 que la meilleure valeur est égale à 332.755399, la mauvaise est égale 332.755454, la moyenne de solution est ($z=332.755431$).

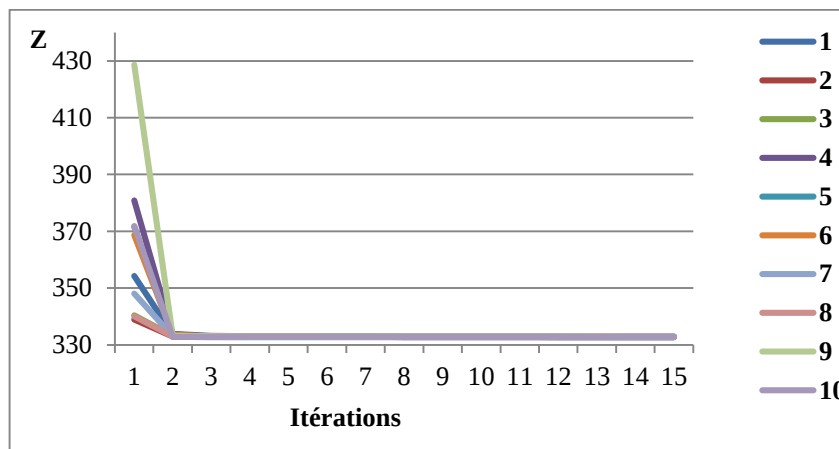


Figure III.8 : Graphe des solutions générales (cas 2, scénario 1).

La figure.III.8 présente les courbes des solutions générales de notre problème pour 10 exécutions indépendantes, on remarque que toutes les courbes convergent jusqu'à la meilleure solution, puis elles se stabilisent à cette valeur.

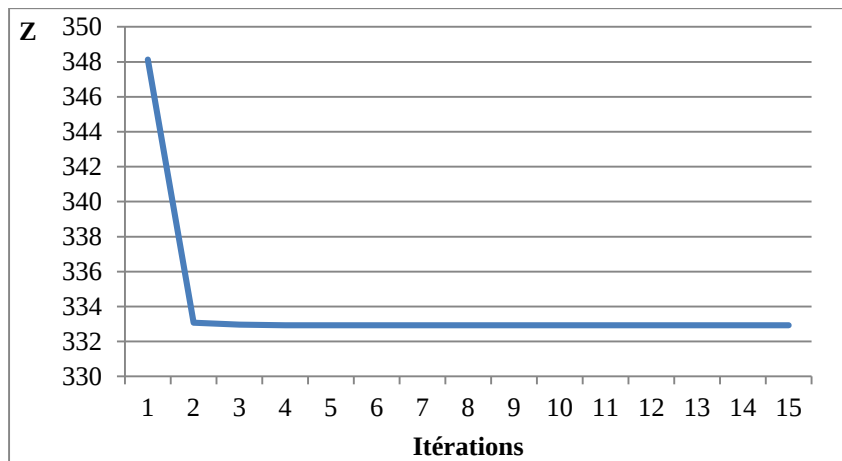


Figure III.9 : Graphe de la meilleure solution (cas 2, scénario 1).

La figure III.9 présente une courbe linéaire de la meilleure solution pendant 100 itérations. Dans ce cas on a pris que 15 itérations comme échantillon car les valeurs sont très proche les unes des l'autres.

Scénario 2 : les poids des objectifs : $w_1=0,8$, $w_2=w_3=0,1$.

Cas 1 : $N_{pop}=50$, $N_{it}=100$.

Tableau III.12 : Résultats de l'optimisation du système de freinage (scenario 2, cas 1).

No	f_1 (kg)	f_2 (s)	f_3 (N)	z	NFE	CPU(s)	σ
1	1,111969	10,198543	1000	101,909429	4950	0,106774	0,0093
2	1,187571	9,633226	1000	101,913379	3950	0,037259	
3	1,392651	9,428098	1000	101,906529	4850	0,075466	
4	1,123545	10,091997	1000	101,908036	5000	0,042230	
5	1,221200	9,309705	1000	101,907930	3500	0,082679	
6	1,178279	9,734018	1000	101,916025	5000	0,038876	
7	1,039631	10,748095	1000	101,906514	4650	0,039310	
8	1,172535	9,775521	1000	101,915580	4100	0,046486	
9	1,060224	10,347045	1000	101,882884	4550	0,035843	
10	1,153954	9,932152	1000	101,916378	4800	0,030954	

Tableau III.13 : Résultats des variables (scénario 2, cas 1)

No	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (s)	x_4
1	60,844444	80,862245	1000	9
2	64,967494	85,148656	1000	9
3	68,157427	88,167208	1000	9
4	61,605588	81,617628	1000	9
5	67,680270	87,726426	1000	9
6	56,749568	76,761634	1000	10
7	65,685858	85,706634	1000	8
8	56,468214	76,468750	1000	10
9	80	100,031028	1000	7
10	55,402048	75,405995	1000	10

Tableau III.14 : Résultats des contraintes (scénario 2, cas 1).

No	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	0,017800	5	0,287730	0,916270	24712,67
2	0,181162	5	0,294877	0,917000	26215,73
3	3,199714	5	0,310357	0,927682	26805,69
4	0,012039	5	0,288886	0,916258	24983,08
5	0,046156	5	0,297772	0,916481	27158,03
6	0,012066	2,5	0,280804	0,916177	25934,95
7	0,020775	7,5	0,294928	0,916351	23403,09
8	5,359e-04	2,5	0,280220	0,916124	25821,02
9	0,031028	10	0,31168	0,916535	24345,08
10	0,003947	2,5	0,278291	0,916117	25399,63

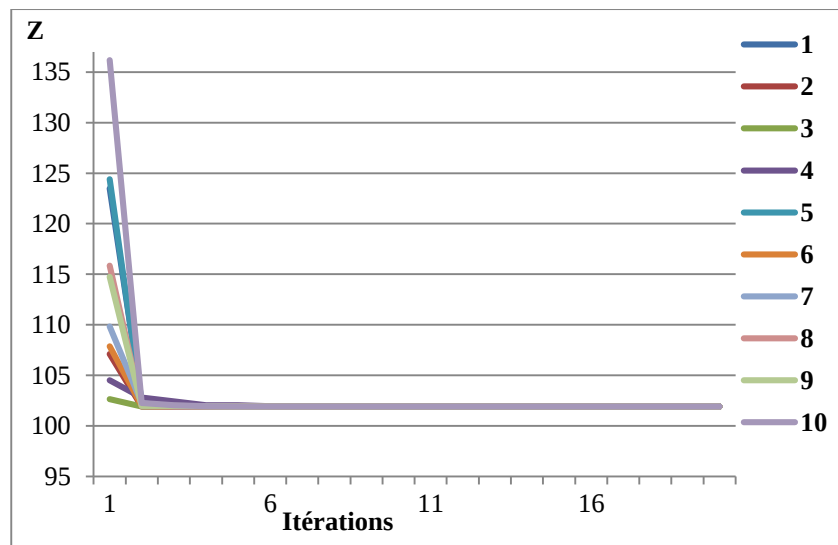
Les tableaux III.11-14 présentent les résultats donnés après 10 exécutions non consécutive. La meilleure solution est ($z=101,916025$), où NFE=5000 avec une consommation de temps de 0.038876 s et

($\sigma=0,0093$).

Tableau III.15 : Classification de solution (cas 1).

Mauvaise de z	Meilleure de z	Moyenne de z
101,916378	101,916025	101,908268

On observe du tableau III.15 trois valeurs : la meilleure solution ($z=101.916025$), la mauvaise ($z=101.916378$), et la moyenne ($z=101.908268$).

**Figure III.10** : Graphe des solutions (cas 1, scénario 2).

La figure III.10 illustre les courbes des résultats pendant 10 répétitions. On a pris les 20 premières itérations comme échantillon car les solutions sont très convergentes afin de pouvoir observer la descente linéaire des valeurs jusqu'à la stabilisation à la meilleure valeur.

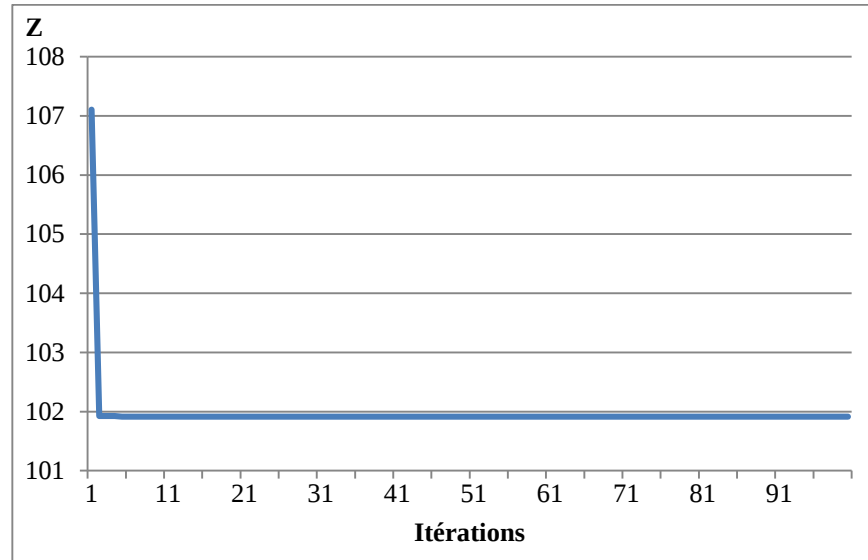


Figure III.11 : Graphe de la meilleure solution (cas 1, scénario 2).

La figure III.11 présente une courbe linéaire de la meilleure solution après 10 exécutions.

Cas2 $N_{pop}=100$, $N_{it}=1000$.

Tableau III.16 : Résultats de l'optimisation du système de freinage (scenario 2, cas 2).

No	f_1 (kg)	f_2 (s)	f_3 (N)	z	NFE	CPU (s)	σ
1	1,058508	10,348832	1000	101,881667	97400	0,767583	2,1241E -05
2	1,058433	10,348911	1000	101,881637	80500	0,604046	
3	1,058442	10,348902	1000	101,881643	91000	0,601015	
4	1,058500	10,348832	1000	101,881690	99800	0,605969	
5	1,05841	10,348928	1000	101,881626	69500	0,573096	
6	1,058460	10,348883	1000	101,881656	98300	0,586060	
7	1,058408	10,34893	1000	101,881620	99800	0,604043	
8	1,058412	10,348932	1000	101,881623	100000	0,608230	
9	1,058420	10,348925	1000	101,881628	99800	0,612280	
10	1,058429	10,348915	1000	101,881634	99900	0,604942	

Tableau III.17 : Résultats des variables (scenario 2, cas 2).

No	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (N)	x_4
1	80	100,001281	1000	7
2	80	100,000569	1000	7
3	80	100,000715	1000	7
4	80	100,001849	1000	7
5	80	100,000283	1000	7
6	80	100,001027	1000	7
7	80	100,000152	1000	7
8	80	100,000217	1000	7
9	80	100,000342	1000	7
10	80	100,000497	1000	7

Tableau III.18 : Résultats des contraintes (scenario 2, cas 2)

No	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	0,001281	10	0,311542	0,916412	24340,63
2	5,689e-04	10	0,311538	0,916409	24340,52
3	7,149e-04	10	0,311539	0,916410	24340,55
4	0,001849	10	0,311544	0,916415	24340,72
5	2,829e-04	10	0,311537	0,916400	24340,48
6	0,001026	10	0,311540	0,916411	24340,59
7	1,519e-04	10	0,311536	0,916408	24340,46
8	2,170e-04	10	0,311536	0,916408	24340,47
9	3,420e-04	10	0,311537	0,916408	24340,49
10	4,96e-04	10	0,311538	0,916409	24340,51

Les tableaux III.15-18 donnent les résultats obtenus du cas 2 (scénario 2). La meilleure solution est ($z=101.881620$) avec une consommation de temps 0.604043s, et NFE=99800.

Tableau III.19 : Classification de solution (scenario 2, cas 2).

Mauvaise de z	Meilleure de z	Moyenne de z
101,881667	101,881620	101,881642

A partir du tableau III.19, la meilleure solution est ($z=101.881620$), la mauvaise est ($z=101.881667$), et la moyenne ($z=101.881642$).

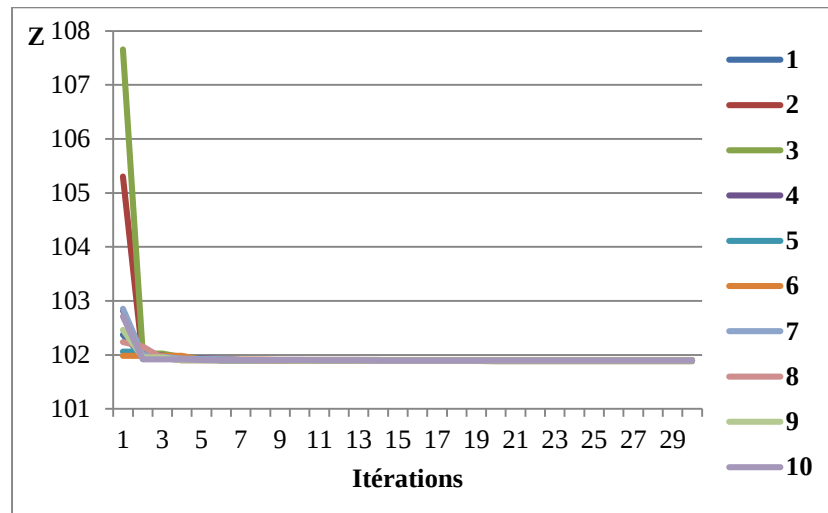


Figure III.12 : Graphe des solutions (cas 2, scénario 2).

La figure III.12 représente les courbes de 10 exécutions. On a pris 30 itérations pour pouvoir observer les variations et les changements de chaque courbe, on remarque que le graphe est linéaire et il converge, jusqu'à la meilleure solution ($z=101,881620$).

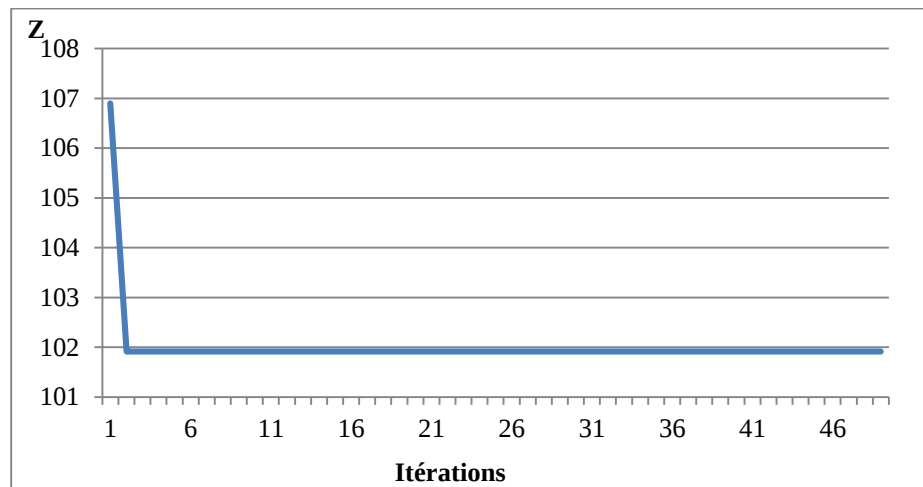


Figure.III.13 : Graphe de la meilleure solution (cas 2, scénario 2).

La courbe de la meilleure solution est présentée dans la figure III.7. On remarque une descente linéaire puis une stabilisation à la valeur minimale.

Algorithme 2 (PSO) :

Scenario 1 : Poids des objectif : $w_1=w_2=w_3=0,33$.

Cas 1 : $N_{pop}=50$, $N_{it}=100$.

Tableau III.20 : Résultats de l'optimisation du système de freinage (scénario 1, cas 1)

No	f_1 (kg)	f_2 (s)	f_3 (N)	z	NFE	CPU (s)	σ
1	1,7640	6,585692	1000	332,755398	3400	0,774240	1,0000E-06
2	1,7640	6,585692	1000	332,755398	4850	0,345190	
3	1,7640	6,585692	1000	332,755399	4015	0,285298	
4	1,7640	6,585692	1000	332,755399	4000	0,284778	
5	1,7640	6,585692	1000	332,755399	3700	0,261965	
6	1,7640	6,585692	1000	332,755399	3100	0,277921	
7	1,7640	6,585692	1000	332,755398	4800	0,382048	
8	1,7640	6,585692	1000	332,755399	4800	0,301704	
9	1,7640	6,585692	1000	332,755400	3750	0,047211	
10	1,7640	6,585692	1000	332,755399	4600	0,278358	

Tableau III.21 : Résultats des variables (scenario 1, cas 1).

No	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (s)	x_4
1	80	100	1000	11
2	80	100	1000	11
3	80	100	1000	11
4	80	100	1000	11
5	80	100	1000	11
6	80	100	1000	11
7	80	100	1000	11
8	80	100	1000	11
9	80	100,0001	1000	11
10	80	100	1000	11

Tableau III.22 : Résultats des contraintes (scenario 1, cas 1).

No	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
2	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
3	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
4	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
5	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
6	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
7	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
8	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
9	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
10	0	0	0,311535	0,916407	38763,55

Les tableaux III.20-22 représentent les solutions obtenue tel que on la valeur minimale égale à ($z=332,755398$). Le choix de la meilleure solution est fait à partir d'un

NFE=3400 avec une consommation de temps de 0,774240s, et un écart type égale à 1,0000E-06.

Tableau III.23 : Classification de solution (scenario1, cas1).

Mauvaise z	Meilleure z	Moyenne de z
332,755400	332,755398	332,755398

Le tableau III.23 donne : la meilleure solution est ($z=332,755398$), la mauvaise est ($z=332,755400$) et la moyenne ($z=332,755398$).

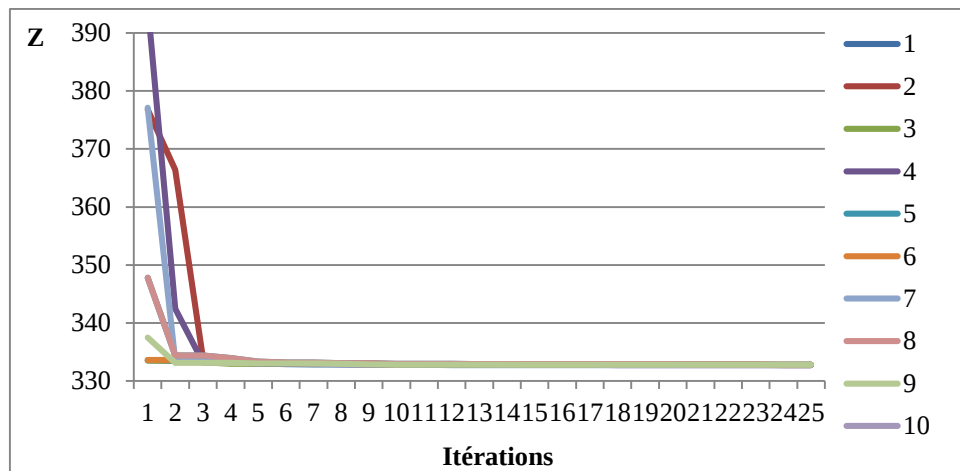


Figure III.14 : Graphe des solutions générales (cas 1, scénario 1).

La figure III.14 présente les courbes des solutions après 10 exécutions indépendantes.

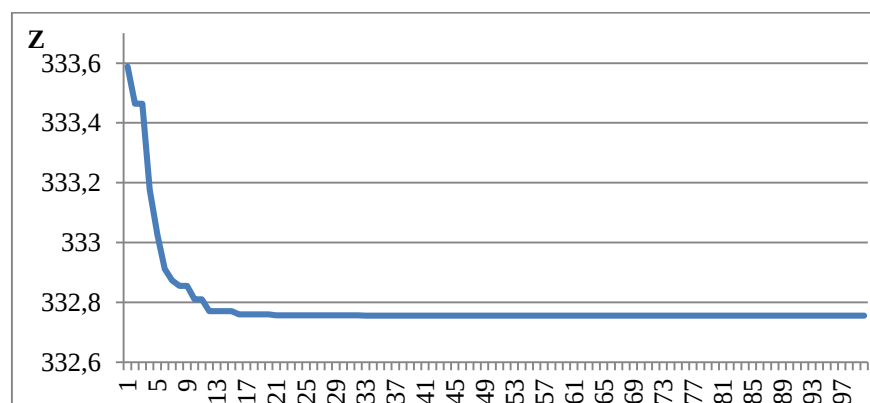


Figure III.15 : Graphe de la meilleure solution (scénario 1, cas 1).

La figure III.15 présente la courbe descendante de la meilleure valeur pendant 10 exécutions indépendantes (on a pris 10 itérations comme échantillon).

Cas 2 : $N_{pop}=100$, $N_{it}=1000$.

Tableau III.24: Résultats de l'optimisation du système de freinage (scénario 1, cas 2).

No	f_1 (kg)	f_2 (s)	f_3 (N)	z	NFE	CPU (s)	σ
1	1,7640	6,585692	1000	332,755398	9800	5,394181	0.7554
2	1,7640	6,585692	1000	332,755398	9200	4,686877	
3	1,7640	6,585692	1000	332,755398	10500	4,505992	
4	1,7640	6,585692	1000	332,755398	10900	4,260622	
5	1,7640	6,585692	1000	332,755398	10800	4,297371	
6	1,7640	6,585692	1000	332,755398	9900	4,228102	
7	1,7640	6,585692	1000	332,755398	9700	4,321510	
8	1,7640	6,585692	1000	332,755398	10400	4,243840	
9	1,7640	6,585692	1000	332,755398	5700	4,412409	
10	1,7640	6,585692	1000	332,755398	10100	4,282758	

Tableau III.25 : Résultats des variables (scenario 1, cas 2).

No	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (s)	x_4
1	80	100	1000	11
2	80	100	1000	11
3	80	100	1000	11
4	80	100	1000	11
5	80	100	1000	11
6	80	100	1000	11
7	80	100	1000	11
8	80	100	1000	11
9	80	100	1000	11
10	80	100	1000	11

Tableau III.26 : Résultats des contraintes (scenario 1, cas 2).

No	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
2	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
0	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
4	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
5	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
6	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
7	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
8	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
9	0	0	0,311535	0,916407	38763,55
10	0	0	0,311535	0,916407	38763,55

Les tableaux III.24-26 présentent les résultats obtenus ou la meilleure solution ($z=332,755398$) celle de NFE=5700 (le plus petit), CPU= 4,412409s, $\sigma=0.7554$.

Tableau III.27 : Classification de solution (scenario 1, cas 2).

Mauvaise z	Meilleure z	Moyenne de z
332,755398	332,755398	332,755398

A partir de tableau III.27 on remarque que la meilleure solution et la mauvaise et la moyenne sont égaux car la solution n'a pas changé pendant les 10 exécutions. Alors pour faire la différence entre eux il faut regarder la valeur de NFE.

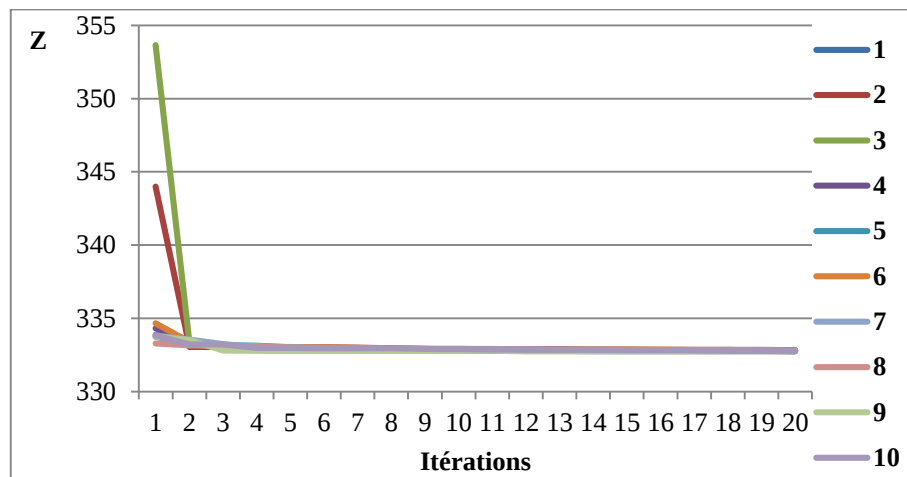


Figure III.16 : Graphe des solutions générales (cas 2, scénario1).

La figure III.16 présente les courbes des solutions après 10 exécutions indépendantes. (20 itération comme échantillon).

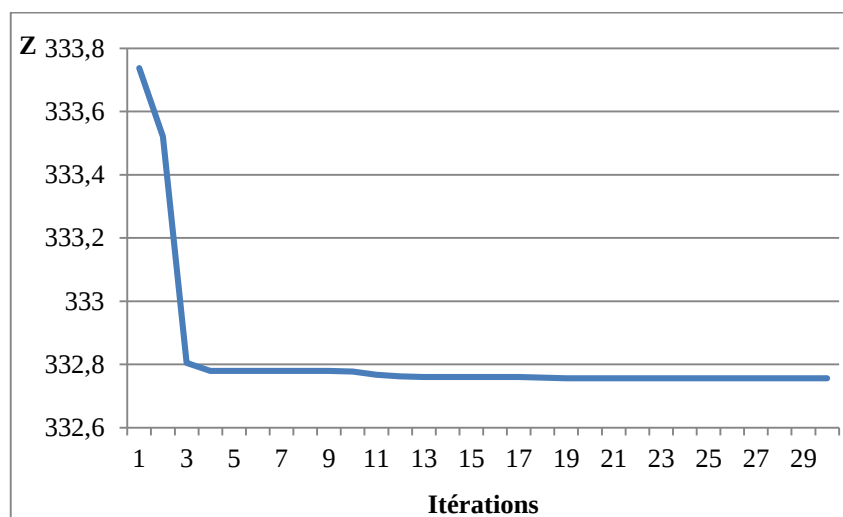


Figure III.17 : Graphe de la meilleure solution (scénario 1, cas 2).

La figure III.17 présente une courbe de la meilleure valeur pendant 10 exécutions indépendantes (on a pris 30 itérations comme échantillon).

Scenario 1 : Poids des objectifs $w_1=0,8$. $w_2=w_3=0,1$.

Cas 1 : $N_{pop}=50$, $N_{it}=100$.

Tableau III.28 : Résultats de l'optimisation du système de freinage (scénario 2, cas 1).

No	f_1 (kg)	f_2 (s)	f_3 (N)	z	NFE	CPU (s)	σ
1	1,101659	10,139053	1000	101,895233	4600	0,613471	0
2	1,112146	10,04444	1000	101,894161	4400	0,282903	
3	1,157726	9,652798	1000	101,891460	4150	0,249175	
4	1,106137	10,098488	1000	101,894758	2800	0,299248	
5	1,136963	9,827376	1000	101,892308	4650	0,266322	
6	1,148321	9,871193	1000	101,905776	4950	0,272347	
7	1,055122	10,58948	1000	101,903046	4950	0,272677	
8	1,160909	9,626635	1000	101,891391	4600	0,254646	
9	1,114586	10,02265	1000	101,893934	4700	0,253106	
10	1,106433	10,09581	1000	101,894727	4950	0,339857	

Tableau III.29 : Résultats variables (scenario 1, cas 1).

No	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (s)	x_4
1	70,295880	90,2958862	1000	8
2	71,059967	91,060029	1000	8
3	74,381683	94,381830	1000	8
4	70,6217129	90,621829	1000	8
5	72,868474	92,868598	1000	8
6	63,234750	83,234760	1000	8
7	66,835561	86,851319	1000	8
8	74,613104	94,613379	1000	8
9	71,238036	91,238048	1000	8
10	70,643316	90,643434	1000	8

Tableau III.30 : Résultats des contraintes (scenario 2, cas 1).

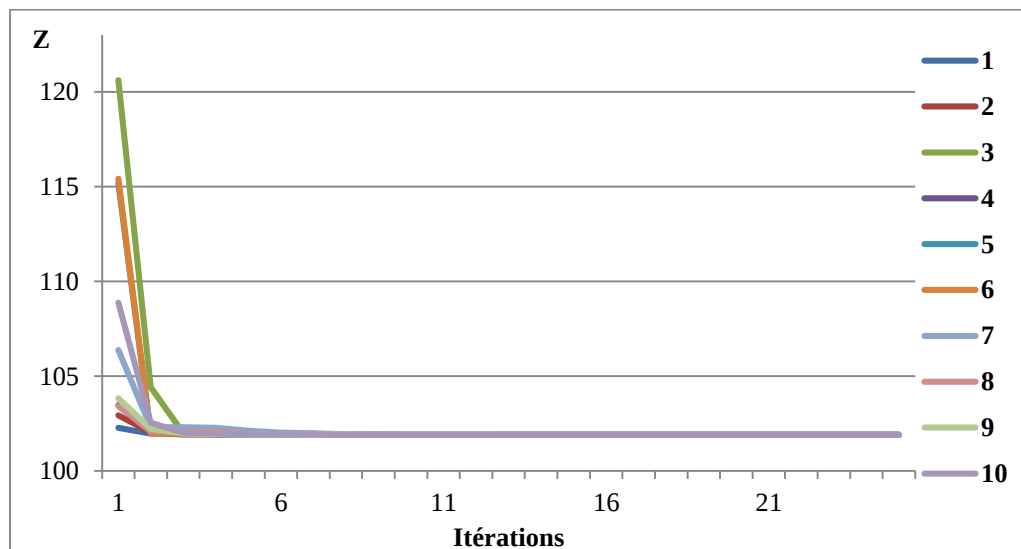
No	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	6,200E-06	7,5	0,300844	0,916319	248629,55
2	6,199E-05	7,5	0,301779	0,916327	25105,61
3	1,469E-04	7,5	0,305646	0,916360	26160,75
4	1,160E-04	7,5	0,301245	0,916323	24966,44
5	1,239E-04	7,5	0,303923	0,916346	25680,00
6	9,99E-06	5	0,291284	0,916232	25562,04
7	0,015758	7,5	0,296471	0,916345	23767,10
8	2,749E-04	7,5	0,305905	0,916363	26234,29
9	1,20E-05	7,5	0,301994	0,916329	25162,15
10	1,180E-04	7,5	0,301272	0,916323	24973,30

Les tableaux III.28-30 donnent les résultats obtenue de cas 1 (scénario 2), la meilleure solution est ($z=101,891391$) avec une consommation de temps 0,254646, NFE=99800, et un écart type 0.

Tableau III.31 : Classification de solution (scénario 2, cas 1).

Mauvaise z	Meilleure z	Moyenne de z
101,905776	101,891391	101

Le tableau III.31 donne la meilleure solution est ($z=101,891391$), la mauvaise est ($z=101,905776$) et la moyenne ($z= 101$).

**Figure III.18 :** Graphe des solutions (cas 1, scénario 2).

La figure III.18 présente les courbes des solutions générales après 10 exécutions indépendantes.

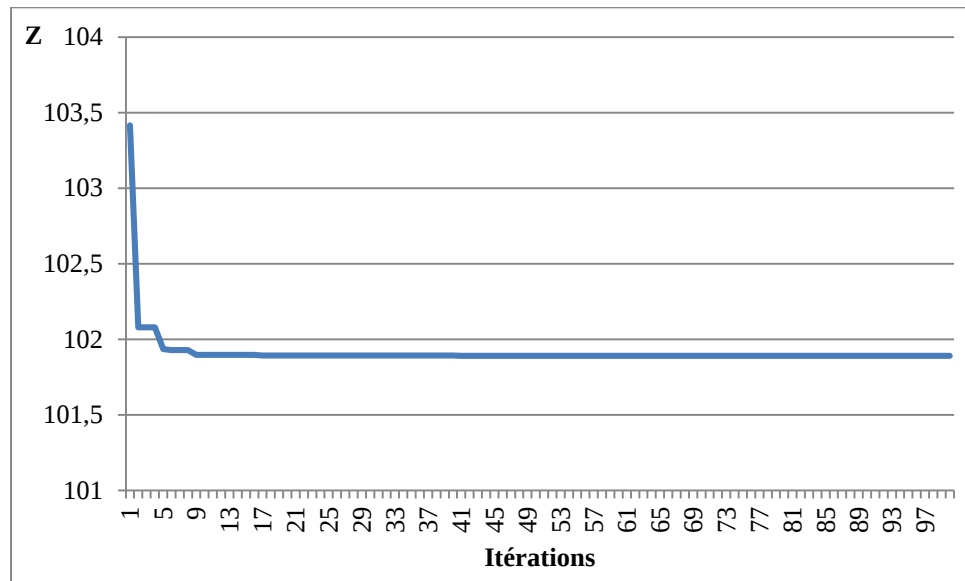


Figure III.19 : Graphe de la meilleure solution (scénario 2, cas 1).

La figure III.19 présente une courbe descente jusqu'à la valeur minimale après 10 exécutions.

Cas2 : $N_{pop}=100$, $N_{it}=1000$.

Tableau III.32 : Résultats de l'optimisation du système de freinage (scénario 2, cas 2).

No	f_1 (kg)	f_2 (s)	f_3 (N)	z	NFE	CPU (s)	σ
1	1,173751	9,522174	1000	101,891218	97600	5,629972	0
2	1,058399	10,348946	1000	101,881615	95900	4,664102	
3	1,058399	10,348946	1000	101,881614	11300	4,410867	
4	1,036470	10,590153	1000	101,888191	99700	4,281992	
5	1,058384	10,349150	1000	101,881623	99900	4,342632	
6	1,058400	10,348946	1000	101,881614	98300	4,448299	
7	1,169456	9,556793	1000	101,891244	94600	4,318759	
8	1,058400	10,348946	1000	101,881614	12800	4,284002	
9	1,058399	10,348946	1000	101,881614	93000	4,277795	
10	1,058399	10,348946	1000	101,881614	87000	4,359904	

Tableau III.33 : Résultats des variables (scénario 2, cas 2).

No	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (s)	x_4
1	75,550083	95,550146	1000	8
2	79,999999	99,999999	1000	7
3	79,999999	99,999999	1000	7
4	77,907995	97,954398	1000	8
5	79,998152	99,998259	1000	7
6	75,237379	95,237379	1000	8
7	75,237379	95,237379	1000	8
8	80	100	1000	7
9	79,999999	99,999999	1000	7
10	79,999999	99,999999	1000	7

Tableau III.34 : Résultats des contraintes (scénario 2, cas 2).

No	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	6,299E-05	7,5	0,306934	0,916371	26531,96
2	0	10	0,311535	0,916407	24340,44
3	0	10	0,311535	0,916407	25582,00
4	0,046402	10	0,309663	0,916582	23765,55
5	1,069E-04	10	0,311534	0,916407	24339,94
6	9,999E-07	10	0,311535	0,916407	24340,44
7	0	7,5	0,306592	0,916368	26432,59
8	0	10	0,311535	0,916407	24340,44
9	0	10	0,311535	0,916407	24340,44
10	0	10	0,311535	0,916407	24340,44

Les tableaux III.32-34 donnent les résultats obtenus de cas 2 de (scénario 2), la meilleure solution est ($z=101,881614$) avec une consommation de temps 4,359904s (NFE=87000), et un écart type égale à 0.

Tableau III.35 : Classification de solution (scénario 2, cas 2).

Mauvaise z	Meilleure z	Moyenne de z
101,888191	101,891244	101

Le tableau III.35 donne la meilleure solution est ($z=101,891244$), la mauvaise est ($z=101,888191$) et la moyenne ($z=101$).

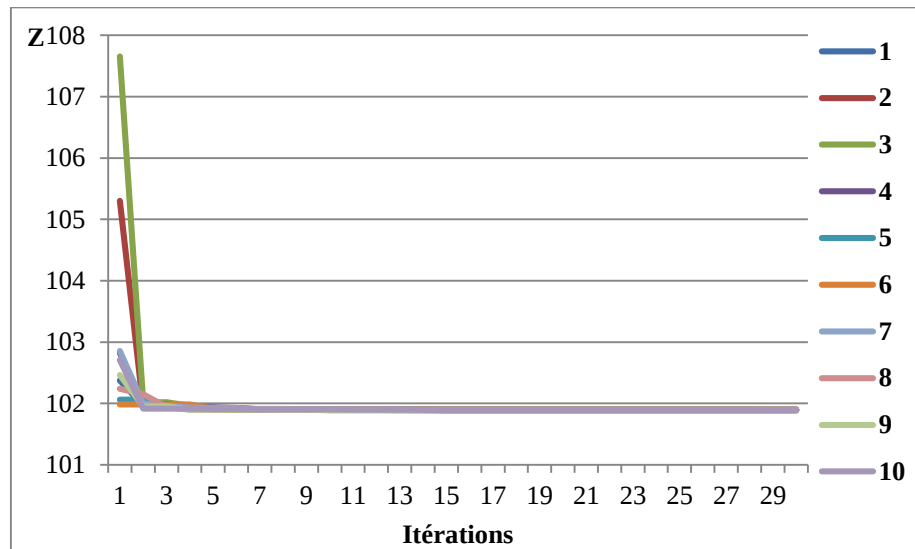


Figure III.20 : Graphe des solutions (cas 2, scénario 2).

La figure III.20 présente les courbes des solutions après 10 exécutions indépendantes.

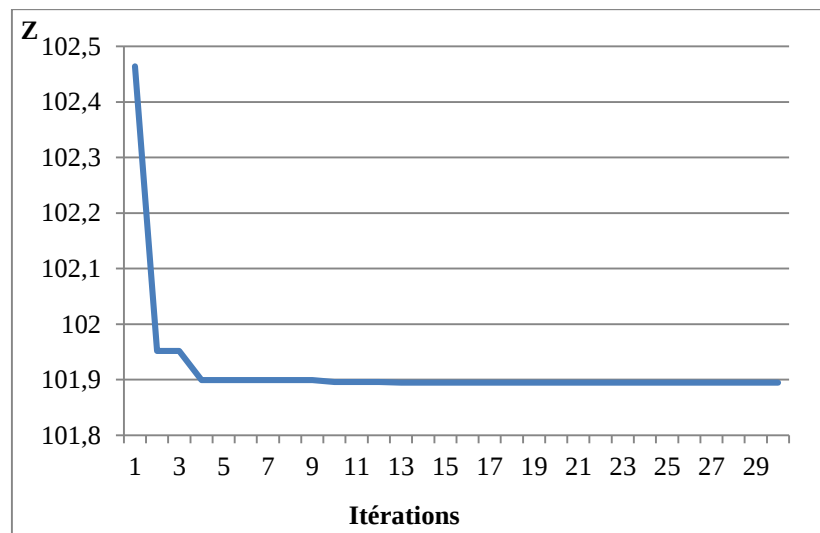


Figure III.21 : Graphe de la meilleure solution (scénario 2, cas 2).

La figure III.21 présente une courbe descente jusqu'à la valeur minimale après 10 exécutions.

Problème 2

Algorithme 1 (GWO)

Les résultats sont enregistrés en utilisant la fonction « save » dans MATLAB qui consomme plus de temps d'exécution.

Cas 1 : $N_{pop}=50$, $N_{it}=100$.

Tableau III.36 : Résultats de l'optimisation du système sécurité latérale (cas 1).

No	z	NFE	CPU (s)	σ
1	22,986880	4700	18,500684	0.4583
2	23,696083	5000	18,470552	
3	23,187690	3650	22,788764	
4	23,680437	4800	22,045793	
5	23,097963	5000	19,499087	
6	23,081935	5000	20,968476	
7	22,978214	4850	18,579437	
8	23,494566	5000	21,813060	
9	23,757225	4800	18,466402	
10	22,948553	5000	20,463718	

Tableau III.37 : Résultats des variables (cas 1).

No	x1	x2	x3	x4	x5
1	0,500000	1,125132	0,503634	1,305730	0,500000
2	0,537211	1,106172	0,500000	1,563432	0,632946
3	0,500000	1,211763	0,500000	1,223422	0,500000
4	0,504918	1,278599	0,500000	1,225373	0,512052
5	0,500544	1,118166	0,506228	1,342018	0,503382
6	0,505634	1,086706	0,505740	1,391542	0,503988
7	0,509268	1,136694	0,500467	1,281590	0,509771
8	0,544540	1,181371	0,500000	1,302137	0,500000
9	0,511669	1,204609	0,500000	1,361725	0,516728
10	0,500000	1,148389	0,500000	1,270063	0,505537

Tableau III.38 : Suite du tableau III.37.

No	x6	x7	x8	x9	x10	x11
1	1,488970	0,516813	0,192	0,345	-18,365846	3,646460
2	0,647633	0,505613	0,3450	0,1920	4,991835	14,069876
3	1,500000	0,508901	0,3450	0,3450	-2,700634	2,947350
4	1,394873	0,506547	0,3450	0,1920	9,743396	12,804624
5	1,491187	0,511404	0,3450	0,3450	-19,717543	5,921798
6	1,500000	0,501369	0,3450	0,3450	-24,89322	-4,419210
7	1,500000	0,505938	0,3450	0,1920	-16,307905	1,682262
8	1,422607	0,500000	0,3450	0,1920	-4,905455	12,454555
9	0,512861	0,500000	0,3450	0,3450	-3,198793	13,835946
10	1,487298	0,504022	0,3450	0,3450	-14,554991	0,057300

Tableau III.39 : Résultats des contraintes (cas 1).

No	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	0,349538	0,260794	0,263981	0,284668	28,939039
2	0,537663	0,227970	0,222015	0,291266	27,954873
3	0,497436	0,252211	0,252942	0,274066	30,054622
4	0,589870	0,241823	0,247131	0,292580	28,619660
5	0,330498	0,246962	0,256725	0,271334	28,134299
6	0,275952	0,241383	0,254321	0,271955	27,684953
7	0,413087	0,227997	0,251025	0,284379	27,842489
8	0,505069	0,232986	0,246805	0,288331	28,280752
9	0,469492	0,229895	0,220471	0,275056	27,781348
10	0,393161	0,246948	0,254180	0,271959	28,815202

Tableau III.40 : Suite du tableau III.39.

No	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	27,446204	31,945196	3,998907	9,282869	15,323499
2	27,781515	31,889632	3,991081	9,311754	15,712135
3	27,993421	31,858224	3,997362	9,2677812	15,583520
4	31,974950	31,974950	3,990032	9,526718	15,543297
5	25,699046	31,896412	4,00000	8,929916	15,257539
6	25,143312	31,998974	4,00000	8,847290	15,379474
7	25,017374	31,814760	3,996700	8,976562	15,527064
8	26,454551	31,917446	4,00001	9,226076	15,433483
9	27,981947	31,911837	3,990657	9,354400	15,629079
10	26,47721	31,84924	3,993740	9,024046	15,466661

Les tableaux III.36-40 donnent les résultats obtenue de cas 1, la meilleure solution est ($z=101,881614$) avec une consommation de temps 4,359904s (NFE=87000), et un écart type 0,4583.

Tableau III.41 : Classification de solution (cas 1).

Mauvaise z	Meilleure z	Moyenne de z
23,757225	22,948553	22,7000

Le tableau III.41 donne : la meilleure solution est ($z=22,948553$), la mauvaise est ($z=23,757225$) et la moyenne ($z= 22,7000$).

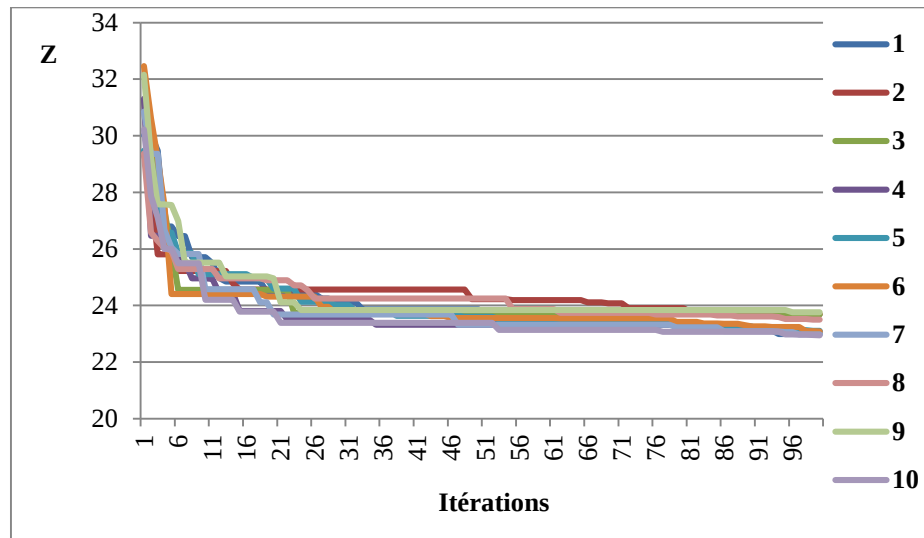


Figure III.22 : Graphe des solutions (masse) (cas1).

La figure III.22 présente les courbes des solutions après 10 exécutions indépendantes.

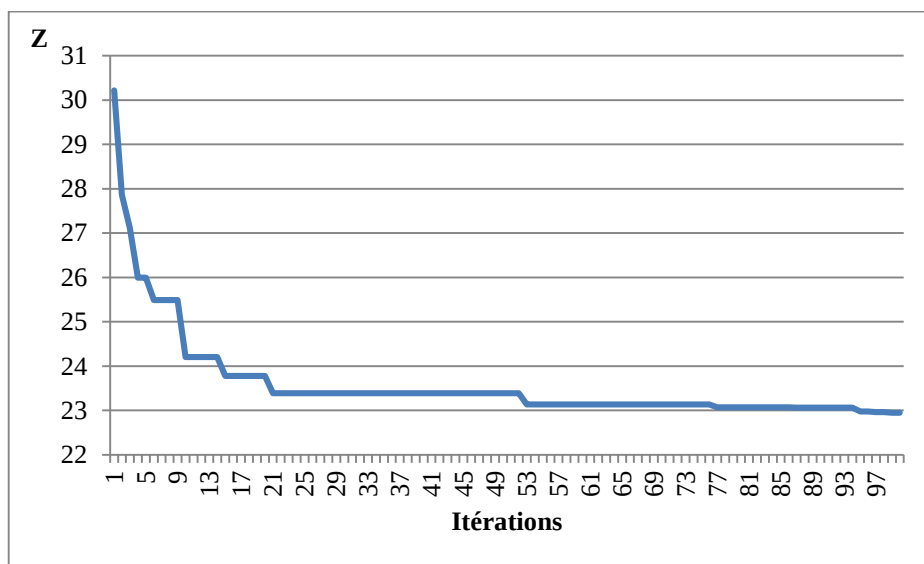


Figure III.23 : Meilleure solution (cas 1).

La figure III.23 présente une courbe descente jusqu'à la valeur minimale après 10 exécutions.

Cas 2 : $N_{pop}=100$, $N_{it}=1000$.

Tableau III.42 : Résultats d'optimisation de système de sécurité latérale (cas 2).

No	z	NFE	CPU (s)	σ
1	22,976626	100000	407,742169	0.4994
2	22,850683	100000	407,979208	
3	22,848258	96800	391,518399	
4	22,849348	100000	367,570144	
5	23,323722	99900	379,721893	
6	22,885656	100000	373,389834	
7	23,343732	100000	427,876858	
8	22,863860	99900	390,233964	
9	22,862194	100000	386,371885	
10	23.243814	100000	363.994953	

Tableau III.43 : Variables des résultats (cas 2).

No	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	0,500000	1,173353	0,500000	1,240690	0,500098
2	0,500069	1,111712	0,501047	1,309923	0,500068
3	0,500000	1,112055	0,500000	1,310684	0,500000
4	0,500124	1,108476	0,500000	1,316516	0,500000
5	0,500664	1,229801	0,500533	1,231336	0,500637
6	0,500151	1,111576	0,500000	1,320537	0,500193
7	0,500167	1,240485	0,500245	1,219033	0,502155
8	0,500000	1,118300	0,500032	1,303189	0,500930
9	0,500754	1,110645	0,500267	1,314540	0,500485
10	0,500000	1,213072	0,500117	1,240832	0,500596

Tableau III.44 : Suite du tableau III.43.

No	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
1	1,499796	0,500005	0,3450	0,3450	-9,437397	2,157596
2	1,499228	0,500000	0,3450	0,3450	-20,365376	-0,045168
3	1,500000	0,500000	0,1920	0,3450	-20,404887	0,395053
4	1,500000	0,500355	0,3450	0,1920	-20,979030	0,508812
5	1,076042	0,500063	0,3450	0,3450	0,773582	9,254184
6	1,500000	0,500000	0,3450	0,3450	-20,457450	3,434072
7	0,947307	0,500000	0,3450	0,3450	2,607448	10,954347
8	1,500000	0,500778	0,3450	0,1920	-19,227175	2,3033584
9	1,499754	0,500533	0,3450	0,1920	-20,576898	-1,728459
10	1,496750	0,500000	0,3450	0,1920	-2,416818	8,174094

Tableau III.45 : Résultats des contraintes (cas 2).

No	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	0,447302	0,250112	0,253879	0,274091	29,381851
2	0,335221	0,245265	0,255269	0,272847	28,190560
3	0,335125	0,259826	0,263800	0,285452	28,781804
4	0,364175	0,226960	0,251757	0,285622	27,634734
5	0,515054	0,245203	0,239508	0,276655	29,523556
6	0,330673	0,246927	0,256743	0,272881	28,181761
7	0,517149	0,243173	0,235604	0,277376	29,435435
8	0,385179	0,228424	0,252102	0,285720	27,739613
9	0,369222	0,225962	0,250610	0,285779	27,657430
10	0,532748	0,236979	0,250979	0,288517	28,745514

Tableau III.46 : Suite du tableau III.45.

No	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	27,213855	31,983852	3,999191	9,133289	15,509914
2	25,758879	31,984183	4,000000	8,918877	15,391771
3	27,236641	32,000000	3,999927	9,251991	15,384136
4	24,521334	31,987845	3,999492	8,910325	15,515583
5	28,563650	31,973055	3,999929	9,347139	15,640153
6	25,745970	31,980837	4,000000	8,921223	15,315478
7	28,817672	31,990710	3,999518	9,359304	15,660255
8	24,75723	31,991401	4,000000	8,941200	15,506445
9	24,579396	31,999597	3,999812	8,918328	15,540575
10	26,993127	31,991525	3,999930	9,288364	15,536264

Les tableaux III.42-46 donnent les résultats obtenue de cas 2, la meilleure solution est ($z=22,848258$), CPU= 4,359904s (NFE=87000), et un écart type 0,4994.

Tableau III.47 : Classification de solution (cas 2).

Mauvaise z	Meilleure z	Moyenne de z
23,343732	22,848258	22,324381

Le tableau III.47 donne la meilleure solution est ($z=22,848258$), la mauvaise est ($z=23,343732$) et la moyenne ($z=22,324381$).

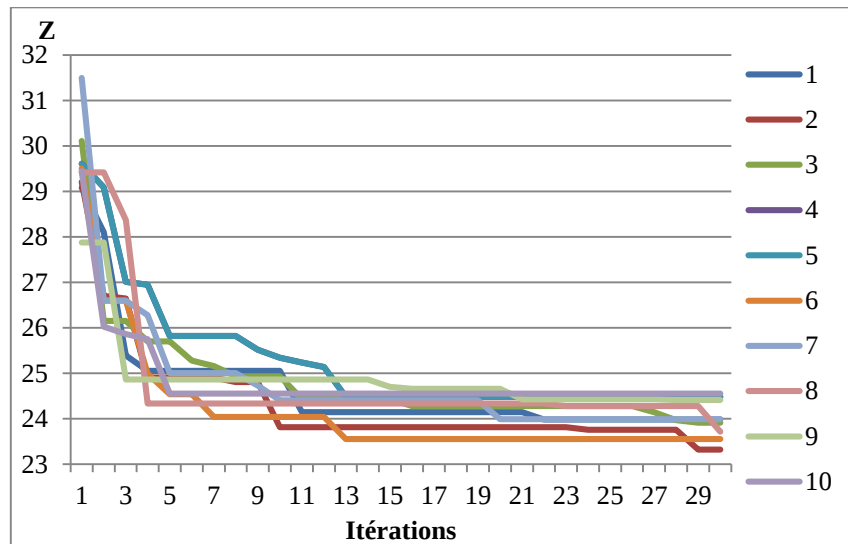


Figure III.24 : Graphe des solutions (cas 2).

La figure III.24 présente les courbes des solutions après 10 exécutions indépendantes.

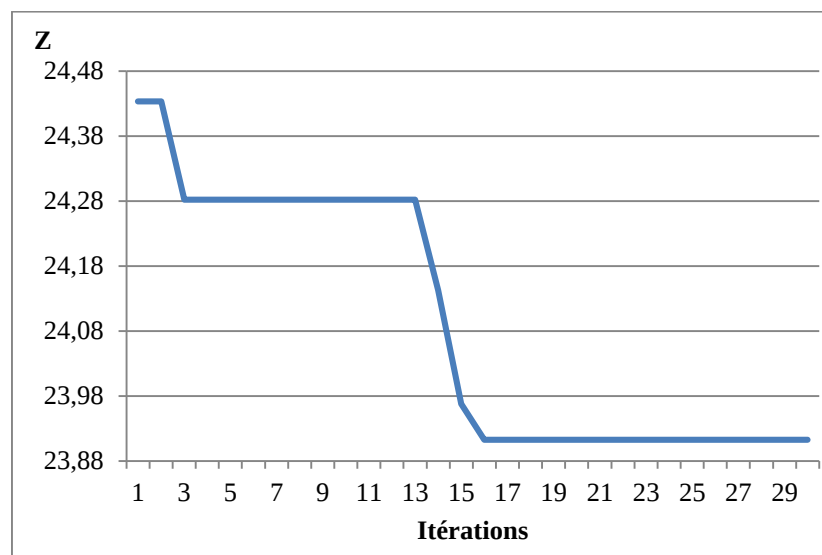


Figure III.25 : Meilleure solution (cas 1).

La figure III.25 présente une courbe renonce progressivement jusqu'à la valeur minimale après 10 exécutions indépendantes.

Algorithme1 (PSO)

Cas 1 : $N_{pop}=50$, $N_{it}=100$.

Tableau III.48 : Résultats de l'optimisation du système de sécurité latérale (cas 1).

No	z	NFE	CPU (s)	σ
1	22,866492	5000	19,050804	0.4583
2	23,177458	4950	20,711017	
3	22,965670	5000	20,763542	
4	23,233936	4850	18,985703	
5	23,768086	4200	19,689147	
6	23,632263	4700	19,214284	
7	23,523273	4750	18,619933	
8	23,485745	4950	18,987507	
9	22,900824	4950	18,932760	
10	23,658183	4400	19,201397	

Tableau III.49 : Variables des résultats (cas 1).

No	x1	x2	x3	x4	x5
1	0,500000	1,110592	0,500936	1,316036	0,500000
2	0,500000	1,197423	0,502741	1,246012	0,500000
3	0,500000	1,160355	0,502949	1,253673	0,500000
4	0,585724	1,097506	0,521458	1,288961	0,500000
5	0,500000	1,088346	1,050451	0,621364	0,500000
6	0,563669	1,263763	0,500000	1,128085	0,597737
7	0,515426	1,190177	0,520239	1,250483	0,597473
8	0,561589	1,200613	0,500714	1,231957	0,527506
9	0,500000	1,143066	0,500000	1,271566	0,501454
10	0,507670	1,260590	0,500000	1,156705	0,723440

Tableau III.50 : Suite du tableau III.49.

No	x6	x7	x8	x9	x10	x11
1	1,500000	0,500000	0,3450	0,1920	-20,610917	0,420607
2	1,289582	0,500000	0,3450	0,1920	-5,060994	1,787818
3	1,498478	0,501202	0,3450	0,3450	-12,236615	-0,310382
4	1,500000	0,500000	0,3450	0,1920	-16,007929	2,619838
5	1,499957	0,500000	0,3450	0,1920	-30	0,297799
6	0,832046	0,506734	0,3450	0,1920	11,416187	12,915518
7	1,265515	0,501825	0,3450	0,1920	-5,502849	0,672447
8	1,175283	0,502479	0,3450	0,3450	-0,346283	5,416520
9	1,499264	0,500000	0,3450	0,1920	-15,003192	1,565935
10	1,045178	0,500493	0,3450	0,1920	6,490436	3,444142

Tableau III.51 : Résultats des contraintes (cas 1).

No	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	0,361287	0,226147	0,252142	0,283021	27,584620
2	0,525529	0,229078	0,240644	0,287567	28,288346
3	0,425596	0,240254	0,246623	0,273674	28,712413
4	0,426801	0,215471	0,238917	0,287829	27,235601
5	0,509509	0,227434	0,271509	0,231218	29,130903
6	0,562491	0,229275	0,224812	0,291104	28,234562
7	0,519464	0,228074	0,240099	0,286797	28,298471
8	0,52098	0,240506	0,236591	0,275210	29,328348
9	0,433321	0,229564	0,251313	0,284401	28,021255
10	0,583506	0,233488	0,235528	0,291165	28,727164

Tableau III.52 : Suite du tableau III.51.

No	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	24,413871	31,725419	3,997406	8,888603	15,478346
2	26,585121	31,929868	3,998454	9,252292	15,724404
3	26,406789	31,582872	3,994804	9,019379	15,529716
4	24,486775	31,774817	3,997523	8,934242	15,515342
5	24,760210	29,880618	3,999832	7,945638	15,302909
6	28,203942	31,995532	3,980947	9,374275	15,673644
7	28,298471	31,960836	3,991514	9,241664	15,621362
8	28,156149	31,952421	3,992360	9,310759	15,654348
9	25,357159	31,778056	3,993978	9,028991	15,564304
10	28,003897	31,822253	3,996593	9,401153	15,655204

Les tableaux III.48-52 donnent les résultats obtenue de cas 1, la meilleure solution est ($z=22,866492$), avec une consommation de temps 19,050804s (NFE=5000), $\sigma=0.4583$.

Tableau III.53 : Classification de solution.

Mauvaise z	Meilleure z	Moyenne de z
23,768086	22,866492	22,7000

Le tableau III.53 donne la meilleure solution est ($z=22,866492$), la mauvaise est ($z=23,768086$) et la moyenne ($z=22,7000$).

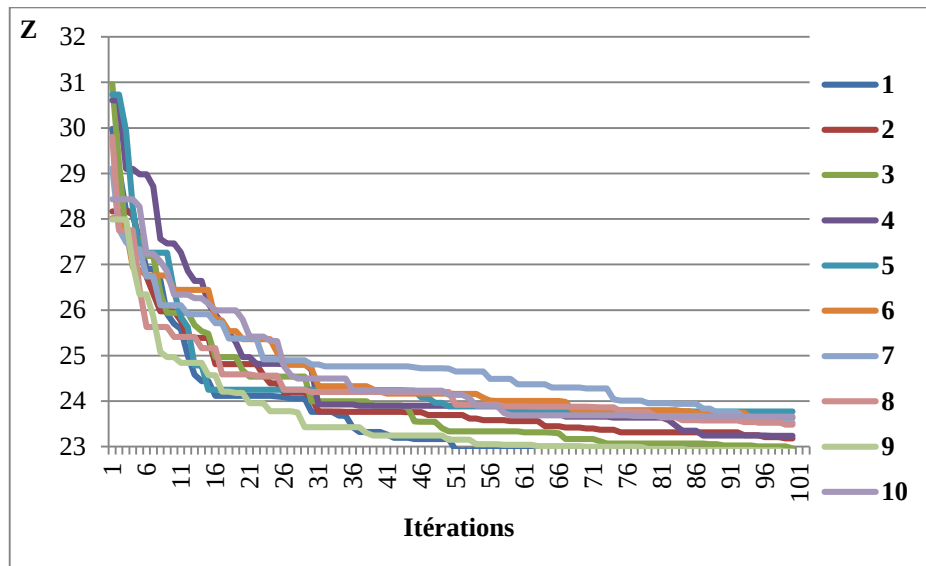


Figure III.26 : Graphe des solutions (masse) (cas 1).

La figure III.26 présente les courbes des solutions après 10 exécutions indépendantes.

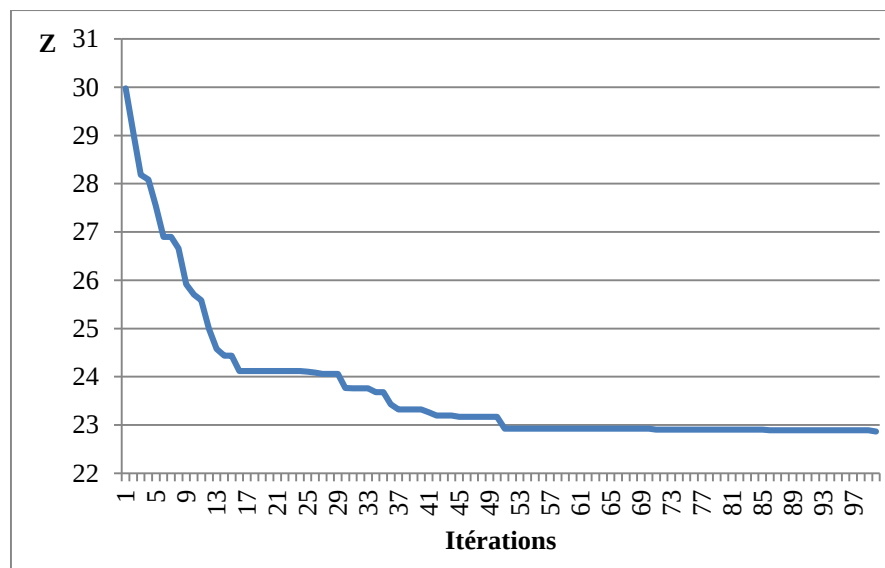


Figure III.27 : Meilleure solution (cas 1).

La figure III.27 présente une courbe non linéaire qui décent jusqu'à la valeur minimale.

Cas 2 : $N_{pop}=100$, $N_{it}=1000$.

Tableau III.54 : Résultats de l'optimisation du système de sécurité latérale (cas 2).

No	z	NFE	CPU (s)	σ
1	22,847423	93400	395,734690	0.4546
2	22,862527	99700	399,619837	
3	23,313472	98100	368,309252	
4	22,880062	98200	382,400233	
5	22,864014	99300	390,893768	
6	22,856085	93500	378,534450	
7	22,854419	100000	376,637470	
8	23,333234	99700	380,762643	
9	22,848841	87100	378,208781	
10	22,852899	98200	384,943814	

Tableau III.55 : Variables des résultats (cas 2).

No	x1	x2	x3	x4	x5
1	0,500000	1,125649	0,500000	1,287866	0,500000
2	0,500000	1,136486	0,500000	1,2736059	0,500000
3	0,500022	1,251149	0,500000	1,195309	0,500000
4	0,500000	1,1450318	0,500000	1,263765	0,500000
5	0,500000	1,137410	0,500000	1,272439	0,500001
6	0,500000	1,129289	0,500000	1,283970	0,500000
7	0,500000	1,131579	0,500000	1,279746	0,500000
8	0,500000	1,276995	0,500000	1,157130	0,500258
9	0,500000	1,106527	0,500000	1,320025	0,500000
10	0,5000000	1,130484	0,500000	1,2811891	0,5000000

Tableau III.56 : Suite du tableau III.55.

No	x6	x7	x8	x9	x10	x11
1	1,499999	0,500000	0,3450	0,1920	-17,901053	-0,004877
2	1,499999	0,500000	0,3450	0,1920	-15,965300	0,257623
3	0,848356	0,500000	0,3450	0,3450	4,548011	11,857520
4	1,499999	0,500000	0,3450	0,1920	-14,441759	-0,107286
5	1,499999	0,500000	0,3450	0,1920	-15,797476	-0,158338
6	1,499987	0,500000	0,3450	0,1920	-17,255904	-0,783958
7	1,499999	0,500000	0,3450	0,1920	-16,840384	-0,022164
8	0,873225	0,500043	0,3450	0,3450	9,166145	13,370898
9	1,500000	0,500000	0,3450	0,1920	-21,321133	1,356156E-06
10	1,499999	0,500000	0,3450	0,1920	-17,036287	0,010112

Tableau III.57 : Résultats des contraintes (cas 2).

No	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
1	0,401671	0,227802	0,250867	0,285902	27,821214
2	0,428339	0,228071	0,251240	0,284955	27,848728
3	0,519364	0,241622	0,232574	0,278180	29,423628
4	0,439325	0,228944	0,250085	0,286086	28,038176
5	0,424259	0,228389	0,250342	0,286027	27,945559
6	0,394271	0,227031	0,251750	0,284191	27,705881
7	0,401880	0,230145	0,251838	0,286371	27,933023
8	0,516298	0,243546	0,232891	0,280091	29,901003
9	0,360756	0,226631	0,251579	0,285770	27,615841
10	0,411286	0,228100	0,250688	0,285961	27,873135

Tableau III.58 : Suite du tableau III.57.

No	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	24,937267	32,0000	4,0000000	8,964162	15,547072
2	24,980519	31,894833	4,0000000	8,952207	15,550089
3	29,085259	31,997573	4,0000002	9,363541	15,697239
4	25,415554	31,984355	3,9991120	9,033571	15,579479
5	25,212223	31,996163	3,999946	9,003035	15,567020
6	24,653910	31,835336	4,000000	8,911617	15,536435
7	25,191082	32,000001	3,988283	9,015547	15,514240
8	29,699519	31,996842	3,989483	9,387431	15,718934
9	24,482065	31,999998	4,000000	8,905478	15,518649
10	25,052342	31,999981	4,000000	8,980173	15,554214

Les tableaux III.54-58 donnent les résultats obtenus de cas 2, la meilleure solution est ($z=22,847423$), CPU= 395,734690s, (NFE=93400), $\sigma = 0.4546$.

Tableau III.59 : Classification de solution (cas 2).

Mauvaise z	Meilleure z	Moyenne de z
23.333234	22,847423	22,660949

Le tableau III.59 donne : la meilleure solution est ($z=22,847423$), la mauvaise est ($z=23,333234$) et la moyenne ($z=22,660949$).

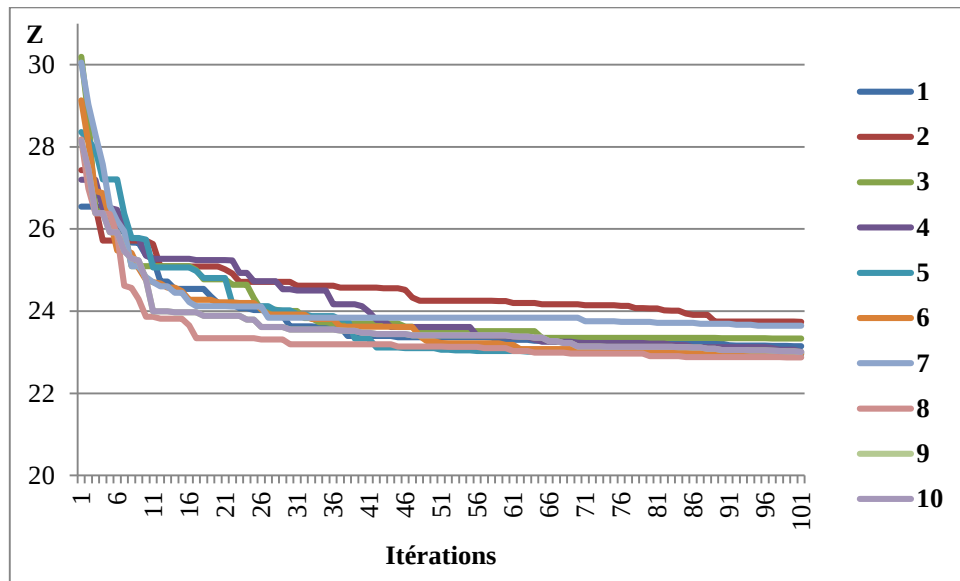


Figure III.28 : Graphe des solutions (masse) (cas 2).

La figure III.28 présente les courbes des solutions après 10 exécutions indépendantes.

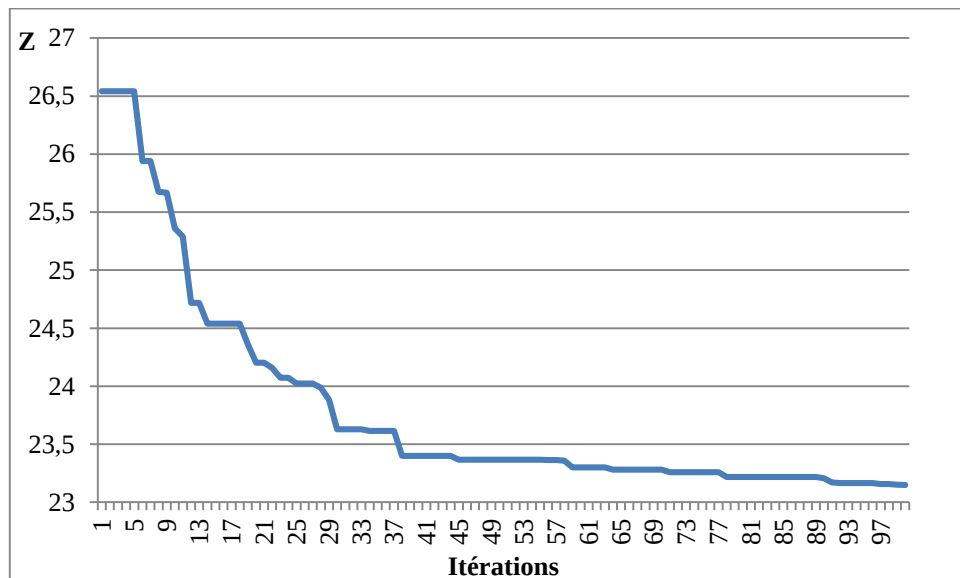


Figure III.29 : Meilleure solution (cas 2).

La figure III.29 présente une courbe non linéaire qui décent jusqu'à la valeur minimale.

III.6 Comparaison entre les deux algorithmes

Les tableaux III.60-III.61 présentent les meilleurs résultats de performances des deux algorithmes pour les deux problèmes.

Tableau III.60 : Comparaison des résultats des performances du 1^{er} problème entre les deux algorithmes (scénarios 1 et 2).

Méthode	Scénario	z	CPU (s)	NFE	σ
GWO	1	332,755399	0,594816	5000	1,7658E-05
	2	101,881620	0,604043	99800	2,1241E-05
PSO	1	332,755398	4,412409	5700	0,7554
	2	101,881614	4,359904	87000	0

Le tableau III.60 présente les valeurs de performance des deux scenarios.

Scénario 1 : on constate que PSO a fourni le meilleur résultat ($z=332,755398$), mais un NFE (5700) avec une consommation de temps (4,412409s). En revanche, GWO a consommé moins de temps (0,594816s) et un NFE (5000) moins aussi. L'écart type le plus petit est celui de GWO ($\sigma=1,7658E-05$).

Scenario 2 : on constate aussi que PSO a fourni le meilleur résultat ($z=101,881614$) et NFE (87000), ($\sigma=0$). Par contre, GWO a consommé moins de CPU (0,604043s).

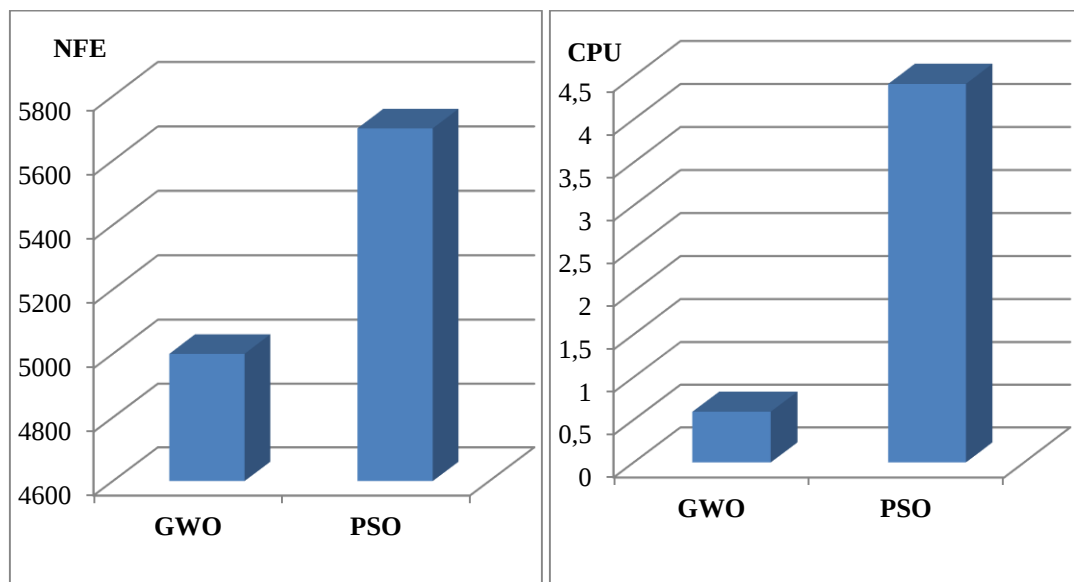


Figure III.30 : Histogramme de NFE et CPU des deux algorithmes (scénario 1).

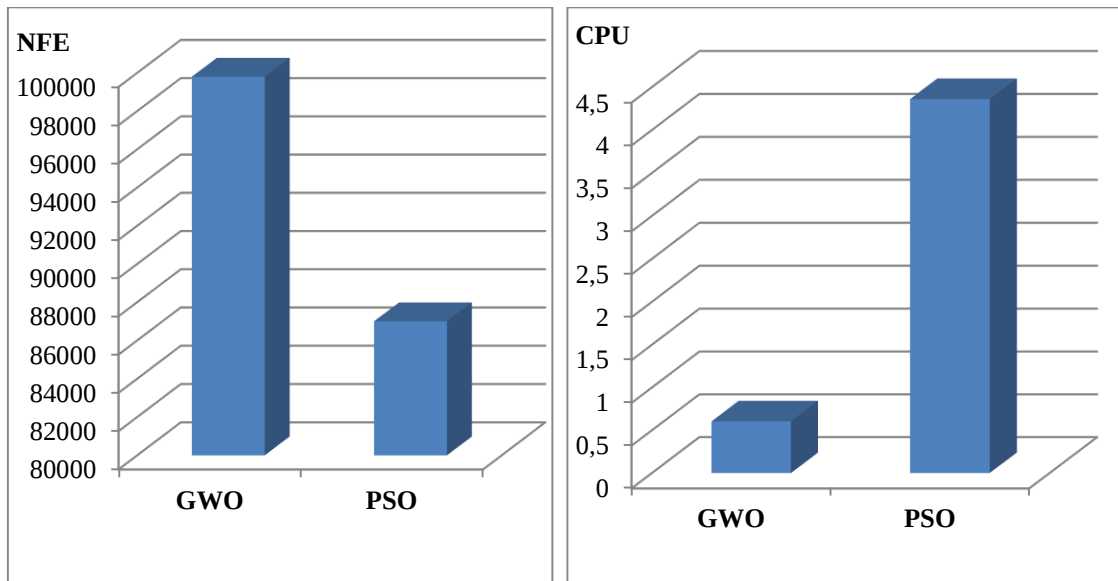


Figure III.31 : Histogramme de NFE et CPU des deux algorithmes (scénario 2).

Tableau III.61 : Comparaison des résultats des performances de 2^{ème} problème entre les 2 algorithmes.

Algorithme	z	CPU (s)	NFE	σ
GWO	22,848258	391,518399	100000	0,4994
PSO	22,847423	395,734690	93400	0,4546

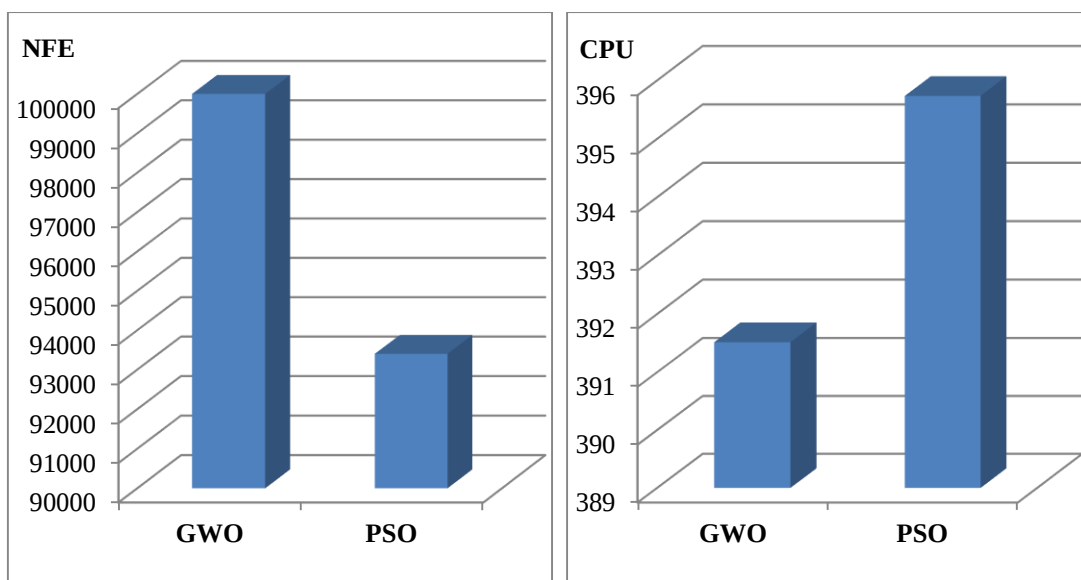


Figure III.32 : Histogramme de NFE et CPU des deux algorithmes (problème 2).

Les figures III.30-III.32 représentent la consommation de NFE et CPU des deux problèmes.

Tableau III.62 : Résultats de littérature.

Méthode	Masse (kg)	NFE	σ	Référence
PSO ³	22,847423	93400	0,4994	-
GWO ²	22,848258	100000	0,4546	-
RBDO ¹	23.52	-	-	[52]

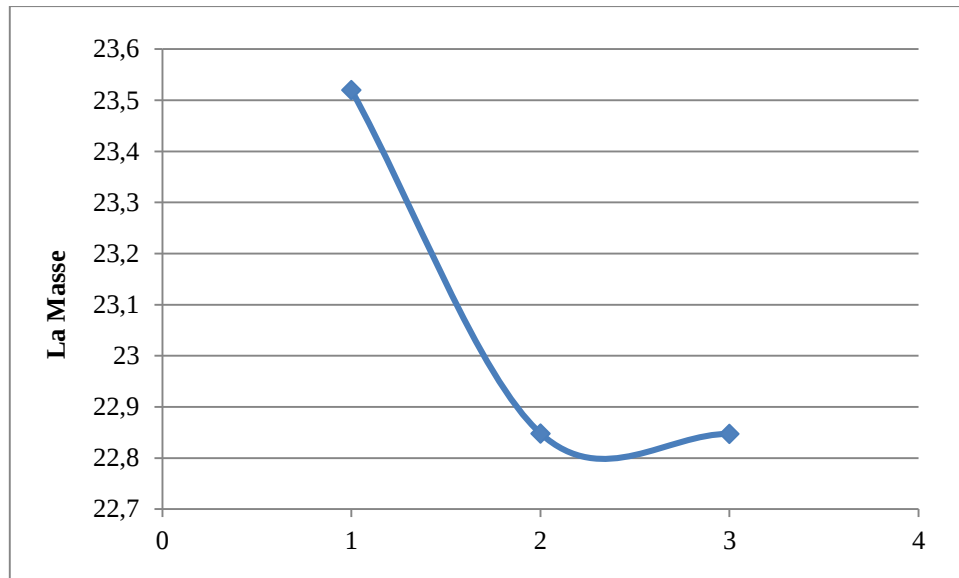


Figure III.33 : Courbe de meilleurs résultats.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué deux algorithmes de l'intelligence artificielle (PSO et GWO) sur deux problèmes d'optimisation des systèmes de sécurité automobiles : système de freinage et système de sécurité latérale (porte de voiture) afin de maîtriser ces problèmes et faire une comparaison entre les résultats obtenus.

Les résultats obtenus ont montré que le PSO est le meilleur algorithme pour ces problèmes. En revanche le GWO est plus rapide concernant le temps.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire avait l'objet de faire l'optimisation de deux systèmes de sécurité automobiles, un système de freinage à disque et un système de sécurité latérale (porte de voiture).

Nous avons présenté dans un premier temps un aperçu sur les systèmes mécatroniques dans l'automobile (freinage, type de freinage, structure latérale,...etc.) ainsi que la conception des pièces de composition de chaque système, en ajoutant à ceci un état de l'art sur l'optimisation des systèmes de freinage et les pièces automobile. Ensuite un état de l'art sur l'optimisation a bien éclairé les différents types de problèmes ainsi que leurs méthodes de résolution. Parmi ces méthodes, les algorithmes de l'intelligence artificielle. Nous avons utilisé deux méthodes (GWO et PSO) pour résoudre les problèmes mentionnés afin de les maîtriser et faire une comparaison entre les résultats et conclure sur le plus convenable (offrant les meilleures performances) à nos problèmes.

Enfin, les résultats obtenus montrent que le PSO a fourni la meilleure solution (solution optimale), contrairement au GWO, il a consommé moins de temps d'exécution. Dans ce contexte, les chercheurs vont travailler afin de produire un algorithme plus adapté lors de la résolution des problèmes complexes en faisant une combinaison entre deux algorithmes, dont le but est de prendre les meilleures performances de chacun et faire sortir le plus efficace.

Bibliographie

- [1] J.-Y. Choley, “Mécatronique : une nouvelle démarche de conception des systèmes complexes,” pp. 29–35, 2006.
- [2] M. A. Mellal, “Mechatronic systems : Design, performance and applications, Nova Science Publishers, USA,” 2019.
- [3] B. Boudon, “Méthodologie de modélisation des systèmes mécatroniques complexes à partir du multi-bond graph : application à la liaison BTP-fuselage d’un hélicoptère,” Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, France, 2015.
- [4] B. T. Fijalkowski, “Automotive Mechatronics : Operational and Practical Issues, Springer Heidelberg Dordrecht London New York, ” 2011.
- [5] L. Lamontagne, “Étude Sur L’Application De L’Hydroformage,” Mémoire de Master, Faculté des études supérieures de l’Université Laval, Québec, 2010.
- [6] C. Lange, “Étude physique et modélisation numérique du procédé de sertissage de pièces de carrosserie,” Thèse de doctorat, Ecole national superieure de Paris, France, 2006.
- [7] “ www.euroncap.com.” Cosulté le 5-06-2019 .
- [8] H. H. Hamid, “Loyola Consumer Law Review, The NHTSA’s Evaluation of Automobile SafetySystems : Active or Passive?,” no. 3, 2007.
- [9] “www.automotive.electronicsspecifier.com.” Consulté le 15-04-2019 .
- [10] J. P. Brossard, “Dynamique de freinage, Presses polytechniques et universitaires romandes, Suisse,” 2009.
- [11] M. Miard, “Cours de freinage,” Acadimie de Nancy-Metz, France, 2011.
- [12] D. Sammier, “Sur la modélisation et la commande de suspensions de véhicules automobiles,” Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, France, 2001.
- [13] A. Belhocine, Thermomécanique des disques des freins : Application du Code de Calcul ANSYS v11,” Thèse de doctorat, Université de science et technologie

d'Oran, 2012.

- [14] T. M. L. Nguyen-tajan, “Modélisation thermomécanique des disques de frein par une approche eulérienne,” Thèse de doctorat, Ecole polytechnique, France, 2002.
- [15] F. Z. Boukheddia, “Le frein automatique d'un véhicule par MATLAB.” Mémoire de Master, Université de Hassiba Benbouali de Chlef, 2012.
- [16] L. Durali, “A New Self-Contained Electro-Hydraulic Brake System,” Thèse de doctorat, Université de Waterloo, Ontario, Canada, 2015.
- [17] H. Lü, W. Shangguan, and D. Yu, “2174. Squeal reduction of a disc brake system with fuzzy uncertainties,” *J. Vibroengineering*, vol. 18, no. 6, pp. 3981–4001, 2016.
- [18] S. Shi, “Automobile brake system,” Thèse de doctorat, USA, 2016.
- [19] Société d'assurance publique du Manitoba, “Manual des freins à air comprimé,” Ontario, Canada, 2010.
- [20] S. Cai, “Système d’information et d’assistance à la conduite pour la mise en oeuvre de la sécurité à bord d’un véhicule,” Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard, France, 2012.
- [21] A. R. Yildiz, “A new design optimization framework based on immune algorithm and Taguchi’s method,” *Comput. Ind.*, vol. 60, no. 8, pp. 613–620, 2009.
- [22] A. R. Yildiz, “A new hybrid particle swarm optimization approach for structural design optimization in the automotive industry,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 226, no. 10, pp. 1340–1351, 2012.
- [23] G. Li, Z. Xue, C.-H. Chuang, and K. Pline, “Study of Optimization Strategy for Vehicle Restraint System Design,” *SAE Tech. Pap. Ser.*, vol. 1, pp. 1–8, 2019.
- [24] A. R. Yildiz, I. Durgun, “Download citation Structural Design Optimization of Vehicle Components Using Cuckoo Search Algorithm,” 2012.
- [25] Cours sur l'optimisation, Ecole Catholique, pp. 1–22, 2011.
- [26] I. Boussaid, “Perfectionnement de métaheuristiques pour l’optimisation

- continue,” Thèse de doctorat, Université des sciences et technologie Haouari Boumediene, Bab Ezzouar, 2014.
- [27] S. Jacquin, “Hybridation des métaheuristiques et de la programmation dynamique pour les problèmes d’optimisation mono et multi-objectif: Application à la production d’énergie. Directeur,” Thèse de doctorat, Ecole Doctorale EDSPI, 2015.
 - [28] M. Hamed, “Dispatching Economique Dynamique par Utilisation de Méthodes d’Optimisation globales,” Mémoire de Master, Université Mohamed Khider, Biskra 2013.
 - [29] M. A. Mellal and E. Zio, “An adaptive particle swarm optimization method for multi-objective system reliability optimization,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part O J. Risk Reliab.*, 2019. Doi : 10./
 - [30] C. Coutel, “Contribution methodologique à la conception sous contraintes de dispositifs electromagnetiques,” Thèse de doctorat, Institut national de polytechnique de Grenoble, 1999.
 - [31] D. Ilea, “Conception optimale des moteurs à réluctance variable à commutation électronique pour la traction des véhicules électriques légers,” Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, pp. 1–161, 2011.
 - [32] P. Chootinan and A. Chen, “Constraint handling in genetic algorithms using a gradient-based repair method,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 33, no. 8, pp. 2263–2281, 2006.
 - [33] G. Pita, “Application de techniques de commande avancées dans le domaine automobile,” Thèse de doctorat, Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l’Information des Télécommunications et des Systèmes » p. 214, 2011.
 - [34] J. Matos, R. P. V. Faria, I. B. R. Nogueira, J. M. Loureiro, and A. M. Ribeiro, “Optimization strategies for chiral separation by true moving bed chromatography using Particles Swarm Optimization (PSO) and new Parallel PSO variant,” *Comput. Chem. Eng.*, pp. 344–356, 2019.
 - [35] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, “Grey Wolf Optimizer,” *Adv. Eng.*

- Softw.*, vol. 69, pp. 46–61, 2014.
- [36] G. M. Komaki and V. Kayvanfar, “Grey Wolf Optimizer algorithm for the two-stage assembly flow shop scheduling problem with release time,” *J. Comput. Sci.*, vol 8, pp, 109-120, 2015.
 - [37] M. A. Mellal and E. J. Williams, “A Survey on Ant Colony Optimization, Particle Swarm Optimization, and Cuckoo Algorithms,” pp. 37–51, 2017.
 - [38] A. Abbaci, C. Malti, “Gestion de la qualité de service dans un réseau radio cognitive en utilisant l'algorithme FireFly,” Mémoire de Master, Université Faculté des sciences Abou bakr Belkaid de Tlemcen, 2015.
 - [39] X. S. Yang, “Flower pollination algorithm for global optimization,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 7445 LNCS, pp. 240–249, 2012.
 - [40] A. K. Kar, “Bio inspired computing - A review of algorithms and scope of applications,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 59, no. June, pp. 20–32, 2016.
 - [41] M. Karakoyun and A. Babalik, “Data Clustering with Shuffled Leaping Frog Algorithm (SFLA) for Classification,” 2015.
 - [42] N. Yusup, A. M. Zain, and S. Z. M. Hashim, “Evolutionary techniques in optimizing machining parameters: Review and recent applications (2007-2011),” *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 10, pp. 9909–9927, 2012.
 - [43] A. Collignan, “Méthode d’optimisation et d’aide à la decision en conception mécanique : application à une structure aéronautique,” vol. 1, no. Ed 209, pp. 1–211, 2011.
 - [44] I. Sancaktar, B. Tuna, and M. Ulutas, “Inverse kinematics application on medical robot using adapted PSO method,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 21, no. 5, pp. 1006–1010, 2018.
 - [45] C. L. Huang, “A particle-based simplified swarm optimization algorithm for reliability redundancy allocation problems,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 142, pp. 221–230, 2015.

- [46] S. Zhu *et al.*, “Two-step-hybrid model based on data preprocessing and intelligent optimization algorithms (CS and GWO) for NO₂ and SO₂ forecasting,” *Atmos. Pollut. Res.*, no. December 2018, pp. 1–10, 2019.
- [47] S. Padhy, S. Panda, and S. Mahapatra, “A modified GWO technique based cascade PI-PD controller for AGC of power systems in presence of Plug in Electric Vehicles,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 20, no. 2, pp. 427–442, 2017.
- [48] K. P. S. Rana, V. Kumar, N. Sehgal, and S. George, “A Novel [Formula presented] feedback based control scheme using GWO tuned PID controller for efficient MPPT of PEM fuel cell,” *ISA Trans.*, 2019.
- [49] A. Mohapatra, B. Nayak, and K. B. Mohanty, “Parameter estimation of single diode PV module based on Nelder-Mead optimization algorithm,” *World J. Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 70–81, 2018.
- [50] E. Vol, E. Science, G. Britain, P. Engineering, and M. Ohsawa, “‘Single Species;’
,’ *Science (80-.)*, vol. 30, no. 4, pp. 871–882, 1996.
- [51] A. McNeill, J. Haberl, M. Holzner, R. Schoeneburg, T. Strutz, and U. Tautenhahn, “Current Worldwide Side Impact Activities – Divergence Versus Harmonisation and the Possible Effect on Future Car Design,” *19th Int. Tech. Conf. Enhanc. Saf. Veh.*, vol. Paper numb, 2005.
- [52] L. Gu, R. J. Yang, C. H. Tho, M. Makowskit, O. Faruquet, and Y. Li, “Optimisation and robustness for crashworthiness of side impact,” *Int. J. Veh. Des.*, vol. 26, no. 4, p. 348, 2005.
- [53] B. D. Youn and K. K. Choi, “A new response surface methodology for reliability-based design optimization,” *Comput. Struct.*, vol. 82, no. 2–3, pp. 241–256, 2004.