

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



**Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique**

Mémoire de Master

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

**Filière : Génie mécanique
Spécialité : Energétique**

THEME

**Modélisation d'un moteur diesel alimenté par des mélanges
de carburants Diesel – Biodiesel à base d'huile de cuisson
usagée**

Présenté par :

Mr. BELKOUK Mohamed

Promotrice :

M^{me}. MOUGARI Nour Elislam

Promotion 2023 - 2024

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à **Dieu**, le Tout-Puissant, pour m'avoir donné la force, la patience et la sagesse nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa grâce et Ses bénédictions, rien de tout cela n'aurait été possible.

Je souhaite également adresser mes plus sincères remerciements à mon encadreuse, **Mme Mougari Nour El-Islam**, pour sa guidance inestimable, son soutien constant et ses conseils avisés tout au long de ce projet. Son dévouement et son expertise ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à remercier **Mr. Djamel Eddine Gheri**, son époux, pour son soutien indéfectible et ses encouragements. Leur collaboration et leur aide précieuse ont grandement contribué à la qualité de ce travail.

Enfin, je voudrais exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin dans ce projet, que ce soit par leurs encouragements, leurs conseils ou leur assistance. Vos contributions ont été d'une grande valeur, et je vous en suis profondément reconnaissant.

Dédicace

Je dédie ce travail **à la mémoire de mon père**, dont l'âme bienveillante et la sagesse continuent de guider mes pas chaque jour. Son absence est une source de tristesse infinie, mais son amour et son héritage vivent en moi, me donnant la force de poursuivre mes rêves.

À ma mère, dont l'amour, le courage et les sacrifices ont été ma source d'inspiration et de force tout au long de mon parcours.

À ma famille, pour leur soutien indéfectible, leur amour et leur compréhension qui ont été des piliers essentiels dans cette aventure.

À mes amis, pour leur amitié sincère, leur soutien moral et leurs encouragements constants.

Résumé

Dans un contexte de recherche constante de solutions énergétiques durables et respectueuses de l'environnement. Ce travail explore l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA) et des algorithmes génétiques (AG) pour prédire les performances et les émissions d'un moteur diesel alimenté par des mélanges de diesel et de biodiesel dérivé d'huile de cuisson usagée. Deux modèles RNA distincts ont été développés : le premier prédit les paramètres de performance du moteur (rendement thermique, consommation spécifique de carburant, couple et puissance), et le second prédit les caractéristiques d'émission (monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, hydrocarbures, oxydes d'azote et opacité des fumées). Les résultats montrent une forte corrélation entre les valeurs prédites et les données expérimentales, avec des coefficients de corrélation linéaire élevés, indiquant une précision et une robustesse significatives des modèles. L'intégration de l'AG aux modèles RNA a permis d'optimiser leurs configurations, prouvant l'efficacité de l'approche hybride AG-RNA pour des modèles plus performants et robustes. Cette recherche apporte une contribution importante à la compréhension et à l'amélioration des moteurs alimentés par des biocarburants, offrant des perspectives prometteuses pour des applications futures dans la conception de moteurs plus efficaces et écologiques.

Mots clés : Algorithme génétique ; Biodiesel ; Moteur diesel ; Prédiction ; Réseaux de neurones artificiels.

Abstract

In the constant search for sustainable and environmentally friendly energy solutions. This work explores the use of artificial neural networks (ANN) and genetic algorithms (GA) to predict the performance and emissions of a diesel engine fueled by blends of diesel and biodiesel derived from used cooking oil. Two distinct ANN models were developed: the first predicts the engine performance parameters (thermal efficiency, specific fuel consumption, torque, and power), and the second predicts the emission characteristics (carbon monoxide, carbon dioxide, hydrocarbons, nitrogen oxides, and smoke opacity). The results show a strong correlation between the predicted values and the experimental data, with high linear correlation coefficients, indicating significant accuracy and robustness of the models. The integration of GA with the ANN models allowed for the optimization their architectures, demonstrating the effectiveness of the hybrid GA-ANN approach for more robust and efficient models. This research makes an important contribution to the understanding and improvement of engines powered by biofuels, offering promising prospects for future applications in designing more efficient and eco-friendly engines.

Keywords: Artificial neural networks; Biodiesel; Diesel engine; Genetic algorithm; Prediction.

ملخص

في إطار البحث المستمر عن حلول الطاقة المستدامة والصديقة للبيئة. يستكشف هذا العمل استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية والخوارزميات الجينية للتنبؤ بأداء وانبعثات محرك الديزل الذي يعمل بمزيج من الديزل والديزل الحيوي المشتق من زيت الطهي المستخدم. تم تطوير نموذجين متميزين للشبكات العصبية الاصطناعية: الأول يتنبأ بمعاملات أداء المحرك (الكفاءة الحرارية، استهلاك الوقود النوعي، عزم الدوران، والطاقة)، والثاني يتنبأ بخصائص الانبعاثات (أول أكسيد الكربون، وثاني أكسيد الكربون، والهيدروكربونات، وأكاسيد النيتروجين، وعتامة الدخان). وأظهرت النتائج وجود علاقة قوية بين القيم المتوقعة والبيانات التجريبية، مع وجود معاملات ارتباط خطية عالية، مما يشير إلى دقة كبيرة ومتانة النماذج. إن دمج الخوارزمية الجينية مع نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية سمح بتحسين بنيتها، مما يدل على فعالية الخوارزمية الجينية الهجينة مع نهج الشبكات العصبية الاصطناعية للحصول على نماذج أكثر قوة وكفاءة. يقدم هذا البحث مساهمة مهمة في فهم وتحسين المحركات التي تعمل بالوقود الحيوي، مما يوفر آفاقاً واعدة للتطبيقات المستقبلية في تصميم محركات أكثر كفاءة وصديقة للبيئة.

الكلمات المفتاحية: الخوارزمية الجينية؛ وقود الديزل الحيوي؛ محرك الديزل؛ التنبؤ؛ الشبكات العصبية الاصطناعية.

Sommaire

REMERCIEMENTS

DEDICACE

NOMENCLATURE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE

1

CHAPITRE 01

GENERALITES SUR LES MOTEURS DIESEL ET LE BIODIESEL

1.1. INTRODUCTION	4
1.2. MOTEUR DIESEL	4
1.2.1. DEFINITION	4
1.2.2. COMPOSANTS ESSENTIELS D'UNE MOTEUR DIESEL	5
1.2.2.1. Piston	5
1.2.2.2. Bielle	5
1.2.2.3. Vilebrequin	6
1.2.2.4. Arbre à cames	6
1.2.2.5. Injecteurs	7
1.2.2.6. Soupapes d'admission et d'échappement :	7
1.2.2.7. Culasse :	8
1.2.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES MOTEURS DIESEL	8
1.2.3.1. Moteurs à quatre temps	9
1.2.3.2. Moteurs à deux temps :	9
1.2.4. CLASSIFICATION DES MOTEURS DIESEL	10
1.2.4.1. Moteur à injection directe	10
1.2.4.2. Moteur à injection indirecte	10
1.2.5. CARBURANT POUR LES MOTEURS DIESEL	11
1.2.6. PARAMETRES DE PERFORMANCE D'UN MOTEUR DIESEL	11
1.2.6.1. Rendement thermique (Brake thermal efficiency BTE)	11
1.2.6.2. Consommation de carburant spécifique	12
1.2.6.3. Couple moteur (C)	12
1.2.6.4. Puissance indiquée (Brake Power BP)	13
1.2.7. CARACTERISTIQUES D'EMISSION D'UN MOTEUR DIESEL [4]	14
1.2.7.1. Monoxyde de carbone (CO)	14
1.2.7.2. Hydrocarbures (HC)	15

1.2.7.3. Particules (PM)	15
1.2.7.4. Oxydes d'azote (NOx)	16
1.2.8. PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES MOTEURS DIESEL	16
1.3. BIODIESEL	17
1.3.1. DEFINITION ET PROPRIETE	17
1.3.2. PROPRIETES DU BIODIESEL	17
1.3.3. SOURCES DE PRODUCTION DE BIODIESEL	18
1.3.4. LES PROCEDER DE PRODUCTION	19
1.3.4.1. Transestérification	19
1.3.4.2. Estérification directe	19
1.3.5. FONCTIONNEMENT DE MOTEUR DIESEL AVEC LE BIODIESEL	20
1.3.6. PRODUCTION MONDIALE DE BIODIESEL	21
1.3.7. PRODUCTION DE BIODIESEL EN ALGERIE	22
1.4. CONCLUSION	23

CHAPITRE 02

TECHNIQUE D'INTELLIGENCE ARTIFICIEL ET ETAT DE L'ART

2.1. INTRODUCTION	24
2.2. RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS	24
2.2.1. DEFINITION	24
2.2.2. NEURONES ARTIFICIELS ET LES NEURONES BIOLOGIQUE	24
2.2.3. STRUCTURE DES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS	25
2.2.4. TYPES DE RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS	26
2.2.4.1. Réseaux Feed forward	26
2.2.4.2. Réseaux récurrents :	28
2.2.5. FONCTION D'ACTIVATION :	29
2.2.6. APPRENTISSAGE :	30
2.2.6.1. Apprentissage supervisé :	30
2.2.6.2. Apprentissage semi-supervisé :	30
2.2.6.3. Apprentissage non supervisé :	30
2.3. ALGORITHME GENETIQUE (GA)	31
2.3.1. PRINCIPE DE BASE	31
2.3.2. OPERATEURS GENETIQUES	31
2.4. APPLICATION DES RNA POUR LA MODELISATION DES MOTEURS	33
2.4. CONCLUSION	37

CHAPITRE 03

PREDICTION DES PARAMETRES DE PERFORMANCES ET DES CARACTERISTIQUES D'EMISSION DU MOTEUR DIESEL.

3.1. INTRODUCTION	38
3.2. COLLECTES DES DONNEES :	38
3.3. NORMALISATION DE LA BASE DE DONNEES	43

3.4. MODELES BASES SUR LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS	46
3.4.1. METHODE 01 « ESSAIS ET ERREURS (TRIALS AND ERROR) »	46
3.4.2. METHODE 02 « ELABORATION D’UN CODE POUR UN MODELE HYBRIDE AG-RNA »	47
3.5. INDICATEURS DE PERFORMANCES	49

CHAPITRE 04

RESULTAT ET DISCUSSION

4.1 ARCHITECTURE DES MODELES DEVELOPPES	50
4.1.1 METHODE 1 : ESSAI ET ERREUR “TRIAL AND ERROR” (TOOLBOX NNTOOL)	50
4.1.1. METHODE 2 : MODELE HYBRIDE AG-RNA	51
4.2. RESULTATS DE REGRESSION	54
4.3. COMPARAISON DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET PREDITS PAR AG-RNA	58
4.5 CONCLUSION	63

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIE

Nomenclature

Letters	Signification
η_{Therm} (%)	Rendement Thermique
W (J)	Travail
Q (J)	Quantité de chaleur
V (m ³)	Volume
P (Pa)	Pression
BSFC (kg/kWh)	Brake Specific Fuel Consumption
BTE (%)	Brake Thermal efficiency
BP (kW)	Brake Power
CO	Monoxyde de Carbon
CO ₂	Dioxyde de Carbon
NO	Monoxyde d'Azote
HC	Hydrocarbonds
RNA	Réseaux de neurones artificiel
AG	Algorithme Génétique
PC (kJ/kg)	Pouvoir calorifique
BSEC (kg/kWh)	Brake Specific Energy Consumption
EGT (k)	Exhaust Gas Temperature
MSE	Mean Squared Error
R ²	Coefficient de détermination
WCO	Waste Cooking Oil
MLP	Multi-Layer Perceptron
IA	Intelligence artificielle
LM	Levenberg-Marquardt
ANN	Artificial Neural Network
GA	Genetic Algorithm

Liste des figures

Figure 1.1	Moteur Diesel.	4
Figure 1.2	Piston.	5
Figure 1.3	Bielle.	6
Figure 1.4	Vilebrequin.	6
Figure 1.5	Arbre à cames.	7
Figure 1.6	Injecteur de carburant.	7
Figure 1.7	Soupape.	7
Figure 1.8	Culasse.	8
Figure 1.9	Fonctionnement de moteur à quatre temps.	9
Figure 1.10	Composition des gaz d'échappement des moteurs diesel.	14
Figure 1.11	Répartition du volume de la production mondiale de biodiesel selon les pays en 2022.	22
Figure 2.1	Neurone biologique.	25
Figure 2.2	Neurone artificiel.	25
Figure 2.3	Structure d'un réseau de neurones artificiels.	26
Figure 2.4	Architecture d'un perceptron monocouche.	27
Figure 2.5	Architecture du perceptron multicouche (MLP).	27
Figure 2.6	Réseau de neurones récurrent.	28
Figure 2.7	Organigramme de l'AG.	32
Figure 3.1	Variations des performances du moteur pour les mélanges biodiesel-diesel.	39
Figure 3.2	Variations des émissions du moteur pour les mélanges biodiesel-diesel.	40
Figure 3.3	Évolution des performances du moteur.	41
Figure 3.4	Évolution des émissions de gaz d'échappement.	42
Figure 3.5	Valeur des performances du moteur après la normalisation.	44
Figure 3.6	Valeur normaliser des émissions de gaz d'échappement.	45
Figure 3.7	Organigramme de GA-ANN hybride pour l'optimisation de la distribution de l'ensemble de données, du nombre de couches cachées, des neurones de couche cachée et de la fonction de transfert.	48

Figure 4.1	Architecture du modèle RNA pour la prédiction des paramètres de performances du moteur diesel.	53
Figure 4.2	Architecture du modèle RNA pour la prédiction des caractéristiques d'émission du moteur diesel.	53
Figure 4.3	Changements du MSE avec le nombre d'époques au cours du processus d'apprentissage : prédiction des paramètres de performance.	54
Figure 4.4	Changements du MSE avec le nombre d'époques au cours du processus d'apprentissage : Prédiction des émissions.	55
Figure 4.5	Graphiques de régression du RNA pour la prédiction des paramètres de performance.	56
Figure 4.6	Graphiques de régression du RNA pour la prédiction des caractéristiques d'émissions.	57
Figure 4.7	Comparaison entre Rendement thermique (BTE) produit expérimentalement et prédit par le modèle AG-RNA	59
Figure 4.8	Comparaison entre consommation de carburant spécifique de carburant (BSFC) produite expérimentalement et prédite par le modèle AG-RNA	59
Figure 4.9	Comparaison entre le couple du moteur produite expérimentalement et prédite par le modèle AG-RNA	60
Figure 4.10	Comparaison entre la puissance de moteur produit expérimentalement et prédit par le modèle AG-RNA	60
Figure 4.11	Comparaison entre les émissions de CO produites expérimentalement et prédites par le modèle AG-RNA	61
Figure 4.12	Comparaison entre les émissions de CO ₂ produites expérimentalement et prédites par le modèle AG-RNA	61
Figure 4.13	Comparaison entre les émissions de NO _x produites expérimentalement et prédites par le modèle AG-RNA	62
Figure 4.14	Comparaison entre les émissions de NO _x produites expérimentalement et prédites par le modèle AG-RNA	62
Figure 4.15	Comparaison entre les émissions de fumée produites expérimentalement et prédites par le modèle AG-RNA	63

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Fonction d'activation couramment utilisées.	28
Tableau 2.2	Etat de l'art.	33
Tableau 3.1	Échantillons de carburant et composition des mélanges.	37
Tableau 3.2	Paramètres du GA pour l'optimisation de l'architecture ANN et ANFIS.	44
Tableau 4.1	Résultats de la méthode Essais et Erreur pour la prédiction des paramètres de performance.	48
Tableau 4.2	Résultats de la méthode Essais et Erreur pour la prédiction de caractéristiques d'émissions.	49
Tableau 4.3	Résultats après l'excursion de code pour déterminer l'architecture optimale des réseaux de neurones artificiels (RNA) en vue de prédire les paramètres de performance et les caractéristiques d'émission.	49
Tableau 4.4	L'architecture optimale du RNAs qui présente une prédiction précise des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission.	50
Tableau 4.5	Valeurs de R pour la prédiction des deux modèles prédictifs.	56

Introduction générale

Introduction générale

Les dommages causés à l'environnement par les niveaux d'émission élevés des moteurs diesel ainsi que la diminution des réserves de combustibles fossiles ont accéléré la recherche de carburants alternatifs.

Les biocarburants sont l'un des carburants alternatifs les plus remarquables aux carburants conventionnels en raison de leurs caractéristiques de carburant parallèles aux combustibles fossiles. Parmi ces biocarburants, le biodiesel s'est avéré un carburant alternatif approprié pour les moteurs diesel en raison de ses nombreux avantages. C'est un carburant durable qui produit moins d'émissions de gaz à effet de serre, ce qui contribue à réduire l'impact environnemental des moteurs diesel. Il est compatible avec la conception diesel existante, nécessitant des modifications minimales du moteur. Il possède également de bonnes propriétés lubrifiantes, ce qui peut prolonger la durée de vie des moteurs. En outre, il peut être produit à partir de diverses sources de matières premières, telles que les huiles végétales et les graisses animales, ce qui permet une flexibilité dans la production et l'approvisionnement. Ces avantages font du biodiesel une option de carburant attrayante pour les moteurs diesel, tant du point de vue environnemental qu'économique.

Déterminer l'adéquation du biodiesel produit à une utilisation dans les moteurs diesel nécessite des expérimentations approfondies. Compte tenu de la multitude de paramètres moteur, notamment pour les véhicules utilisés au quotidien, un nombre important de tests sont indispensables. Ces expériences sont essentielles pour évaluer les performances, l'efficacité et les émissions du biodiesel dans diverses conditions de fonctionnement. En menant une gamme complète d'expériences, les chercheurs peuvent obtenir des données précieuses pour affiner les formulations de biodiesel et les configurations des moteurs.

Comme ces expériences peuvent prendre du temps et être coûteuses, les chercheurs se tournent de plus en plus vers les simulations informatiques et les applications de modélisation. Ces outils leur permettent d'obtenir des résultats d'une grande précision tout en réduisant considérablement le nombre d'expériences physiques nécessaires. De plus, la disponibilité limitée et le coût élevé de certaines matières premières utilisées pour la production de biodiesel rendent peu pratique la réalisation d'un nombre excessif d'expériences.

Bien qu'il existe de nombreux outils informatiques disponibles pour l'étude et l'optimisation des moteurs diesel, les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont devenus les

plus populaires et les plus largement utilisés. Les RNA sont particulièrement bien adaptés à cette application en raison de leur capacité à modéliser des relations complexes et non linéaires entre les paramètres d'entrée et de sortie, caractéristiques du comportement des moteurs diesel, sans connaissance préalables des phénomènes physiques impliqués dans leur fonctionnement.

Notre travail vise à développer deux modèles RNA pour prédire les paramètres de performance et les caractéristiques d'émission d'un moteur diesel alimenté par des mélanges de diesel et de biodiesel dérivé d'huile de cuisson usagée. Le premier modèle utilise le rapport du mélange biodiesel/diesel et la vitesse de rotation comme entrées pour prédire des paramètres de performance tels que le rendement thermique (BTE), la consommation spécifique de carburant (BSFC), le couple moteur et la puissance. Le deuxième modèle prévoit les émissions de monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂), les hydrocarbures (HC), les oxydes d'azote NO_x et l'opacité des fumées.

Cette approche basée sur les RNA permet une compréhension approfondie de la capacité de ces réseaux à modéliser de tels systèmes et à améliorer les prédictions à partir des données expérimentales disponibles. Pour de meilleures performances, les modèles RNA sont couplé avec l'algorithme génétique (AG), un outil d'optimisation, pour déterminer la configuration optimale pour une meilleure capacité de prédiction. Les résultats de cette modélisation permettront une conception et un contrôle plus efficaces des moteurs diesel.

Le présent mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente le principe de fonctionnement des moteurs diesel, ainsi qu'une introduction au biodiesel et à son utilisation, incluant la production mondiale et locale.

Le deuxième chapitre donne un aperçu des techniques d'intelligence artificielle utilisées dans ce travail, en détaillant les réseaux de neurones artificiels et l'algorithme génétique. Il se conclut par une revue des travaux relatifs à l'application de ces techniques pour la modélisation, le contrôle et l'optimisation des moteurs utilisant des mélanges diesel-biodiesel.

Le troisième chapitre traite le développement des modèles hybrides basés GA-RNA pour la prédiction des paramètres de performance et des caractéristiques d'émissions du moteur diesel alimenté par des mélanges de biodiesel extrait d'huile de cuisson usagée avec du diesel en utilisant deux méthodes différent.

Le quatrième chapitre présente et discute les résultats obtenus par les deux méthodes, identifiant l'architecture optimale des RNA pour une prédiction précise des paramètres de performance et des caractéristiques d'émission.

Chapitre 01

Généralités sur les moteurs diesel et le biodiesel

Chapitre 01 : Généralités sur les moteurs diesel et le biodiesel

1.1. Introduction

Les moteurs diesel alimentés au biodiesel ont connu une croissance significative à l'échelle mondiale, motivée par des préoccupations croissantes en matière d'environnement. Dans ce chapitre, nous approfondissons ce phénomène, en commençant par un examen des moteurs diesel : leurs principes de fonctionnement, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Par la suite, nous introduisons le biodiesel, élucidant ses caractéristiques et explorant sa production à l'échelle internationale et nationale.

1.2. Moteur Diesel

1.2.1. Définition

Le moteur diesel (**figure 1.1**), nommé d'après Rudolf Diesel [1], est un moteur à combustion interne dans lequel l'air est comprimé à une température suffisamment élevée pour enflammer le carburant diesel injecté dans le cylindre, où la combustion et l'expansion actionnent un piston. Il convertit l'énergie chimique stockée dans le carburant en énergie mécanique, qui peut être utilisée pour propulser des camions de marchandises, de gros tracteurs, des locomotives et des navires. Un nombre limité d'automobiles sont également équipées d'un moteur diesel, de même que certains groupes électrogènes.



Figure 1.1: Moteur diesel.

1.2.2. Composants essentiels d'une moteur diesel

1.2.2.1. Piston

Le piston (**figure 1.2**) est l'un des principaux acteurs des moteurs diesel. La fonction du piston est d'ajuster le volume à l'intérieur du cylindre. Lorsque le piston descend, le volume du cylindre augmente et lorsque le piston monte, le volume du cylindre diminue.

Chaque piston comporte trois pièces centrales supplémentaires qui sont attachées :

- **Segment de compression** : L'objectif de ces anneaux est de maintenir la compression pendant la course de compression du cycle. Ce segment est placé entre la paroi du piston et la chemise.
- **Segment d'huile** : l'anneau d'huile se trouve sous l'anneau de compression. Il a pour but d'empêcher l'huile moteur de pénétrer dans la chambre de compression.
- **Axe de piston** : l'axe de piston est la pièce qui relie le piston à la bielle. Cet axe tubulaire sert de charnière pour faciliter le fonctionnement du piston et de la bielle.



Figure 1.2 : Piston.

1.2.2.2. Bielle

La bielle (**figure 1.3**) est généralement abrégée en « con-rod ». Le mécanisme de bielle du vilebrequin transforme le mouvement alternatif en mouvement rotatif. La bielle relie le piston au vilebrequin pour transférer la pression de combustion au maneton.



Figure 1.3 : Bielle.

1.2.2.3. Vilebrequin

Le vilebrequin est la pièce la plus importante du moteur car il relie les pièces entre elles et permet au moteur de produire de la puissance (**figure 1.4**). Son rôle est de transformer le mouvement linéaire (de haut en bas) des pistons en mouvement de rotation. Une extrémité du vilebrequin est reliée à l'arbre à cames par l'intermédiaire d'une courroie de distribution. L'autre extrémité est reliée au volant moteur, qui régule la puissance sortant du moteur, un peu comme un parasurtenseur pour votre ordinateur.



Figure 1.4 : Vilebrequin.

1.2.2.4. Arbre à cames

Un arbre à cames (**figure 1.5**) est un dispositif qui gère la synchronisation du moteur. Le rôle de l'arbre à cames est de réguler le moment où le carburant entre dans le moteur et celui où les gaz d'échappement en sortent. Cette tâche apparemment simple peut avoir un effet considérable sur les performances du moteur.



Figure 1.5 : Arbre à cames.

1.2.2.5. Injecteurs

L'objectif d'un injecteur de carburant (**figure 1.6**) est de pulvériser le carburant. Cela signifie que le carburant liquide est transformé en brouillard, ce qui augmente considérablement sa surface. Cela permet au carburant de brûler plus rapidement, ce qui donne une plus grande impulsion au piston. Les injecteurs de carburant constituent une amélioration par rapport aux carburateurs parce qu'ils nécessitent moins d'entretien et qu'ils atomisent mieux le carburant. L'injection de carburant permet d'améliorer le rendement du moteur, ce qui peut se traduire par une augmentation de la puissance et un meilleur rendement énergétique.



Figure 1.6 : Injecteur de carburant.

1.2.2.6. Soupapes d'admission et d'échappement :

Les soupapes d'admission (**figure 1.7**) permettent à l'air d'entrer dans le cylindre pendant la course d'admission, tandis que les soupapes d'échappement permettent aux gaz d'échappement de sortir pendant la course d'échappement. Le calage et le fonctionnement de ces soupapes sont essentiels aux performances du moteur.



Figure 1.7 : Soupape.

1.2.2.7. Culasse :

La culasse (**figure 1.8**) est un ensemble de trois pièces composé d'un élément inférieur qui contient les passages de gaz, sert de support aux soupapes d'injection et à la bougie d'allumage, et fait partie de la chambre de combustion. La culasse elle-même est un élément en forme de piston retenu par une bride fixée par huit vis à l'élément inférieur. La culasse est étanche aux fuites de gaz grâce à un joint à lèvre métallique. Cette configuration permet de modifier expérimentalement la forme de la chambre de combustion en substituant un insert relativement peu coûteux au lieu de changer la culasse complète. La conception favorise également l'isolation thermique de la culasse par rapport au cylindre. L'isolation est nécessaire parce que la culasse n'est pas refroidie pour réduire le rejet de chaleur et améliorer l'efficacité du moteur, mais le cylindre doit être refroidi à des températures compatibles avec les lubrifiants disponibles.



Figure 1.8 : Culasse.

1.2.3. Principe de fonctionnement des moteurs diesel

Contrairement aux moteurs à essence, qui utilisent une étincelle pour enflammer le mélange air-carburant, les moteurs diesel n'introduisent que de l'air dans la chambre de combustion lors de la course d'admission. Ils fonctionnent avec des taux de compression élevés, compris entre **14 :1 et 22 :1** [2], et peuvent être à deux temps ou à quatre temps, en fonction du diamètre des cylindres. Le moteur diesel utilise la compression de l'air pour chauffer celui-ci à une température supérieure au point d'auto-inflammation du carburant, ce qui déclenche la combustion lors de l'injection du carburant. L'injection de carburant se fait sous haute pression dans la chambre de combustion, généralement de manière directe. Le contrôle précis de l'injection de carburant est essentiel pour les performances du moteur. La combustion dans un moteur diesel est un processus hétérogène, ce qui souligne l'importance de la vaporisation rapide du carburant dans l'air pour une combustion complète. Le travail du moteur est généré

Chapitre 01 : Généralités sur les moteurs diesel et le biodiesel

pendant la course de puissance, qui comprend la combustion et l'expansion des gaz brûlants. Les moteurs diesel sont souvent équipés de turbocompresseurs et de systèmes de refroidissement pour améliorer leurs performances.

1.2.3.1. Moteurs à quatre temps

Comme un moteur à essence, un moteur diesel fonctionne normalement en répétant un cycle de quatre étapes ou courses (**figure 1.9**) au cours desquelles le piston monte et descend deux fois pendant le cycle (en d'autres termes, le vilebrequin tourne deux fois).

- **Admission** : L'air est aspiré dans le cylindre par la soupape d'admission d'air verte ouverte à droite lorsque le piston descend.
- **Compression** : La soupape d'admission se ferme, le piston remonte, comprimant et chauffant le mélange d'air. Le carburant (bleu foncé) est injecté dans le gaz chaud par la soupape d'injection centrale et s'enflamme spontanément. Contrairement à un moteur à essence, aucune bougie d'allumage n'est nécessaire.
- **Explosion-détente** : Lorsque le mélange air-carburant s'enflamme et brûle, il pousse le piston vers le bas et entraîne le vilebrequin, qui transmet la puissance aux roues.
- **Échappement** : La soupape d'échappement verte à gauche s'ouvre pour libérer les gaz d'échappement expulsés par le piston qui revient.

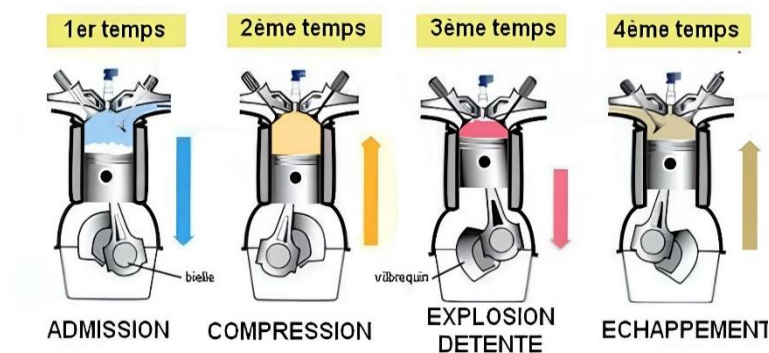


Figure 1.9 : Fonctionnement de moteur à quatre temps.

1.2.3.2. Moteurs à deux temps :

Dans un moteur diesel à deux temps, le cycle complet se produit avec le piston qui monte et descend une seule fois. En réalité, il y a trois phases dans un cycle à deux temps, ce qui peut prêter à confusion :

Chapitre 01 : Généralités sur les moteurs diesel et le biodiesel

- **Échappement et admission** : L'air frais est soufflé sur le côté du cylindre et pousse les anciens gaz d'échappement à travers les soupapes situées en haut du cylindre.
- **Compression** : Les soupapes d'admission et d'échappement se ferment. Le piston monte, comprimant et chauffant l'air. Lorsque le piston atteint le sommet du cylindre, le carburant est injecté et s'enflamme spontanément.
- **Détente** : Lorsque le mélange air-carburant s'enflamme, il pousse le piston vers le bas et entraîne le vilebrequin, qui transmet la puissance aux roues.

Les moteurs à deux temps sont plus petits et plus légers que les moteurs à quatre temps et tendent à être plus efficaces parce qu'ils produisent de l'électricité une fois par révolution (plutôt qu'une fois toutes les deux révolutions comme un moteur à quatre temps). Cela signifie qu'ils nécessitent davantage de refroidissement et de lubrification et qu'ils sont sujets à une plus grande usure.

1.2.4. Classification des moteurs diesel

Selon le type d'injection, les moteurs diesel sont classés en deux grandes familles :

1.2.4.1. Moteur à injection directe

Le principe de ce système est relativement simple : le carburant est directement injecté dans le cylindre (ou chambre de combustion) en temps voulu. Ce type d'injection permet de garder l'admission plus propre. En effet, la quantité de carburant injectée est plus contrôlée du fait qu'il s'agit d'un système électronique.

Ce système limite les émissions polluantes et améliore les performances, autrement dit augmente le couple lors des passages en bas régime.

1.2.4.2. Moteur à injection indirecte

Les injecteurs sont placés après la soupape d'admission. Ils débouchent dans une préchambre directement reliée à la chambre de combustion. La compression de l'air au-dessus du piston se fait puis le gazole est vaporisé dans cette chambre. Ainsi, cela produit une précombustion au contact de l'air chauffant à 400 °C. Enfin, la combustion complète se fait dans la chambre de combustion. Les bougies de préchauffage ne sont alors plus utiles dans le cas d'une injection indirecte. En effet, un moteur à injection indirecte démarrera plus facilement s'il n'y en a pas.

1.2.5. Carburant pour les moteurs diesel

Les produits pétroliers normalement utilisés comme carburant pour les moteurs diesel sont des distillats composés d'hydrocarbures lourds, avec au moins 12 à 16 atomes de carbone par molécule. Ces distillats plus lourds sont extraits du pétrole brut après que les parties les plus volatiles utilisés dans l'essence ont été retirées. Le point d'ébullition de ces distillats lourds se situe entre 177 et 343 °C (351 et 649 °F) [3]. Leur température d'évaporation est donc beaucoup plus élevée que celle de l'essence, dont la molécule contient moins d'atomes de carbone. L'eau et les sédiments présents dans les carburants peuvent nuire au fonctionnement du moteur ; un carburant propre est essentiel à l'efficacité des systèmes d'injection. Les carburants à forte teneur en carbone sont mieux adaptés aux moteurs à faible vitesse de rotation. Il en va de même pour les carburants à forte teneur en cendres et en soufre. L'indice de cétane, qui définit la qualité d'allumage d'un carburant, est déterminé à l'aide de la norme ASTM D613 « Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil » [4].

1.2.6. Paramètres de performance d'un moteur diesel

1.2.6.1. Rendement thermique (Brake thermal efficiency BTE)

Le rendement thermique au frein, souvent abrégé en η_{therm} , est un indicateur crucial de l'efficacité énergétique d'un moteur. Il mesure la capacité d'un moteur à convertir l'énergie chimique contenue dans le carburant en travail mécanique utile. En d'autres termes, il représente le pourcentage de chaleur du carburant qui est effectivement converti en travail moteur, par opposition à la chaleur dissipée sous forme de chaleur résiduelle ou de chaleur perdue dans le système d'échappement.

La formule pour calculer le rendement thermique au frein est la suivante :

$$\eta_{\text{therm}} = \frac{BP}{\dot{m} \times PC} \times 100\% \quad (1.1)$$

Où:

BP : la puissance au frein (ou puissance indiquée) du moteur (W).

$\dot{m}$: le débit massique de carburant consommé par le moteur (kg/s).

PC : Pouvoir calorifique du carburant (J/kg).

Le rendement thermique au frein est généralement exprimé en pourcentage et varie en fonction

Chapitre 01 : Généralités sur les moteurs diesel et le biodiesel

de divers facteurs tels que la conception du moteur, le carburant utilisé, les conditions de fonctionnement et l'efficacité de la combustion. Il est essentiel pour évaluer et améliorer l'efficacité énergétique des moteurs, ce qui peut contribuer à réduire la consommation de carburant et les émissions de gaz à effet de serre.

1.2.6.2. Consommation de carburant spécifique

La consommation de carburant spécifique au frein (Brake specific fuel consumption BSFC) est une mesure clé utilisée pour évaluer l'efficacité des moteurs, en particulier des moteurs diesel. Elle mesure la quantité de carburant nécessaire pour produire une unité de puissance, généralement exprimée en grammes de carburant par kilowattheure (kg/kWh) [5].

La formule pour calculer la consommation de carburant spécifique au freinage (BSFC) est la suivante :

$$\text{BSFC} = \frac{\dot{m}_{\text{fuel}}}{BP} \quad (1.2)$$

Où :

BP : la puissance au frein (ou puissance indiquée) du moteur (kW).

$\dot{m}$: le débit massique de carburant consommé par le moteur (kg/s).

Des valeurs BSFC plus basses indiquent un meilleur rendement énergétique, ce qui signifie que le moteur consomme moins de carburant pour produire la même puissance. Différents facteurs influencent le BSFC, notamment la conception du moteur, les conditions de fonctionnement, l'efficacité de la combustion et les systèmes auxiliaires tels que les turbocompresseurs. Les moteurs diesel ont généralement des valeurs de BSFC inférieures à celles des moteurs à essence, en particulier dans des conditions de forte charge, en raison de leurs taux de compression plus élevés. Le contrôle du BSFC permet aux ingénieurs d'optimiser les performances du moteur en ajustant des paramètres tels que le rapport air-carburant, le calage de l'injection et la pression de suralimentation du turbocompresseur, ce qui permet de réduire la consommation de carburant et les émissions et d'améliorer l'efficacité globale.

1.2.6.3. Couple moteur (C)

Le couple moteur (C) est une force rotative produite par le vilebrequin d'un moteur, mesurée en newtons-mètres (Nm). Il permet au moteur de vaincre la résistance et de propulser

Chapitre 01 : Généralités sur les moteurs diesel et le biodiesel

le véhicule. La courbe de couple montre comment celui-ci varie en fonction du régime moteur. Un moteur peut avoir un couple bas ou haut de gamme, selon sa plage de régime de puissance maximale. La transmission joue un rôle essentiel dans la transmission du couple aux roues. En résumé, le couple moteur est crucial pour l'accélération, la capacité de remorquage et la conduite, et son optimisation est essentielle pour les performances globales du véhicule [5].

La formule pour calculer le couple moteur est la suivante :

$$C = \frac{BP}{N} \quad (1.3)$$

Où

BP : La puissance de sortie du moteur en watts (W), en kilowatts (kW) ou en chevaux (ch).

N : La Vitesse de rotation en tours par minute (RPM).

1.2.6.4. Puissance indiquée (Brake Power BP)

La puissance au frein, également appelée puissance indiquée, est la mesure de la puissance de sortie du moteur au vilebrequin. Elle représente la quantité de travail effectuée par le moteur par unité de temps et est généralement mesurée en unités telles que les kilowatts (kW) ou les chevaux (ch) [5].

La formule pour calculer la puissance au frein est :

$$BP = \frac{C \times N}{constant}$$

Où :

C : La force de rotation produite par le moteur en Newton-mètre (Nm).

N : La Vitesse de rotation en tours par minute (RPM).

Constant : C'est un facteur de conversion pour garantir que les unités sont cohérentes.

La puissance au frein représente la capacité du moteur à effectuer un travail, tel que déplacer un véhicule ou actionner une machine. C'est une métrique de performance clé utilisée pour évaluer l'efficacité et la capacité des moteurs diesel.

1.2.7. Caractéristiques d'émission d'un moteur diesel [4]

La combustion idéale du diesel ne produit que du CO₂ et de l'eau, mais en raison de plusieurs facteurs, cela ne se produit pas, et divers produits nocifs sont générés, notamment le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures (HC), les oxydes d'azote (NO_x) et les particules (PM).

La composition approximative des gaz d'échappement des moteurs diesel est présentée sur la **figure 1.10**. Les émissions de polluants ont un taux inférieur à 1 % dans les gaz d'échappement diesel. Les NO_x représentent la part la plus importante des émissions de polluants diesel, avec un taux de plus de 50 %. Après les émissions de NO_x, les particules représentent la deuxième part la plus importante des émissions de polluants. Les moteurs diesel étant des moteurs à combustion pauvre, la concentration de CO et de HC est minime. En outre, les émissions polluantes comprennent un peu de SO₂ en fonction des spécifications et de la qualité du carburant. Il est produit par les sulfates contenus dans le carburant diesel. À l'heure actuelle, il n'existe pas de système de post-traitement tel qu'un convertisseur catalytique pour éliminer le SO₂. Aujourd'hui, la plupart des distributeurs de pétrole et des clients préfèrent utiliser du diesel à très faible teneur en soufre (ULSD) pour les moteurs diesel afin d'éviter les effets nocifs du SO₂.

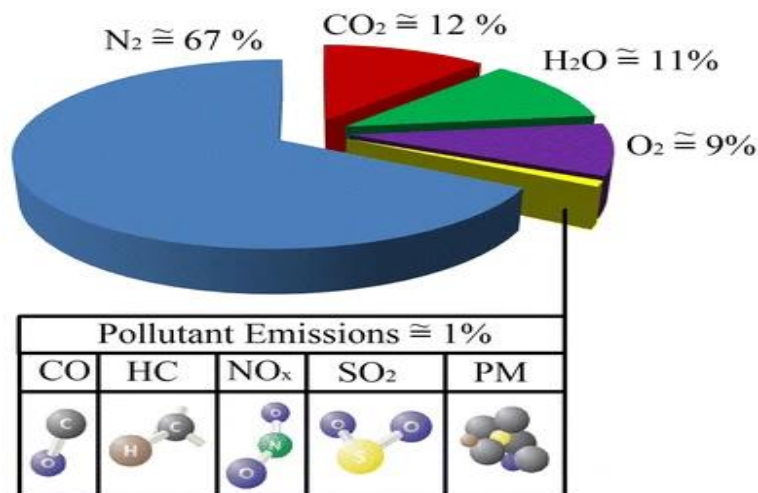


Figure 1.10 : Composition des gaz d'échappement des moteurs diesel.

1.2.7.1. Monoxyde de carbone (CO)

Le monoxyde de carbone (CO) est produit lors d'une combustion incomplète, favorisée

Chapitre 01 : Généralités sur les moteurs diesel et le biodiesel

par un rapport air-carburant riche ($\lambda < 1$), comme lors du démarrage ou de l'accélération des moteurs [6]. Les moteurs diesel, fonctionnant avec un rapport air-carburant pauvre ($\lambda > 1$), produisent moins de CO, mais des conditions spécifiques peuvent favoriser sa formation. Le CO est inodore et incolore. Inhalé, il se lie à l'hémoglobine, réduisant le transport d'oxygène et pouvant entraîner des symptômes d'asphyxie, tels que des troubles de la concentration et des réflexes.

1.2.7.2. Hydrocarbures (HC)

Les émissions d'hydrocarbures proviennent de carburants non brûlés, souvent à cause d'une température insuffisante près de la paroi du cylindre. Les moteurs diesel émettent généralement peu d'hydrocarbures, principalement à faible charge et en raison de mélanges pauvres. Les conditions de fonctionnement irrégulières, telles que des variations brusques du régime moteur ou une injection désordonnée, peuvent augmenter ces émissions. Les hydrocarbures non brûlés continuent de réagir dans les gaz d'échappement, réduisant leurs émissions à la sortie du tuyau. Les émissions d'hydrocarbures ne se limitent pas aux gaz d'échappement, mais incluent également les émanations du carter du moteur et du système d'alimentation en carburant. Ces émissions contribuent à la pollution de l'air et peuvent avoir des effets nocifs sur la santé humaine, notamment en contribuant à la formation de l'ozone troposphérique et en provoquant des irritations respiratoires et des cancers [6].

1.2.7.3. Particules (PM)

Les particules sont principalement composées de carbone, de carburant imbrûlé, d'huile lubrifiante imbrûlée, de sulfates, d'eau et de cendres. Elles sont généralement sphériques et ont un diamètre compris entre 15 et 40 nm, la plupart ayant un diamètre inférieur à 1 μm [6]. Les émissions de particules dépendent de facteurs tels que le processus de combustion, la qualité du carburant et de l'huile lubrifiante, ainsi que la température de combustion. Les émissions de particules diesel sont considérablement plus élevées que celles des moteurs à essence. Elles sont composées principalement de suie, de fraction organique soluble (SOF) et de fraction inorganique (IF). Ces émissions ont un impact sur la santé humaine, contribuant à des problèmes tels que l'asthme, le cancer du poumon et d'autres problèmes cardiovasculaires, ainsi qu'à la pollution de l'air, de l'eau et du sol, et au changement climatique mondial.

1.2.7.4. Oxydes d'azote (NOx)

Lorsque l'air comprimé et le carburant sont mélangés dans la chambre de combustion à des températures élevées, l'azote de l'air réagit avec l'oxygène pour former les NOx. Les NOx comprennent le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂), dont le NO constitue la majorité. Les moteurs diesel contribuent significativement aux émissions de NOx, principalement sous forme de NO. Les émissions de NOx ont des impacts environnementaux et sanitaires, contribuant à l'acidification, à la formation d'ozone et au smog, ainsi qu'à des problèmes de santé respiratoire et à l'irritation pulmonaire chez l'homme. Ces émissions sont également des précurseurs des pluies acides et de la pollution atmosphérique [6].

1.2.8. Principaux avantages et inconvénients des moteurs diesel

Les moteurs diesel offrent plusieurs avantages tels que :

- ✓ Efficacité énergétique supérieure grâce à un taux de compression plus élevé et une meilleure efficacité thermodynamique.
- ✓ Production de couple élevée à bas régime, adaptée aux applications de remorquage ou de transport lourd.
- ✓ Durabilité et longévité accrues, avec des intervalles d'entretien plus longs et des coûts d'exploitation réduits sur le long terme.
- ✓ Contribution à la réduction des émissions de CO₂ par kilomètre parcouru, favorisant une moindre empreinte environnementale.

Ils présentent également certains inconvénients comme :

- ☒ Coût initial plus élevé en raison de la complexité de conception et des composants supplémentaires.
- ☒ Émissions plus élevées d'oxydes d'azote (NOx) et de particules (PM), contribuant à la pollution de l'air et à des problèmes de santé.
- ☒ Bruit et vibrations plus prononcés, offrant parfois une expérience de conduite moins confortable.
- ☒ Problèmes potentiels de démarrage par temps froid en raison de la viscosité du carburant diesel et des températures de compression nécessaires.

Chapitre 01 : Généralités sur les moteurs diesel et le biodiesel

- ☒ Disponibilité limitée du carburant diesel dans certaines régions, pouvant poser des problèmes de logistique pour les conducteurs.

La disponibilité limitée et le coût élevé du carburant diesel dans certaines régions, pouvant poser des problèmes de logistique et financières pour les conducteurs. Ainsi que les émissions plus importantes de NOx et de particules (PM) associées aux moteurs diesel peuvent également contribuer à la pollution de l'air et avoir des effets néfastes sur la santé. Toutefois, l'utilisation de carburants alternatifs tels que le biodiesel peut offrir une solution potentielle à ce problème.

1.3. Biodiesel

1.3.1. Définition et propriété

Le biodiesel est un carburant diesel de substitution renouvelable et propre, fabriqué à partir de sources naturelles et renouvelables telles que les huiles végétales, les graisses animales et les graisses de cuisson recyclées. Il est produit par un processus chimique appelé transestérification, qui consiste à faire réagir ces matières organiques avec de l'alcool (généralement du méthanol ou de l'éthanol) et un catalyseur (tel que l'hydroxyde de sodium ou l'hydroxyde de potassium). Ce processus décompose les huiles et les graisses en esters méthyliques d'acides gras (EMAG), qui sont les principaux composants du biodiesel.

1.3.2. Propriétés du biodiesel

- **Renouvelable** : Le biodiesel est dérivé de ressources renouvelables telles que les huiles végétales et les graisses animales, contrairement aux combustibles fossiles qui sont limités et non renouvelables.
- **Biodégradable** : Le biodiesel est biodégradable, c'est-à-dire qu'il peut être décomposé naturellement par des micro-organismes, ce qui réduit son impact sur l'environnement.
- **Moins d'émissions** : Le biodiesel produit moins d'émissions nocives telles que le dioxyde de soufre, les particules, le monoxyde de carbone et les hydrocarbures que le carburant diesel classique. Il réduit également les émissions de gaz à effet de serre, en particulier le CO₂, car le carbone contenu dans le biodiesel provient du CO₂ atmosphérique récemment capturé par les plantes lors de la photosynthèse.
- **Pouvoir lubrifiant** : Le biodiesel a un pouvoir lubrifiant plus élevé que le diesel de pétrole, ce qui peut contribuer à réduire l'usure du moteur et à prolonger sa durée de vie.

Chapitre 01 : Généralités sur les moteurs diesel et le biodiesel

- **Compatibilité** : Le biodiesel peut être utilisé dans les moteurs et infrastructures diesel existants avec peu ou pas de modifications, ce qui en fait un carburant alternatif pratique.
- **Contenu énergétique** : Le biodiesel a une teneur énergétique légèrement inférieure à celle du diesel de pétrole, ce qui peut entraîner une légère réduction de la consommation de carburant, mais cette réduction est souvent compensée par des émissions plus faibles et d'autres avantages.
- **Propriétés d'écoulement à froid** : Le biodiesel a de moins bonnes propriétés d'écoulement à froid que le diesel de pétrole, ce qui peut entraîner des problèmes de gélification du carburant et de colmatage des filtres par temps froid. Toutefois, ce problème peut être résolu par l'utilisation d'additifs ou le mélange avec le diesel de pétrole.

Dans l'ensemble, le biodiesel constitue une alternative prometteuse au diesel de pétrole, offrant des avantages environnementaux, une sécurité énergétique et des opportunités économiques pour les agriculteurs et les producteurs de biocarburants.

1.3.3. Sources de production de biodiesel

Le biodiesel peut être produit à partir de diverses sources renouvelables, principalement des huiles végétales, des graisses animales et des huiles alimentaires recyclées. Voici quelques-unes des principales sources de production de biodiesel :

- **Huiles végétales** : Les huiles végétales, telles que l'huile de soja, l'huile de colza, l'huile de tournesol et l'huile de palme, sont parmi les sources les plus couramment utilisées pour produire du biodiesel. Ces huiles sont extraites de plantes oléagineuses et peuvent être transformées en biodiesel par le processus de transestérification.
- **Graisses animales** : Les graisses animales, telles que la graisse de bœuf, de porc ou de volaille, sont une autre source de matières premières pour la production de biodiesel. Les graisses animales peuvent être collectées à partir des sous-produits de l'industrie de la viande et transformées en biodiesel de la même manière que les huiles végétales.
- **Huiles alimentaires recyclées** : Les huiles alimentaires usagées provenant de restaurants, de cantines et d'autres établissements peuvent être collectées et recyclées pour produire du biodiesel. Cette pratique permet de réutiliser les déchets alimentaires tout en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles.
- **Algues** : Les algues sont une source émergente de biodiesel en raison de leur capacité à

Chapitre 01 : Généralités sur les moteurs diesel et le biodiesel

produire des quantités élevées d'huiles riches en lipides. La culture d'algues pour la production de biodiesel présente l'avantage de ne pas nécessiter de terres arables et peut être réalisée dans des zones non cultivées ou des installations aquatiques.

- **Déchets agricoles** : Certains déchets agricoles, tels que les résidus de cultures oléagineuses ou les co-produits de l'industrie agroalimentaire, peuvent également être utilisés pour produire du biodiesel. Cela permet de valoriser les déchets agricoles et de réduire leur impact environnemental.

En résumé, le biodiesel peut être produit à partir d'une variété de sources renouvelables, offrant ainsi une solution durable pour remplacer les combustibles fossiles dans les secteurs du transport et de l'énergie. La diversité des sources de production permet également de réduire la dépendance à une seule matière première et de promouvoir la durabilité environnementale et économique.

1.3.4. Les procédés de production

Le biodiesel peut être produit à partir de différentes sources renouvelables en utilisant principalement deux procédés de fabrication : la transestérification et l'estérification directe. Voici une explication de chacun de ces procédés :

1.3.4.1. Transestérification

La transestérification est le procédé le plus couramment utilisé pour produire du biodiesel. Il implique la réaction chimique entre une matière grasse (huile végétale, graisse animale ou huile alimentaire usagée) et un alcool (généralement du méthanol ou de l'éthanol) en présence d'un catalyseur (généralement de la soude caustique ou de la potasse). Cette réaction produit du biodiesel (esters méthyliques ou éthyliques) ainsi que de la glycérine en tant que sous-produit. Le biodiesel est ensuite séparé de la glycérine et purifié pour obtenir le produit final.

1.3.4.2. Estérification directe

L'estérification directe est un procédé alternatif qui implique la réaction directe entre une matière grasse à haute teneur en acides gras libres (AGL) et un alcool en présence d'un catalyseur acide. Contrairement à la transestérification, qui nécessite des matières premières avec une faible teneur en AGL, l'estérification directe permet d'utiliser des matières premières de qualité inférieure telles que les huiles de cuisson usagées contenant des niveaux élevés

Chapitre 01 : Généralités sur les moteurs diesel et le biodiesel

d'AGL. Ce procédé est particulièrement utile pour valoriser les déchets gras et les matières premières de qualité inférieure en biodiesel.

En résumé, la transestérification et l'estérification directe sont les principaux procédés de production de biodiesel. Chacun de ces procédés présente des avantages et des inconvénients en termes de coût, de qualité du produit final et de flexibilité des matières premières utilisées. Le choix du procédé dépend souvent des caractéristiques spécifiques des matières premières disponibles et des exigences de qualité du biodiesel produit.

1.3.5. Fonctionnement de moteur diesel avec le biodiesel

Les moteurs diesel peuvent fonctionner avec du biodiesel de manière similaire à l'utilisation de diesel traditionnel. Les biodiesels apparaissent comme carburants prometteurs pour le remplacement des combustibles fossiles à court terme puisqu'ils sont renouvelables, biodégradables et ils viennent des ressources présentes dans la plupart des pays producteurs. Lorsqu'il est utilisé dans un moteur diesel, le biodiesel peut être mélangé avec du diesel conventionnel dans différentes proportions, selon les spécifications du véhicule et les recommandations du fabricant.

Le biodiesel possède des caractéristiques intéressantes à savoir un indice de cétane supérieur et un point d'éclair élevé [7]. Les mélanges de biodiesel avec le diesel sont stables sur le plan thermique, ils ne changent pas de façon significative même en étant exposés à des températures supérieures à 70 °C.

Parce qu'il est davantage chargé en oxygène (11 %), le biodiesel assure une meilleure combustion du carburant auquel il est mélangé et diminue les émissions d'hydrocarbures (HC), de monoxyde de carbone (CO) et de particules mais augmente les émissions d'oxydes d'azote (NOx). La teneur en oxygène du biodiesel permet d'améliorer le processus de combustion et diminue son potentiel d'oxydation. Le contenu d'oxygène structurel d'un carburant améliore l'efficacité de combustion en raison de l'augmentation de l'homogénéité d'oxygène avec le carburant pendant la combustion. Ainsi l'efficacité de combustion de biodiesel est plus haute que le petro diesel aussi bien que l'efficacité de combustion de méthanol/éthanol est plus haute que celle d'essence.

Les valeurs calorifiques de biodiesels (39-41 MJ / kg) sont légèrement inférieures à celle de l'essence (46 MJ / kg), pétro diesel (43 MJ / kg) ou le pétrole (42 MJ / kg), mais supérieur à celui du charbon (32-37 MJ / kg) [8].

Chapitre 01 : Généralités sur les moteurs diesel et le biodiesel

Les points à considérer concernant le fonctionnement des moteurs avec du biodiesel sont les suivants :

- **Compatibilité** : Dans la plupart des cas, les moteurs diesel conventionnels sont compatibles avec le biodiesel jusqu'à un certain pourcentage de mélange. Les fabricants de moteurs indiquent souvent les pourcentages de biodiesel pouvant être utilisés en toute sécurité dans leurs véhicules sans risque de dommages.
- **Lubrification** : Le biodiesel a des propriétés de lubrification légèrement différentes par rapport au diesel conventionnel. Il peut avoir un effet légèrement nettoyant sur les systèmes de carburant et de combustion, ce qui peut entraîner une libération de dépôts et de contaminants dans le système. Cependant, cela peut être atténué en effectuant régulièrement l'entretien du moteur et en remplaçant les filtres à carburant selon les recommandations du fabricant.
- **Performance** : En général, le biodiesel offre des performances de combustion similaires à celles du diesel conventionnel en termes de puissance, de couple et d'économie de carburant. Cependant, le biodiesel peut avoir une densité énergétique légèrement plus faible, ce qui peut entraîner une légère baisse des performances par rapport au diesel conventionnel.
- **Émissions** : L'utilisation de biodiesel peut réduire les émissions de certains polluants atmosphériques, tels que les particules fines, les hydrocarbures imbrûlés et le CO₂, par rapport au diesel conventionnel. Cependant, les émissions de certains polluants, tels que les NOx, peuvent varier en fonction du type de moteur et du pourcentage de biodiesel utilisé.

En résumé, les moteurs diesel peuvent fonctionner avec du biodiesel en respectant les recommandations du fabricant et en suivant les bonnes pratiques d'utilisation et d'entretien du moteur. Le biodiesel offre une alternative renouvelable au diesel conventionnel, avec des avantages potentiels en termes d'émissions réduites et de durabilité environnementale.

1.3.6. Production mondiale de biodiesel

Le développement rapide de la production de biodiesel dans le monde est attribuable à la mise en place de nombreuses mesures incitatives et de réglementations imposant des teneurs minimums en biocarburants dans certains pays. Ces incitatifs ont favorisé une demande croissante pour les huiles végétales dans l'Union européenne.

Chapitre 01 : Généralités sur les moteurs diesel et le biodiesel

Le graphique présenté sur la figure 1.11 illustre la répartition du volume de la production mondiale de biodiesel selon les pays en 2022, en milliards de litres. L'Indonésie est le premier producteur mondial de biodiesel et de diesel renouvelable [9]. En 2022, la production indonésienne s'élevait à 13,65 milliards de litres. C'est plus que la production combinée du Brésil et des États-Unis, qui arrivent respectivement en deuxième et troisième position.

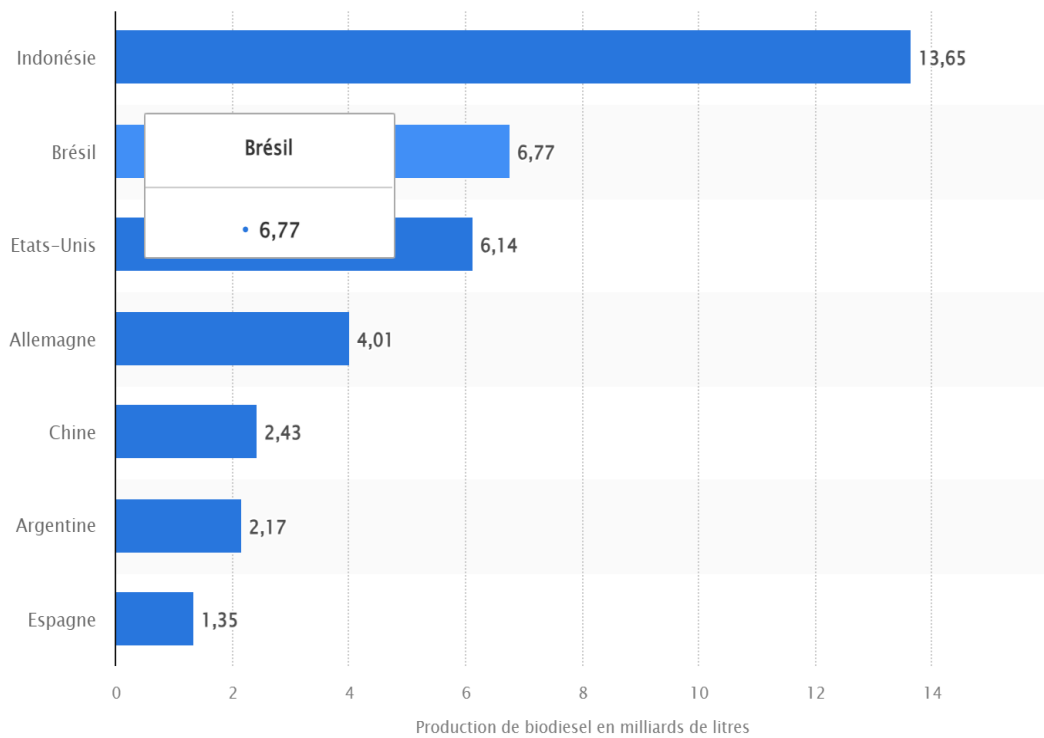


Figure 1.11 : Répartition du volume de la production mondiale de biodiesel selon les pays en 2022 [9].

1.3.7. Production de biodiesel en Algérie

En Algérie, les énergies renouvelables sont actuellement au cœur des préoccupations. Consciente de leur intérêt grandissant et de leur enjeu, l'Algérie a intégré le développement des énergies renouvelables dans sa politique énergétique par l'adoption d'un cadre juridique favorable au développement de ces énergies.

L'Algérie, par son immense diversité en matière d'écosystèmes, dispose de ressources potentielles prometteuses qui ne demandent qu'à être valorisées et développées.

Plusieurs travaux de recherches ont été réalisés dans le cadre de production de biodiesel à partir de plusieurs ressources organiques, tels que d'huile de coton [10], la plante de Balanites

Chapitre 01 : Généralités sur les moteurs diesel et le biodiesel

aegyptiaca (dattier du désert) [11], la plante de Ricinus communis [12]. Les biodiesels obtenus ont des propriétés proches aux normes reconnues et ces derniers ne sont pas nocifs pour l'environnement.

1.4. Conclusion

En conclusion, le biodiesel offre une alternative prometteuse et renouvelable au diesel conventionnel, avec des avantages potentiels en termes de réduction des émissions polluantes et de durabilité environnementale. Les moteurs diesel peuvent fonctionner avec du biodiesel en respectant les recommandations du fabricant et en suivant les bonnes pratiques d'utilisation et d'entretien du moteur. Cependant, il est important de noter que le biodiesel n'est pas exempt de défis, notamment en ce qui concerne sa disponibilité, sa compatibilité avec certains moteurs et ses propriétés de lubrification. Malgré ces défis, le biodiesel représente une option viable pour réduire l'empreinte carbone des transports et contribuer à la transition vers des carburants plus durables et respectueux de l'environnement.

Chapitre 02

Technique d'intelligence artificiel et état de l'Art

Chapitre 02 : Technique d'intelligence artificiel et état de l'Art

2.1. Introduction

Les réseaux neuronaux artificiels (RNA) sont des systèmes de traitement des données qui sont utilisés pour résoudre de nombreux problèmes dans les domaines de l'ingénierie et de la science, en particulier dans certains domaines où les approches de modélisation conventionnelles ont échoué.

Ce chapitre présente une description et une analyse des réseaux de neurones artificiels (RNA) et de l'algorithme génétique (GA) qui seront utilisés tout au long de ce travail, y compris son concept de base. En plus, un état de l'art sur l'application de la technique des RNA pour la prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission des moteurs diesel fonctionnant avec des mélanges de biodiesel est présenté à la fin.

2.2. Réseaux de neurones artificiels

2.2.1. Définition

Un RNA est un modèle informatique inspiré du fonctionnement des neurones biologiques du cerveau humain. Il se compose d'un ensemble d'unités appelées neurones ou nœuds, organisées en couches (entrée, cachées, sortie), où chaque neurone est connecté à d'autres par des liens pondérés. Les poids de ces connexions déterminent l'importance des signaux transmis. Les RNA sont conçus pour reconnaître des motifs et des régularités dans les données, permettant de résoudre des problèmes complexes comme la classification, la régression et la reconnaissance de formes. Ils fonctionnent en ajustant les poids des connexions à travers un processus d'apprentissage supervisé ou non supervisé, améliorant ainsi leur capacité à prédire ou à classer des données nouvelles basées sur des exemples passés [13].

2.2.2. Neurones artificiels et les neurones biologique

Les neurones artificiels et les neurones biologiques partagent des principes fondamentaux mais diffèrent significativement dans leur nature, structure et fonctionnement [14].

- **Les neurones biologiques** : sont des réseaux de cellules nerveuses présentes dans le cerveau et le système nerveux des êtres vivants, formés de neurones biologiques composés d'un corps cellulaire, de dendrites et d'un axone (voir la figure 2.1). Les connexions synaptiques entre les neurones biologiques sont renforcées ou affaiblies par des processus comme la plasticité synaptique, impliquant des modifications physiques et chimiques. Les neurones biologiques transmettent des signaux électriques et

Chapitre 02 : Technique d'intelligence artificiel et état de l'Art

chimiques, et leur fonctionnement est influencé par divers facteurs biologiques. Les neurones biologiques sont immensément plus complexes que les neurones artificiels, avec un cerveau humain contenant environ 86 milliards de neurones, chacun formant des milliers de connexions.

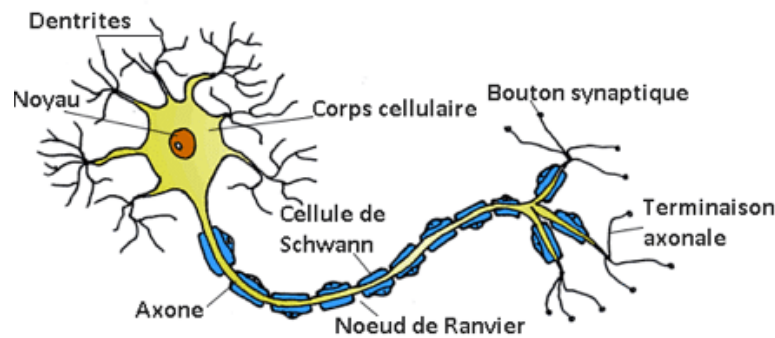


Figure 2.1 : Neurone biologique.

- **Les neurones artificiels :** Le neurone artificiel (voir la figure 2.2) est une modélisation mathématique qui reprend les principes du fonctionnement du neurone biologique, en particulier la sommation des entrées. En général, un neurone artificiel est un élément de traitement possédant n entrées $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ (qui sont les entrées externes ou les sorties des autres neurones) et une ou plusieurs sorties. Son traitement consiste à effectuer à sa sortie y_j le résultat d'une fonction d'activation f de la somme pondérée.

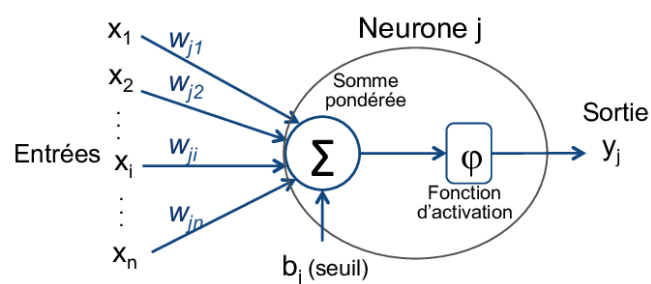


Figure 2.2 : Neurone artificiel.

2.2.3. Structure des réseaux de neurones artificiels

L'architecture d'un RNA est composée d'un certain nombre de neurones interconnectés, formant une structure capable de remplir certaines fonctions. Le nombre de neurones est lié au nombre d'entrées et de sorties du réseau. Ces neurones sont organisés en couches (voir la figure 2.3), chaque couche est indépendante et peut être organisée comme suit :

Chapitre 02 : Technique d'intelligence artificiel et état de l'Art

- **Une couche d'entrée** : Elle est constituée de l'ensemble des variables d'entrée.
- **Une couche de sortie** : Elle est constituée de l'ensemble des neurones de sortie du réseau. C'est cette couche qui fournit la sortie principale.
- **Une ou plusieurs couches cachées** : Ce sont les couches qui se trouvent entre la couche d'entrée et la couche de sortie. Elles définissent l'activité interne du réseau. En général, les fonctions d'activations sont non linéaires au niveau de ces couches.

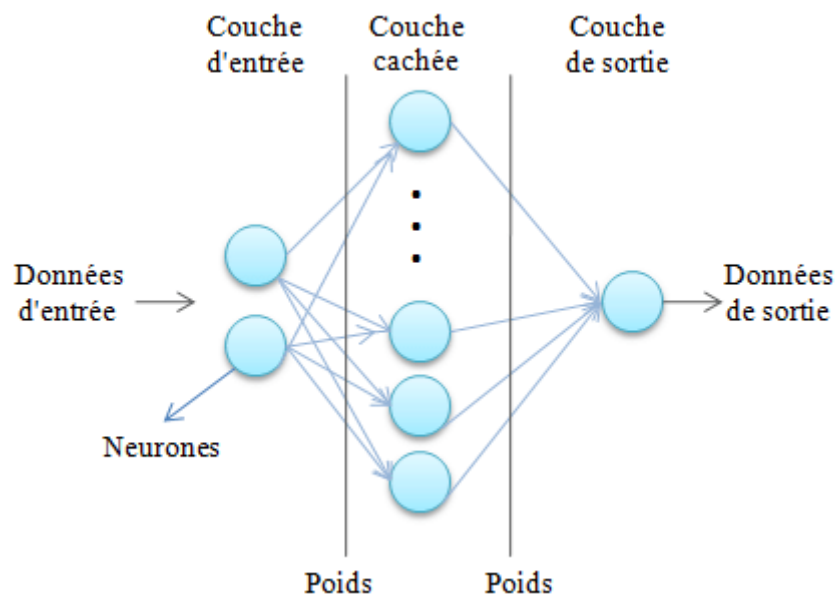


Figure 2.3 : Structure d'un réseau de neurones artificiels.

2.2.4. Types de réseaux de neurones artificiels

Selon le modèle de connexions entre les couches du réseau et de la propagation des informations entre les neurones de chaque couche, les RNAs peuvent être classés en deux catégories, les réseaux feed-forward et les réseaux récurrents ou à retour d'informations.

2.2.4.1. Réseaux Feed forward

Les réseaux Feed-forward peuvent se diviser en réseaux sans couches cachées et les réseaux avec une ou plusieurs couches cachées. Les réseaux sans couches cachées sont les réseaux les plus simples. Ils sont utilisables pour des problèmes de classification ou d'approximation. Ils ont un avantage majeur, leur apprentissage converge vers une solution optimale. Cela est dû au fait que c'est un système linéaire. Leur inconvénient est qu'ils peuvent

Chapitre 02 : Technique d'intelligence artificiel et état de l'Art

seulement classifier ou approximer les problèmes linéaires et ne peuvent résoudre un problème non linéaire [15].

➤ Perceptron simple (mono couche)

Ce type de réseau ne dispose que de deux couches (voir la figure 2.4) :

- Une couche d'entrée qui s'appelle la rétine et qui est une aire sensorielle.
- Une couche de sortie qui donne la réponse correspondante à la simulation présentée à l'entrée.

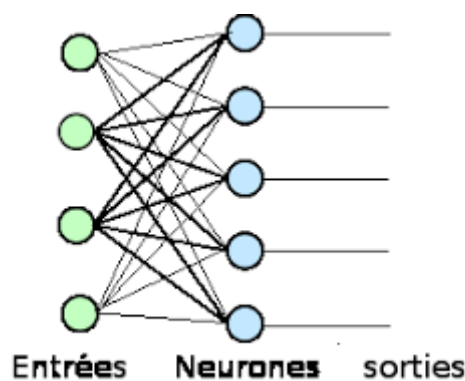


Figure 2.4 : Architecture d'un perceptron monocouche.

• Réseaux de neurones feed-forward multicouches (MLP)

Ce réseau est composé d'une couche d'entrée, d'une ou plusieurs couches cachées et d'une couche de sortie comme le montre la figure 2.5. Les calculs sont effectués au niveau des couches cachées et la couche de sortie. Le réseau représenté est entièrement connecté, ce qui signifie qu'un neurone dans n'importe quelle couche doit être lié à tous les neurones de la couche précédente. Les fonctions d'activation sont utilisées pour les nœuds de la couche cachée et de sortie où la sortie d'une couche devient l'entrée de la couche suivante. En ajoutant une ou plusieurs couches cachées, le réseau est capable de calculer des statistiques d'ordre supérieur conduisant à une meilleure perspective globale.

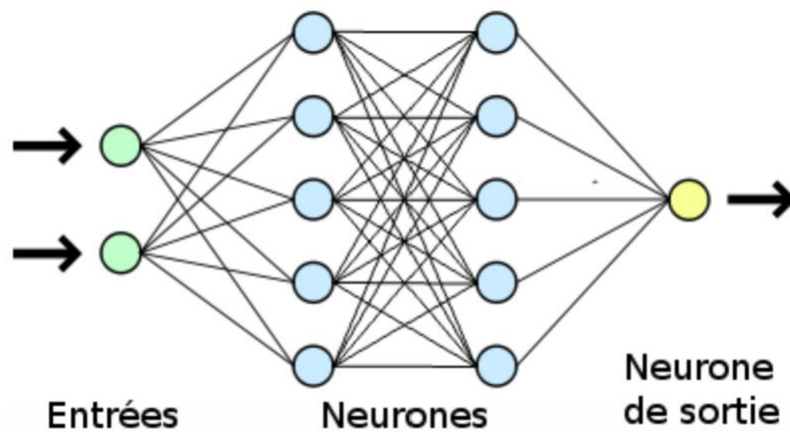


Figure 2.5 : Architecture du perceptron multicouche (MLP).

2.2.4.2. Réseaux récurrents :

Les réseaux récurrents sont des réseaux de neurones dans lesquels l'information peut se propager dans deux sens, y compris des couches profondes aux premières couches (voir figure 2.6). En cela, ils sont plus proches du vrai fonctionnement du système nerveux. Ces réseaux possèdent des connexions récurrentes au sens où elles conservent des informations en mémoire : ils peuvent prendre en compte à un instant d'un certain nombre d'états passés. Pour cette raison, ces réseaux sont particulièrement adaptés aux applications faisant intervenir le contexte, et plus particulièrement au traitement des séquences temporelles comme l'apprentissage et la génération de signaux, c'est à dire quand les données forment une suite et ne sont pas indépendantes les unes des autres [16].

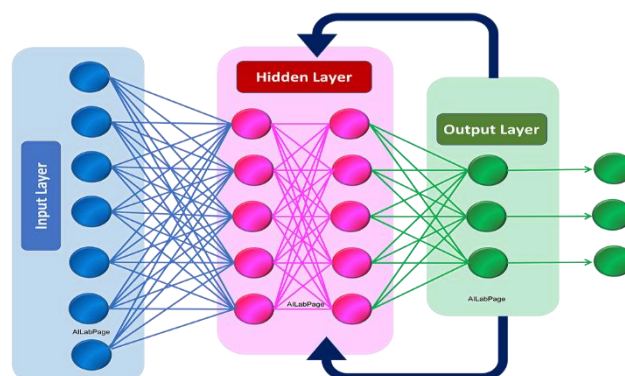
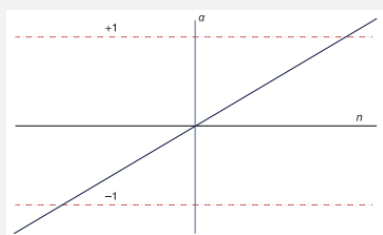
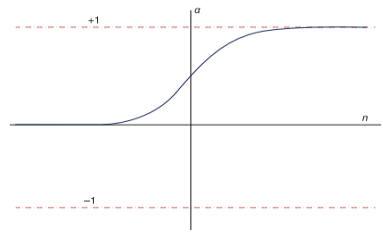
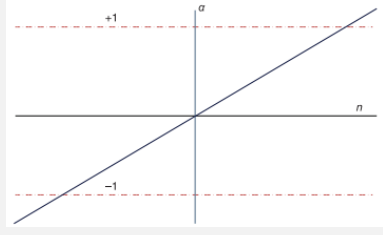
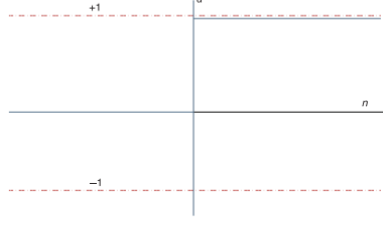


Figure 2.6 : Réseau de neurones récurrent.

2.2.5. Fonction d'activation :

Les RNA utilisent des fonctions d'activation qui ont pour rôle d'introduire la non-linéarité au RNA et d'éviter d'être paralysé par des neurones divergents en bornant leurs valeurs. Ces fonctions peuvent être linéaires ou non linéaires, pour effectuer une opération mathématique. Le choix de la fonction d'activation dépend des spécifications du problème à résoudre. Certaines des fonctions d'activation couramment utilisées sont résumées dans le Tableau.2.1

Tableau 2.1. Fonctions d'activation couramment utilisées.

Fonction d'activation	Equation	Plage d'entrée et de sortie	Représentation graphique
Linéaire	$f(x) = x$ (2.2)	$R_{input} = [-\infty, +\infty]$ $R_{output} = [0,1]$	
Log-sigmoïde	$f(x) = \frac{1}{1 + e^x}$ (2.3)	$R_{input} = [-\infty, +\infty]$ $R_{output} = [0,1]$	
Tangente hyperbolique	$f(x) = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}$ (2.4)	$R_{input} = [-\infty, +\infty]$ $R_{output} = [-1,1]$	
Limite stricte	$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0 \\ 1 & \text{if } x \geq 0 \end{cases}$ (2.5)	$R_{input} = [-\infty, +\infty]$ $R_{output} = [0,1]$	

2.2.6. Apprentissage :

L'apprentissage est la phase dans laquelle les poids des connexions sont mis à jour dans le but d'atteindre la sortie du réseau pour les exemples présentés en entrée.

Il existe trois types d'apprentissage :

2.2.6.1. Apprentissage supervisé :

C'est le mode d'apprentissage le plus courant. Il consiste à évaluer les poids synaptiques minimisant l'erreur sur une base d'apprentissage qui comprend un ensemble d'observations pour lesquelles on connaît à la fois les entrées et les sorties souhaitées. L'apprentissage est dit supervisé, car il est nécessaire de connaître la sortie attendue pour chaque jeu d'entrées, le réseau de neurones va ajuster ses paramètres afin de minimiser l'erreur entre la sortie désirée et sa sortie réelle (voir la figure 2.9).

- **Algorithme d'apprentissage de Levenberg-Marquardt (LM)**

Pour fournir une solution numérique pour réduire un problème, l'algorithme de Levenberg-Marquadt est utilisé. Il possède une convergence stable, il est rapide et convient pour entraîner des problèmes de petite et moyenne taille dans le domaine des RNAs (Wilamowski and Yu, 2010). En mathématiques et en informatique, l'algorithme LM est utilisé pour résoudre le problème des moindres carrés non linéaires, également connu sous le nom de méthode des moindres carrés amortis (DLS). Ces problèmes sont minimisés, en particulier dans la courbe d'ajustement des moindres carrés [17].

2.2.6.2. Apprentissage semi-supervisé :

Cet apprentissage est identique au précédent dans la mesure où il se base sur la présence d'un concepteur, cependant la valeur exacte de la sortie n'est pas disponible, en général la seule information disponible est un signal d'échec ou de succès.

2.2.6.3. Apprentissage non supervisé :

Ce mode d'apprentissage est moins intuitif, il correspond au cas où l'on ne dispose pas de bases d'apprentissage, par exemple lorsqu'on ne sait pas à priori déterminer ponctuellement

Chapitre 02 : Technique d'intelligence artificiel et état de l'Art

si une sortie est ou non valable. L'apprentissage repose alors sur un « critère interne » de conformité du comportement du réseau par rapport à des spécifications générales et non sur des observations. Cet apprentissage consiste donc, à détecter automatiquement des régularités qui figurent dans les exemples présentés et à modifier les poids des connexions pour que les exemples ayant les mêmes caractéristiques de régularité provoquent la même sortie.

2.3. Algorithme génétique (GA)

2.3.1. Principe de base

L'algorithme génétique (AG) est une technique d'optimisation qui imite le processus de sélection naturelle et d'évolution. Il est basé sur la théorie de l'évolution de Darwin à travers la sélection génétique dans les systèmes biologiques [18].

Cette théorie repose sur trois principes : le principe de variation, le principe d'adaptation et le principe d'hérédité.

- **Le principe de variation** : Chaque individu au sein d'une population est unique. Ces différences, plus ou moins importantes, vont être décisives dans le processus de sélection.
- **Le principe d'adaptation** : Les individus les plus adaptés à leur environnement atteignent plus facilement l'âge adulte. Ceux ayant une meilleure capacité de survie pourront donc se reproduire davantage.
- **Le principe d'hérédité** : Les caractéristiques des individus doivent être héréditaires pour pouvoir être transmises à leur descendance. Ce mécanisme permettra de faire évoluer l'espèce pour partager les caractéristiques avantageuses à sa survie.

2.3.2. Opérateurs génétiques

Les notions de Population, d'Individu, de Chromosome et de Gène sont liées à la terminologie génétique [19].

- **La population** est l'ensemble des solutions envisageables.
- **L'individu** représente une solution.
- **Le Chromosome** est une composante de la solution.
- **Le Gène** est une caractéristique, une particularité.

Chapitre 02 : Technique d'intelligence artificiel et état de l'Art

Une population initiale est générée aléatoirement, chaque variable de la solution possible connue sous le nom de solution candidate ou individu est constituée d'un chromosome représentant un peu des variables codées. La population de chromosomes forme une génération qui est manipulée en fonction de la règle évolutive de survie. L'objectif principal de l'étape d'initialisation est de répartir les solutions autour de l'espace de recherche aussi uniformément que possible pour augmenter la diversité de la population et avoir une meilleure chance de trouver des régions prometteuses. Une fonction de fitness est utilisée pour évaluer les valeurs de fitness de ces chromosomes.

Avec ces notions, trois opérateurs d'évolution sont obtenus :

- **La sélection** : La sélection consiste à choisir les individus les mieux adaptés afin d'avoir une population de solution la plus proche de converger vers l'optimum global. Cet opérateur est l'application du principe d'adaptation de la théorie de Darwin.
- **Le croisement** : C'est le résultat obtenu lorsque deux chromosomes partagent leurs particularités. Celui-ci permet le brassage génétique de la population et l'application du principe d'hérédité de la théorie de Darwin.
- **La mutation** : La mutation consiste à altérer un gène dans un chromosome selon un facteur de mutation. Ce facteur est la probabilité qu'une mutation soit effectuée sur un individu. Cet opérateur est l'application du principe de variation de la théorie de Darwin et permet, par la même occasion, d'éviter une convergence prématurée de l'algorithme vers un extremum local.

Le principe de fonctionnement de l'AG est représenté par l'organigramme présenté sur la figure 2.6.

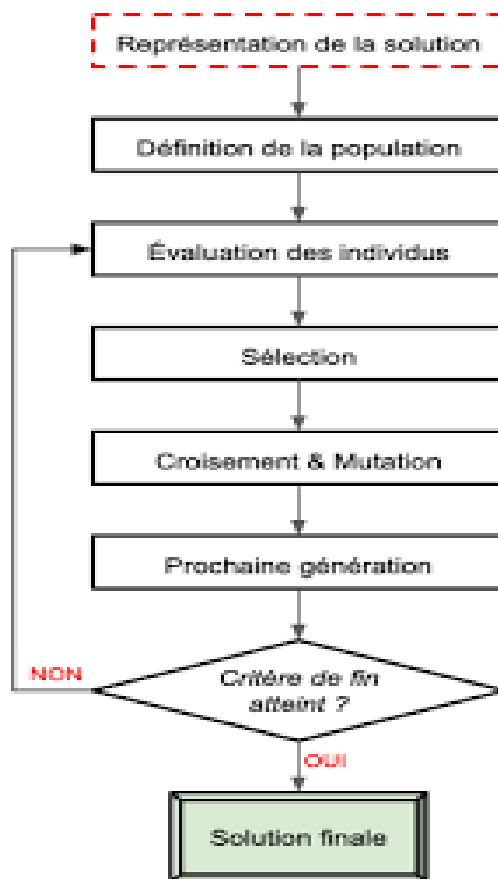


Figure 2.6 : Organigramme de l'AG.

2.4. Application des RNA pour la modélisation des moteurs

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont déjà largement utilisés par les chercheurs pour la modélisation, le contrôle et l'optimisation des moteurs, avec des résultats prometteurs en termes de performance, d'efficacité et de maintenance prédictive. Cette application des RNA est particulièrement bénéfique en raison de leur capacité à gérer des systèmes non linéaires complexes et à apprendre des relations dynamiques à partir de données.

Ces travaux sont résumés dans le tableau suivant :

Chapitre 02 : Technique d'intelligence artificiel et état de l'Art

Tableau 2.2 : Etat de l'art.

Type de Biodiesel Et technique d'IA	Entrée du modèle	Sortie du modèle	Fonction d'activation Et algorithme d'apprentissage	Normalisation et division des données	Résultats	Réf.
Les déchets végétaux de cuisson RNA	Vitesse de rotation % biodiesel	Couple moteur BSFC HC CO	Log-sig Tan-sig Purlein Trainlm Traingdx Trainseg	[-1 ;1]	ANN a révélé une bonne corrélation entre les données expérimentale et prédit par le model. Cette étude a démontré la précision et la simplicité de ANN dans l'analyse des performances de moteur diesel teste.	[20] 2009
Huile de cuisson usagée RNA	Charge de moteur % biodiesel Taux de compression Temp d'injection	BTE BSEC T° _{exh} Nox Fumée HC	Trainlm Traingda Traingdx Traincfg Trainrp	[-1 ;1] 15 :15 :70	Deux model ANN ont montré une bonne corrélation entre les valeur expérimentales et prédit. Ces model permettes de réduire les efforts expérimentaux et constitue un utile efficace pour prédire les performances et les émissions de moteur dans diverse condition.	[21] 2011
A base de de l'huile de coco, de l'huile de soja et de l'huile de palme	Vitesse de rotation Couple Débit de carburant	CO, HC, CO ₂ , NO _x P _{max} , HRR _{max} , CuHRR	Tansig Trainlm	Non mentionner 70 :15 :15	- Avantage économique élevé et faible durée de simulation. - Réduire le nombre d'expériences.	[22] 2012
A base de Huile de Pongamia Pinnata	Charge du moteur Propriétés du carburant	BSFC, BTE CO, HC, NO _x	Tansig Trainlm	[0.1 ; 0.9] 80 :20	Possibilité de prédire les paramètres du moteur avec R=0,99 et MSE=0,02	[23] 2013
Ester méthylique de pourghère et	Charge moteur	Le BTE, le BSFC, le CO, l'O ₂ , le CO ₂ ,	Log-sigmoïde	[0.1;0.9] 70-15-15	La fonction de transfert Log-Sig et hyper	[24] 2015

Chapitre 02 : Technique d'intelligence artificiel et état de l'Art

d'hydrogène RNA	Les mélanges de biodiesel et les débits d'hydrogène	le NOx, le HC et l'EGT	LEARN GDM trainlm traingda traingdx trainrp traincgf traincg trainbfg		Tan-Sig pour Levenberge- Marquardt avec 16 neurones s'est avérée avoir la meilleure valeur de régression de 0,99360, MSE de 0,0011, MPE de 4,863001%. La modélisation ANN a permis d'éviter des expérimentations coûteuses, longues et pénibles.	
Mélanges de biodiesel d'arachides et de biodiesel-alcool	Vitesse de rotation Propriétés du carburant	CoupleNOx et CO	Logsig, trainlm	Non mentioner 80 :20	- ANN a une plus grande précision que LR. - Économie de temps et d'argent pour les tests expérimentaux.	[25] 2016
Ester méthylique de son de riz (RBME) avec additif isopropanol RNA	La charge et le type de mélange de carburant utilisé	(E.G.T) (BSFC) (BTE) (HC), (CO), (CO2), (O2), (NOX) les fumées	Log- sigmoïde Tran-sig Train-LM	[-1;1] /	L'ANN a pu prédire les performances du moteur et les émissions de gaz d'échappement avec un coefficient de corrélation élevé (0,999).	[26] 2017
Biodiesel d'origine animale	Vitesse de rotation Couple Débit d'air massique CO2 Nox PN GMD	CO2 Nox PN GMD	Non mentioner	/ 70-15-15	Viabilité de l'application des deux modèles de prédiction (ANN et régression symbolique) ; - Par rapport à la RS, l'ANN est plus rapide mais moins précis.	[27] 2018

Chapitre 02 : Technique d'intelligence artificiel et état de l'Art

Biodiesel à base d'huile de cuisson usagée	Charge du moteur Régime du moteur Rapport de mélange	HRR, Pmax, Brake power, BSFC HC, NOx, CO2, CO	Logsig Tansig Purelin	[0;1] Non mentionner	L'ANN combiné à Grey-Taguchi permet d'améliorer la précision et de réduire le temps et les coûts de la recherche expérimentale.	[28] 2019
Différent types de biodiesel RNA	Charges de moteur Pressions d'injection Rapport de biodiesel	BTE BSFC EGT NOx HC CO Fumée	Log-sigmoïde LEARNGDM	Non mentionner	L'utilisation de l'ANN est suffisante pour prédire le BTE, le BSFC, l'EGT et estimer les émissions de gaz d'échappement avec $R^2 = 0,9811$	[29] 2020
Biodiesel à base d'huile de cuisson usagée	Les pourcentages d'oxygène dans le propylène glycol (OxPG) et le biodiesel (OxB)	(BSFC BTE, CO, CO2, NOx et SOx)	/	[0-1] /	ANN-GA avec une population de 75 personnes pourrait fournir les meilleures performances de prédiction.	[30] 2021
Biodiesel à base de mélange de citrouilles et Mais	Rapport de mélange Charge moteur	BTE BSFC débit de mélange HC NO opacité de fumée	Tan-Sigmoïde TrainLM	/ 70-15-15	Les résultats de prédiction du RNA sont très élevés avec des valeurs de R^2 supérieures à 0.90	[31] 2022
Biodiesel à base de grain de Bael	Rapport de mélange Charge moteur	BTE BSFC CO HC NOx opacité de fumée	/ TrainLM	[0-1] 15-15-70	L'approche de RNA a montré une précision de prédiction élevée ce qui est bénéfique pour l'estimation des performances des moteurs diesel.	[32] 2023

2.4. Conclusion

Suite à l'analyse approfondie de la littérature susmentionnée, il est clair que l'application des techniques d'intelligence artificielle, notamment les réseaux de neurones artificiels (RNA), s'est révélée être un outil extrêmement efficace dans la prédiction des paramètres de performance et des caractéristiques d'émission des moteurs diesel alimentés par des mélanges de biodiesel. Les modèles de RNA ont démontré une remarquable précision, dépassant les 95 %, dans la prédiction des performances et des émissions des moteurs diesel.

En conséquence, le couplage des modèles de RNA avec les algorithmes génétiques (AG) a été privilégié pour prédire avec précision les performances et les caractéristiques d'émission, ainsi que pour optimiser le rendement thermique des moteurs diesel alimentés par du biodiesel extrait de l'huile de cuisson usagée. Cette approche intégrée présente un potentiel significatif pour améliorer l'efficacité et la durabilité des moteurs diesel fonctionnant avec des carburants alternatifs, contribuant ainsi à la transition vers une mobilité plus respectueuse de l'environnement.

Chapitre 03

Prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission du moteur diesel.

Chapitre 03 : Prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission du moteur diesel.

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, les étapes de développement des deux modèles basés sur les réseaux de neurones artificiels pour prédire les paramètres de performances et les caractéristiques d'émission d'un moteur diesel utilisant des mélanges de diesel-biodiesel, sont présentées.

3.2. Collectes des données :

Les données expérimentales utilisées dans cette étude ont été recueillies à partir d'un article scientifique publié par Andi Mulkan, Nurin Wahidah Mohd Zulkifli, Husni Husin, Ahmadi, Irvan Dahlan en 2024 [33].

Dans leur travail, les chercheurs ont utilisé un moteur diesel Yanmar TF-120M CI pour évaluer les performances et les émissions des mélanges biodiesel-diesel. Le moteur a été connecté à un dynamomètre à courants de Foucault dont les spécifications indiquent une puissance maximale de 20 kW, un couple nominal de 80 Nm et un régime nominal de 10 000 tr/min.

Le biodiesel utilisé est issu des huiles de cuisson usagées. Il a été mélangé au carburant diesel pur dans différentes proportions, à savoir 10 %, 20 %, 30 %, 40 % et 50 %, désignées par B10, B20, B30, B40 et B50, comme indiqué dans **le tableau 4**. Pour obtenir un mélange homogène, le biodiesel et le diesel pur ont été combinés dans un b cher de verre de 1 000 ml et agités à l'aide d'un homog n sateur fonctionnant à 4 000 tr/min pendant 30 minutes, ce qui a permis de créer un mélange uniforme pour les essais ultérieurs.

Tableau 3.1 : Proportions de mélange diesel-biodiesel.

�chantillon de carburant	Composition du mélange (en volume)
B0	100 % de diesel
B10	10 % de biodiesel WCO + 90 % de diesel
B20	20% WCO biodiesel + 80% diesel
B30	30% WCO biodiesel + 70% diesel
B40	40% WCO biodiesel + 60% diesel
B50	50% WCO biodiesel + 50% diesel

Chapitre 03 : Prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission du moteur diesel.

Pour faciliter la collecte des données, un système automatisé d'acquisition de données a été intégré au moteur, contrôlant et enregistrant en permanence les paramètres de performance du moteur, notamment le couple moteur, le régime moteur et la puissance de freinage, tout au long du fonctionnement à pleine charge à des régimes moteur variables allant de 1200 à 2400 tr/min.

Les résultats expérimentaux des paramètres des performances qui sont le rendement thermique (BTE), la consommation spécifique de carburant (BSFC), le couple moteur (C) et la puissance moteur (BP) ainsi que les caractéristiques d'émission qui sont le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂), les hydrocarbures (HC), les fumées (Smoke opacity) et les NO_x, sont présents sur les **figures 3.1** et **3.2** respectivement.

La variation des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission est en fonction de la vitesse de rotation du moteur diesel.

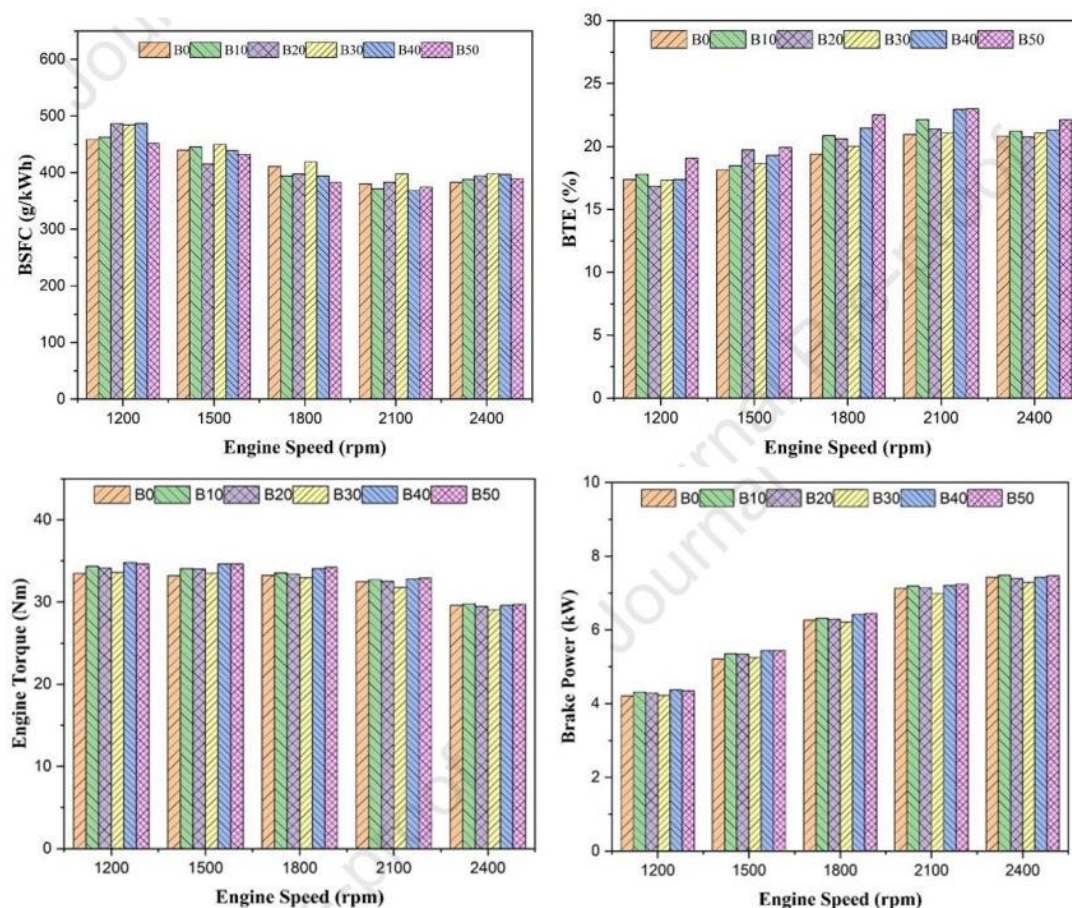


Figure 3.1 : Variations des performances (BTE, BSFC, Couple, Puissance) du moteur pour les mélanges biodiesel-diesel [33].

Chapitre 03 : Prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission du moteur diesel.

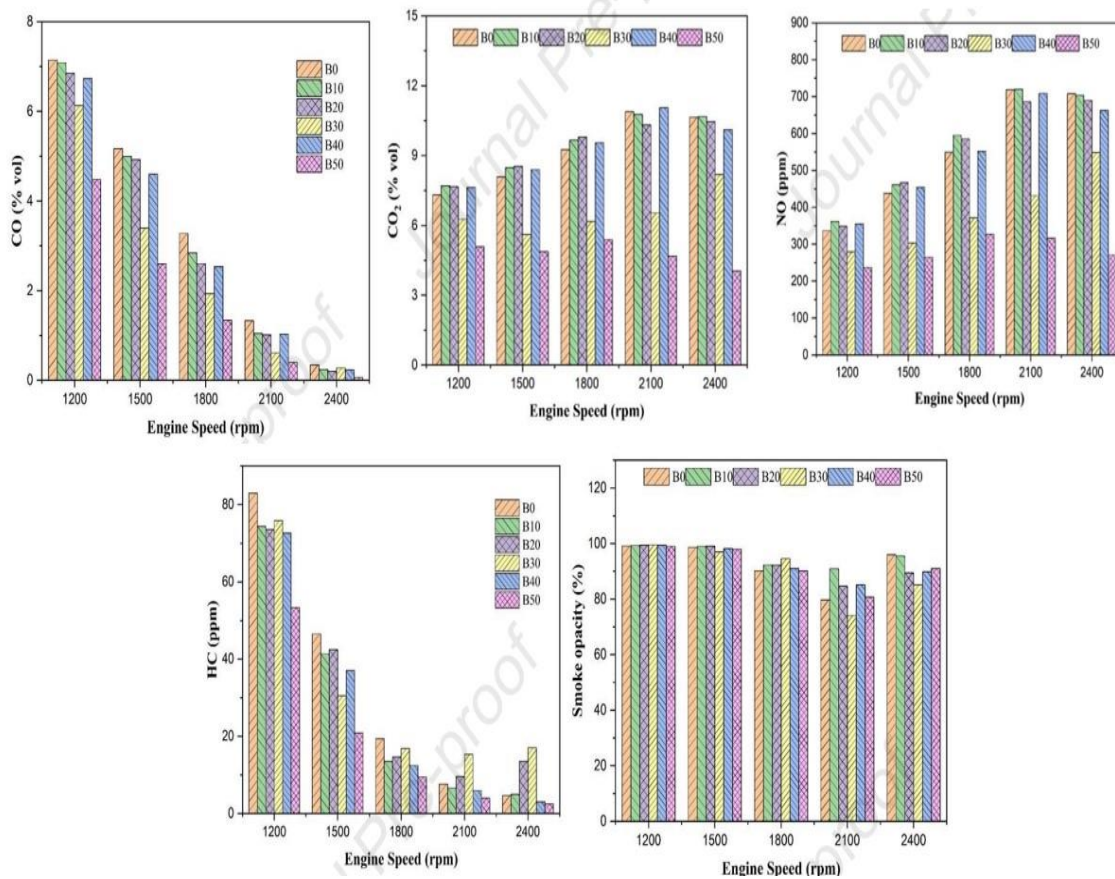


Figure 3.2 : Variations des émissions (CO, CO₂, NO_x, HC, fumées) du moteur pour les mélanges biodiesel-diesel [33].

Les résultats de cette étude expérimentale ont montré que le mélange du biodiesel préparé à partir huile de cuisson usagée avec du diesel pur permet d'améliorer les performances du moteur et de réduire les émissions de gaz d'échappement.

Ces données expérimentales ont été récupérées à l'aide de logiciel Digitizer et organisées sous forme de tableau Excel comme présenté sur les figures 3.3 et 3.4.

Chapitre 03 : Prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission du moteur diesel.

consommation de carburant spécifique au frein (BSFC) (g/kWh)						
	B0	B10	B20	B30	B40	B50
1200	459	463	486	483	486	452
1500	439	445	415	450	439	432
1800	411	393	398	418	393	382
2100	379	370	382	398	369	374
2400	382	387	393	398	396	388
Rendement thermique au frein (BTE) (%)						
	B0	B10	B20	B30	B40	B50
1200	17.3	17.7	16.8	17.3	17.3	19
1500	18.1	18.4	19.7	18.6	19.2	19.9
1800	19.3	20.8	20.5	20	21.4	22.5
2100	20.9	22.1	21.4	21	22.9	23
2400	20.8	21.1	20.7	21	21.3	22.1
Couple du moteur (Nm)						
	B0	B10	B20	B30	B40	B50
1200	33.5	34.3	34.1	33.6	34.8	34.5
1500	33.2	34	34	33.5	34.6	34.6
1800	33.2	33.5	33.4	32.9	34	34.2
2100	32.5	32.7	32.5	31.7	32.8	32.9
2400	29.6	29.8	29.5	29	29.6	29.7
Puissance au frein (kW)						
	B0	B10	B20	B30	B40	B50
1200	4.19	4.3	4.28	4.22	4.38	4.34
1500	5.21	5.34	5.34	5.24	5.45	5.45
1800	6.28	6.32	6.28	6.21	6.42	6.45
2100	7.11	7.2	7.15	6.98	7.2	7.25
2400	7.43	7.49	7.4	7.28	7.43	7.47

Figure 3.3 : Valeurs des paramètres de performances du moteur diesel.

Chapitre 03 : Prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission du moteur diesel.

Monoxyde de carbone (CO) (% vol)						
	B0	B10	B20	B30	B40	B50
1200	7.14	7.08	6.85	6.12	6.7	4.47
1500	5.16	5	4.92	3.38	4.58	2.57
1800	3.27	2.83	2.58	1.9	2.52	1.3
2100	1.31	1.02	1	0.58	0.99	0.39
2400	0.32	0.21	0.17	0.24	0.21	0.04
Dioxyde de carbone (CO2) (% vol)						
	B0	B10	B20	B30	B40	B50
1200	7.3	7.7	7.6	6.25	7.65	5.08
1500	8.06	8.45	8.5	5.58	8.4	4.86
1800	9.24	9.66	9.79	6.15	9.54	5.37
2100	10.9	10.8	10.3	6.52	11	4.63
2400	10.6	10.7	10.5	8.2	10.1	4
Oxyde nitrique (NO) (PPm)						
	B0	B10	B20	B30	B40	B50
1200	336	360	346	278	353	235
1500	437	462	465	301	454	263
1800	548	593	583	371	552	326
2100	719	719	685	430	709	316
2400	708	703	690	547	664	270
Hydrocarbures (HC) (PPm)						
	B0	B10	B20	B30	B40	B50
1200	83	74.2	73.5	75.9	72.5	53.2
1500	46.3	41.2	42.3	30.3	36.9	20.9
1800	19.2	13.3	14.6	16.6	14.2	9.2
2100	7.5	6.4	9.6	15.2	5.6	3.9
2400	4.5	4.7	13.1	16.8	2.9	2.2
Opacité de la fumée (%)						
	B0	B10	B20	B30	B40	B50
1200	99	99	99.5	99.5	99	99
1500	98.5	99	99	97.2	98.1	97.6
1800	90.1	92.2	92.2	94.4	91	90.1
2100	79.5	90.5	84.4	74	85.2	80.3
2400	95.9	95.3	89.4	85.2	89.7	91.1

Figure 3.4 : Valeurs des Caractéristiques d'émissions de gaz d'échappement du moteur diesel.

Chapitre 03 : Prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission du moteur diesel.

3.3. Normalisation de la base de données

Avant de commencer toute analyse de base de données, il est crucial de normaliser les données. Une normalisation adéquate des variables d'entrée et de sortie est essentielle pour assurer des résultats précis. Dans cette optique, toutes les données sélectionnées ont été ajustées à une plage de [0-1], en se basant sur les valeurs minimales et maximales de chaque catégorie. Cette adaptation a été réalisée à l'aide de l'équation (3.1), afin de les rendre compatibles avec la fonction d'activation dans la couche cachée et la couche de sortie du réseau neuronal artificiel (RNA).

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (3.1)$$

X' : Valeur normalisée ;

X_{min} : Valeurs minimales de X ;

X_{max} : Valeurs maximales de X ;

Les valeurs des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission après la normalisation sont organisées sous forme de tableau Excel comme présenté sur les figures 3.5 et 3.6, respectivement.

Chapitre 03 : Prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission du moteur diesel.

B%	Vitesse	BSFC	BTE	Torque	Power
0	0	0.769231	0.080645	0.775862	0
0	0.25	0.598291	0.209677	0.724138	0.309091
0	0.5	0.358974	0.403226	0.724138	0.633333
0	0.75	0.08547	0.66129	0.603448	0.884848
0	1	0.111111	0.645161	0.103448	0.981818
0.2	0	0.803419	0.145161	0.913793	0.033333
0.2	0.25	0.649573	0.258065	0.862069	0.348485
0.2	0.5	0.205128	0.645161	0.775862	0.645455
0.2	0.75	0.008547	0.854839	0.637931	0.912121
0.2	1	0.153846	0.693548	0.137931	1
0.4	0	1	0	0.87931	0.027273
0.4	0.25	0.393162	0.467742	0.862069	0.348485
0.4	0.5	0.247863	0.596774	0.758621	0.633333
0.4	0.75	0.111111	0.741935	0.603448	0.89697
0.4	1	0.205128	0.629032	0.086207	0.972727
0.6	0	0.974359	0.080645	0.793103	0.009091
0.6	0.25	0.692308	0.290323	0.775862	0.318182
0.6	0.5	0.418803	0.516129	0.672414	0.612121
0.6	0.75	0.247863	0.677419	0.465517	0.845455
0.6	1	0.247863	0.677419	0	0.936364
0.8	0	1	0.080645	1	0.057576
0.8	0.25	0.598291	0.387097	0.965517	0.381818
0.8	0.5	0.205128	0.741935	0.862069	0.675758
0.8	0.75	0	0.983871	0.655172	0.912121
0.8	1	0.230769	0.725806	0.103448	0.981818
1	0	0.709402	0.354839	0.948276	0.045455
1	0.25	0.538462	0.5	0.965517	0.381818
1	0.5	0.111111	0.919355	0.896552	0.684848
1	0.75	0.042735	1	0.672414	0.927273
1	1	0.162393	0.854839	0.12069	0.993939

Figures 3.5 : Valeurs normalisées des paramètres de performances du moteur diesel.

Chapitre 03 : Prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission du moteur diesel.

B%	Vitesse	CO	CO2	NO	HC	fumée
0	0	1	0.471429	0.208678	1	0.980392
0	0.25	0.721127	0.58	0.417355	0.545792	0.960784
0	0.5	0.45493	0.748571	0.646694	0.210396	0.631373
0	0.75	0.178873	0.985714	1	0.065594	0.215686
0	1	0.039437	0.942857	0.977273	0.028465	0.858824
0.2	0	0.991549	0.528571	0.258264	0.891089	0.980392
0.2	0.25	0.698592	0.635714	0.469008	0.482673	0.980392
0.2	0.5	0.392958	0.808571	0.739669	0.137376	0.713725
0.2	0.75	0.138028	0.971429	1	0.05198	0.647059
0.2	1	0.023944	0.957143	0.966942	0.030941	0.835294
0.4	0	0.959155	0.514286	0.229339	0.882426	1
0.4	0.25	0.687324	0.642857	0.475207	0.496287	0.980392
0.4	0.5	0.357746	0.827143	0.719008	0.153465	0.713725
0.4	0.75	0.135211	0.9	0.929752	0.091584	0.407843
0.4	1	0.01831	0.928571	0.940083	0.134901	0.603922
0.6	0	0.856338	0.321429	0.088843	0.912129	1
0.6	0.25	0.470423	0.225714	0.136364	0.347772	0.909804
0.6	0.5	0.261972	0.307143	0.280992	0.178218	0.8
0.6	0.75	0.076056	0.36	0.402893	0.160891	0
0.6	1	0.028169	0.6	0.644628	0.180693	0.439216
0.8	0	0.938028	0.521429	0.243802	0.87005	0.980392
0.8	0.25	0.639437	0.628571	0.452479	0.429455	0.945098
0.8	0.5	0.349296	0.791429	0.654959	0.148515	0.666667
0.8	0.75	0.133803	1	0.979339	0.042079	0.439216
0.8	1	0.023944	0.871429	0.886364	0.008663	0.615686
1	0	0.623944	0.154286	0	0.631188	0.980392
1	0.25	0.356338	0.122857	0.057851	0.231436	0.92549
1	0.5	0.177465	0.195714	0.188017	0.086634	0.631373
1	0.75	0.049296	0.09	0.167355	0.02104	0.247059
1	1	0	0	0.072314	0	0.670588

Figures 3.6 : Valeur normaliser des caractéristiques des émissions de gaz d'échappement.

Chapitre 03 : Prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission du moteur diesel.

3.4. Modèles basés sur les réseaux de neurones artificiels

Deux modèles distincts sont élaborés à l'aide de logiciel de programmation Matlab R2015a. Le premier modèle est conçu pour prédire les paramètres de performance, BTE, BSFC, C et BP.

Quant au deuxième modèle, il est développé pour prédire les caractéristiques d'émission qui sont le CO, le CO₂, les HC, le NO_x et l'opacité des fumées.

Les entrées pour ces deux modèles comprennent le rapport de mélange diesel-biodiesel et la vitesse de rotation du moteur, sélectionnés en fonction des expériences réalisées dans le travail cité précédemment.

Les données expérimentales collectées sont réparties en trois ensembles distincts. Le premier ensemble, représentant 70 % des données, sert à l'entraînement du modèle. Le deuxième ensemble, couvrant 15 % des données, est utilisé pour la validation du modèle. Enfin, le troisième ensemble, également de 15 %, est réservé pour tester le modèle.

Les performances des réseaux de neurones artificiels (RNA) dépendent de plusieurs paramètres, tels que le nombre de couches cachées, le nombre de neurones par couche, la fonction d'activation et l'algorithme d'entraînement. Un choix inadéquat de ces paramètres peut entraîner des résultats insatisfaisants. Pour déterminer les valeurs optimales et améliorer les prédictions des performances et des caractéristiques d'émission, deux méthodes sont employées.

3.2.3.1. Méthode 01 « Essais et erreurs (trials and error) »

Cette méthode implique de tester différents paramètres, de les ajuster et d'évaluer les performances du modèle à chaque itération. En utilisant l'outil « NN Toolbox » qui est déjà pré-défini sur Matlab.

Pour les deux modèles, le nombre de neurones est varié entre 2 et 12, le nombre de couches cachées est ajusté à une seule couche cachée 1, et les fonctions d'activation testées pour la couche cachée sont la log-sigmoïde et la tan-sigmoïde. La fonction d'activation utilisée pour la couche de sortie est la fonction linéaire pure-line. L'algorithme de rétropropagation (feed-forward backpropagation) est utilisé pour entraîner les deux modèles, tandis que l'algorithme d'apprentissage de Levenberg-Marquardt est employé pour construire la structure des réseaux.

Chapitre 03 : Prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission du moteur diesel.

3.2.3.2. Méthode 02 « Elaboration d'un code pour un modèle hybride AG-RNA »

La performance et la précision des modèles RNA dépend de plusieurs paramètres, notamment, le nombre de neurones dans chaque couche cachée, la fonction d'activation et l'algorithme d'entraînement. Un petit nombre de neurones peut ne pas conduire à une bonne approximation et en même temps, des structures compliquées avec un trop grand nombre de neurones et plusieurs couches cachées prendront du temps et pourraient ne pas présenter une meilleure approximation.

La détermination de l'architecture optimale à l'aide de la première méthode « essais et erreurs » prend du temps et peut ne pas présenter un résultat précis.

Afin d'améliorer les performances des modèles RNA et remédier aux défis de la méthode « essais et erreurs », le RNA est couplé à l'algorithme d'optimisation AG pour optimiser la distribution initiale de l'ensemble de données pour contrôler la sélection aléatoire et déterminer l'architecture optimale pour une prédiction précise en optimisant le nombre de neurones dans les couches cachées et la sélection des fonctions d'activation à utiliser.

Pour se faire, un code de programmation sous le langage Matlab a été élaboré et il est présenté sur l'organigramme de la figure 3.7.

Chapitre 03 : Prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission du moteur diesel.

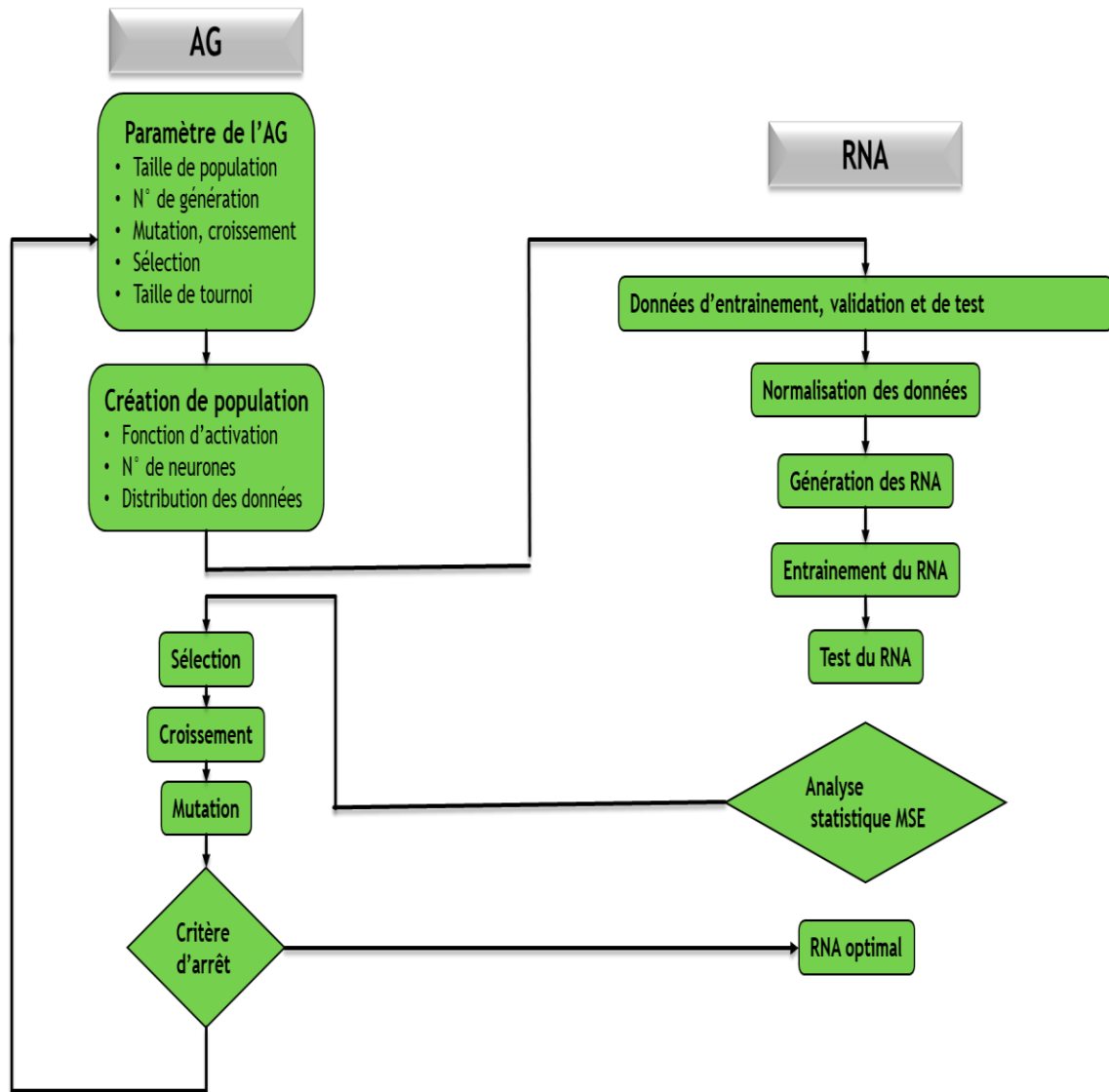


Figure 3.7 : Organigramme du code AG-RNA.

Il est décrit comme suit : L'ensemble de données est divisé en ensemble de données d'entraînement, de test et de validation (70%, 15%, 15%, respectivement). Une population initiale est créée par l'algorithme génétique. Cette population est composée de plusieurs chromosomes qui représentent la distribution de la matrice de l'ensemble de données, le nombre de neurones et la fonction d'activation (les paramètres à optimiser par l'AG). Le MSE est utilisé comme fonction de fitness pour évaluer les valeurs de fitness de ces chromosomes. Les opérateurs de sélection, de croisement et de mutation de l'AG sont activés pour générer la

Chapitre 03 : Prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission du moteur diesel.

population de la population suivante. L'opérateur de sélection sélectionne les meilleurs chromosomes en fonction de leurs valeurs mises à l'échelle et en tenant compte des critères de fitness. Les chromosomes sélectionnés sont transférés à la génération suivante. L'opérateur de croisement combine des parties particulières des chromosomes parents afin de produire de nouveaux individus. L'opérateur de mutation modifie les éléments des chromosomes afin que les chromosomes de la nouvelle génération ne soient pas piégés dans un optimum local. Des valeurs adaptatives sont calculées pour estimer l'adaptation de chaque individu et les critères d'arrêt pour terminer l'algorithme sont définis. Les solutions obtenues sont évaluées par la fonction fitness. Si le critère d'arrêt est atteint, l'AG termine son calcul et les paramètres optimisés sont générés. Les paramètres de fonctionnement de l'AG sont présentés sur le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Paramètres du GA pour l'optimisation de l'architecture ANN et ANFIS.

Paramètres	AG-RNA
Fonction de mutation	Contraint dépendent
Fonction de croisement	Intermédiaire
Croisement	0.8
Fonction de sélection	Tournoi
Taille de tournoi	2
Nombre de génération	100
Taille de population	200

3.5. Indicateurs de performances

Pour mesurer les performances et valider les modèles développés, le coefficient de corrélation linéaire (R) et le carré moyen des erreurs (MSE) sont utilisés, conformément à l'Equation (3.2) et Equation (3.3).

Chapitre 03 : Prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission du moteur diesel.

$$MSE_{err}^f = \frac{\sum (E_i - P_i)^2}{N \sum E_i^2}$$

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{P}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}$$

E_i : Valeur expérimentale ;

P_i : Valeur prédite;

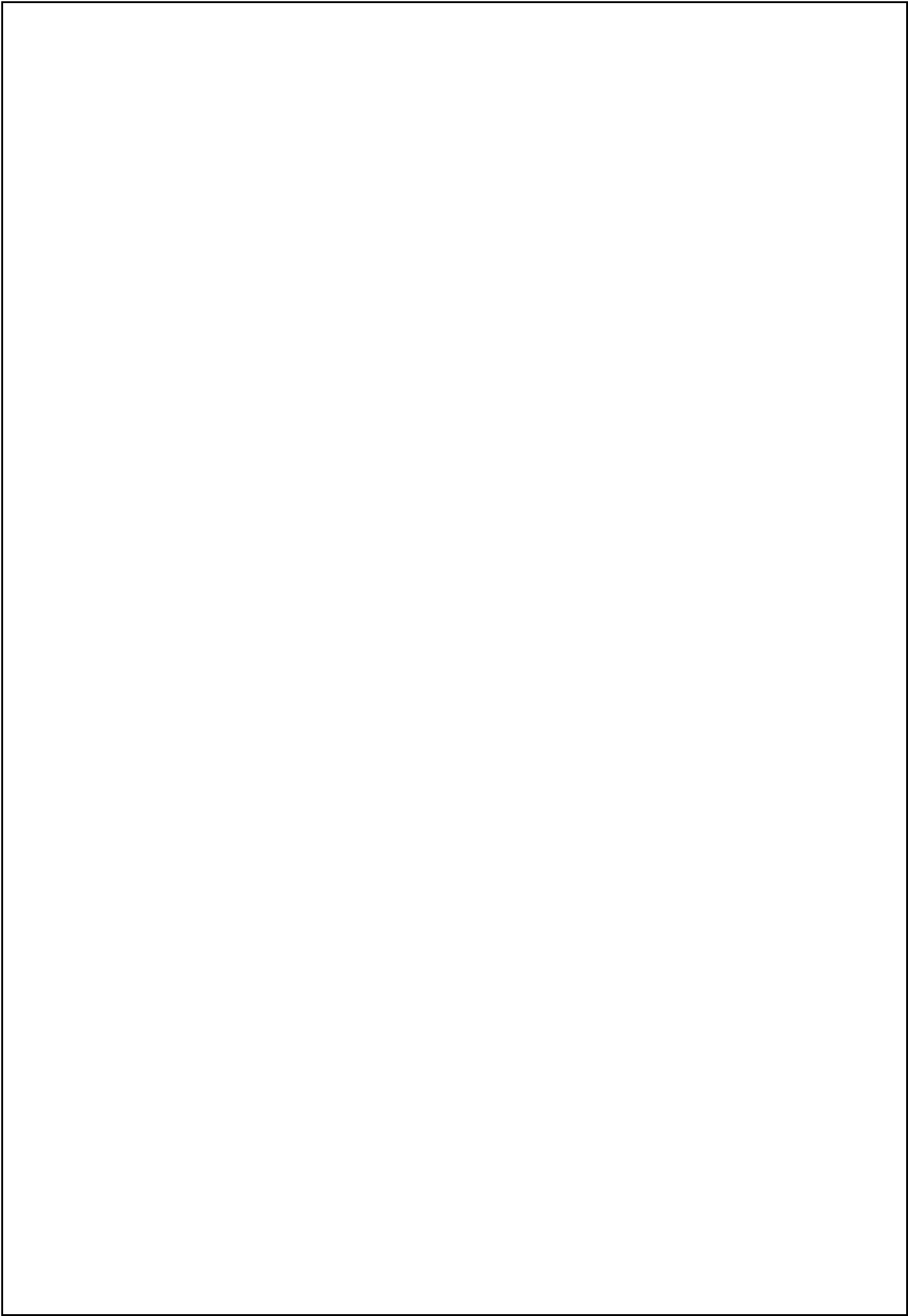
$\bar{P}_i$:Moyenne des données observées ;

N : Nombre de données ;

Le MSE (erreur quadratique moyenne) mesure la différence moyenne au carré entre les valeurs prédites par un modèle et les valeurs réelles des données expérimentales. Il est calculé en prenant la moyenne des carrés des écarts entre chaque prédiction et la valeur réelle correspondante. Un MSE plus faible indique une meilleure précision du modèle, car cela signifie que les valeurs prédites sont plus proches des valeurs réelles. Le MSE est fréquemment utilisé comme indicateur de précision pour les modèles de régression, où l'objectif est de prédire des valeurs numériques.

Le coefficient de détermination R (souvent noté simplement R) évalue l'ajustement global du modèle en mesurant la proportion de la variance totale des données expliquée par le modèle de régression. R est calculé en divisant la somme des carrés des résidus (les différences entre les valeurs réelles et les valeurs prédites) par la somme totale des carrés, qui mesure la dispersion des données par rapport à leur moyenne. Un R plus élevé (proche de 1) indique un meilleur ajustement du modèle, car cela signifie que la droite de régression explique une plus grande partie de la variabilité des données.

En résumé, le MSE évalue la précision individuelle des prédictions d'un modèle, tandis que R mesure l'ajustement global du modèle en examinant la proportion de la variance des données expliquée par le modèle de régression. Ces deux mesures sont couramment utilisées pour évaluer les performances des modèles prédictifs.



Chapitre 04

Résultat et discussion

Chapitre 04 : Résultat et discussion

4.1 Architecture des modèles développés

4.1.1 Méthode 1 : Essai et erreur “Trial and Error” (toolbox nntool)

Les résultats des essais utilisant la méthode des « essais et erreurs » pour déterminer l'architecture optimale des réseaux de neurones artificiels (RNA) en vue de prédire les paramètres de performance et les caractéristiques d'émission sont présentés dans les tableaux 4.1 et 4.2, respectivement.

Pour cette méthode la meilleure architecture obtenue pour la prédiction des paramètres de performance est composée de 4 neurones et une fonction Log-sigmoïde, alors que pour les caractéristiques d'émission la configuration contient 6 neurones et une fonction d'activation tan-sigmoïde. Ces paramètres ont été choisis

Tableau 4.1 : Résultats de la méthode Essais et Erreur pour la prédiction des paramètres de performance.

N° d'essai	N° de couche	N° de neurones	Fonction d'activation	MSE	R	N° d'époque
1	1	2	Log	0.0057054	0.9681	31
2	1	2	Tan	0.0073339	0.96462	4
3	1	4	Log	0.0041739	0.98191	13
4	1	4	Tan	0.0059032	0.96791	10
5	1	6	Log	0.0085205	0.9811	5
6	1	6	Tan	0.0068655	0.96201	7
7	1	8	Log	0.004952	0.97593	5
8	1	8	Tan	0.011279	0.97621	8
9	1	10	Log	0.016308	0.98159	11
10	1	10	Tan	0.018638	0.91222	2
11	1	12	Log	0.018984	0.89494	1
12	1	12	Tan	0.0091278	0.93064	2

Chapitre 04 : Résultat et discussion

Tableau 4.2 : Résultats de la méthode Essais et Erreur pour la prédiction de caractéristiques d'émissions.

N° d'essai	N° de couche	N° de neurones	Fonction d'activation	MSE	R	N° d'époque
1	1	2	Log	0.023186	0.89122	4
2	1	2	Tan	0.007462	0.91427	5
3	1	4	Log	0.049992	0.85157	1
4	1	4	Tan	0.022999	0.9236	6
5	1	6	Log	0.013376	0.92574	6
6	1	6	Tan	0.017693	0.97628	15
7	1	8	Log	0.042328	0.85523	5
8	1	8	Tan	0.069285	0.88548	2
9	1	10	Log	0.058378	0.88006	1
10	1	10	Tan	0.11833	0.8599	4
11	1	12	Log	0.056142	0.84724	1
12	1	12	Tan	0.060468	0.84874	1

4.1.1. Méthode 2 : Modèle Hybride AG-RNA

Après l'exécution du programme élaboré pour le modèle hybride AG-RNA qui permet d'optimiser la distribution des données, le nombre de neurones et la fonction d'activation de chaque modèle, les résultats sont présentés dans les tableaux 4.3.

Tableau 4.3 : résultats des modèles AG-RNA.

Modèle	Distribution	N° de neurones	Fonction D'activation	MSE	R
Paramètre de performance	3407617155	10	Log-sigmoïde	0.0029014	0.99471
Caractéristique d'émission	2036104939	12	Log-sigmoïde	0.0042552	0.9931

Chapitre 04 : Résultat et discussion

Selon les valeurs des indicateurs de performance MSE et R, l'architecture optimale du réseau de neurones artificiels qui présente une prédiction précise des paramètres de performances (BSFC, BTE, couple moteur et puissance de moteur) se compose d'une seule couche cachée, qui comprend 10 neurones avec une fonction d'activation « Log-sigmoïde ». De même, l'architecture optimale qui donne la meilleure prédiction des caractéristiques d'émissions (CO₂, CO, HC, NO et fumée) consiste en une seule couche cachée, qui comprend 12 neurones avec une fonction d'activation « Log-sigmoïde ». Les paramètres détaillés de ces topologies sont présentés dans le tableau 4.4 et illustrés dans les figures 4.1 et 4.2, respectivement.

Tableau 4.4 : Architecture optimale des RNAs.

Paramètre	RNA (les performance)	RNA (les émissions)
N° de couche caché	1	1
N° des neurones	10	12
Fonction d'activation	Log-sigmoïde	Log-sigmoïde
Algorithme d'apprentissage	Train LM	Train LM
N° de donné d'entraînement	21	21
N° de donné de validation	5	5
N° de donné de test	5	5
N° d'époque	71	25

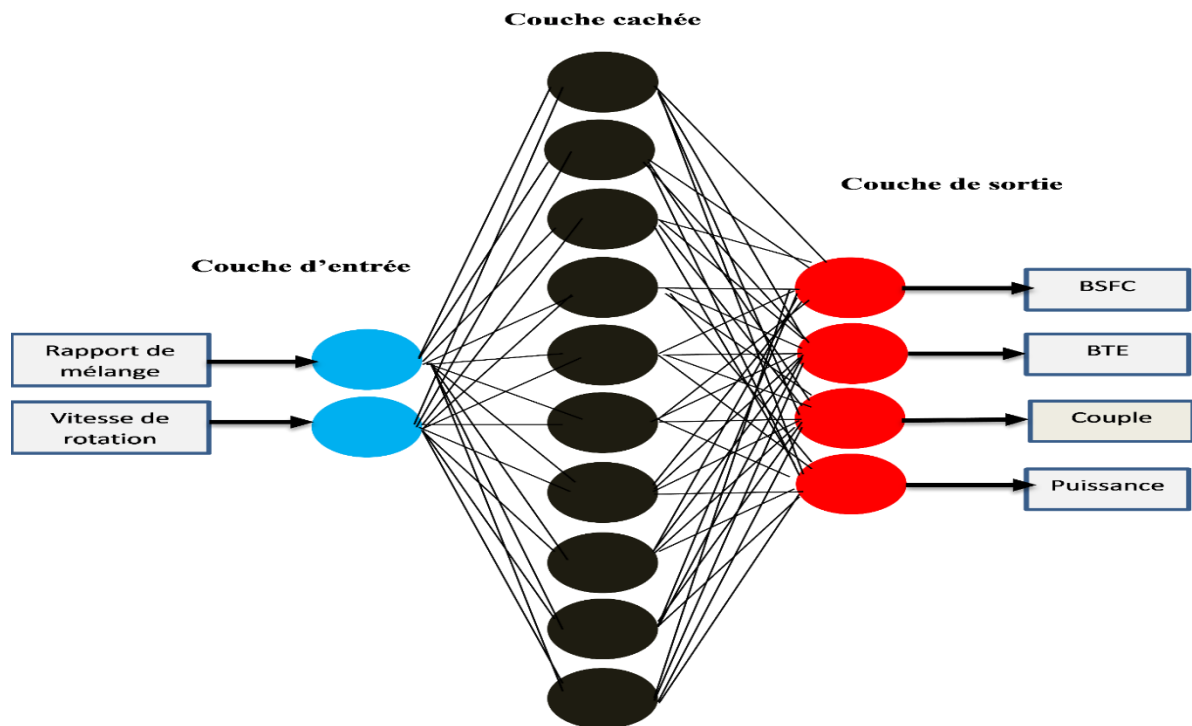


Figure 4. 1 : Architecture du modèle RNA pour la prédiction des paramètres de performances du moteur diesel.

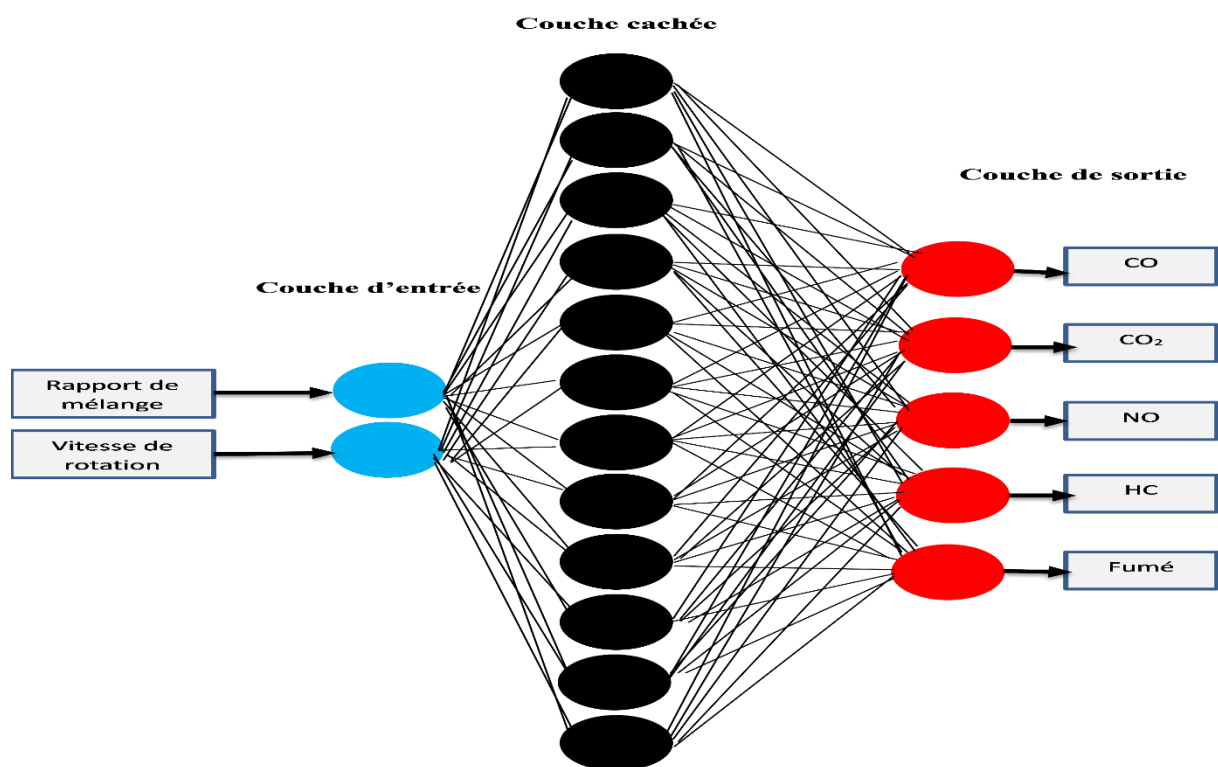


Figure 4.2 : Architecture du modèle RNA pour la prédiction des caractéristiques d'émission du moteur diesel.

4.2. Résultats de régression

Pour atteindre l'objectif de performance souhaité de 10^{-40} , l'entraînement a été effectué plusieurs en effectuant plusieurs époques. La variation de MSE en fonction du nombre d'époque pour la prédiction des paramètres de performance et des caractéristiques d'émission est présentée sur les figures 4.3 et 4.4 respectivement.

D'après les figures, on constate que la valeur du MSE a diminué et est restée constante lorsque le nombre d'époque a atteint 71 pour le premier modèle (performance), et 25 époques pour le deuxième modèle (émissions), avec des valeurs de MSE minimales de 0,0029014 et 0,0042552, respectivement. Ce nombre d'époque est utilisé pour figer l'architecture de chaque RNA et généré le modèle final.

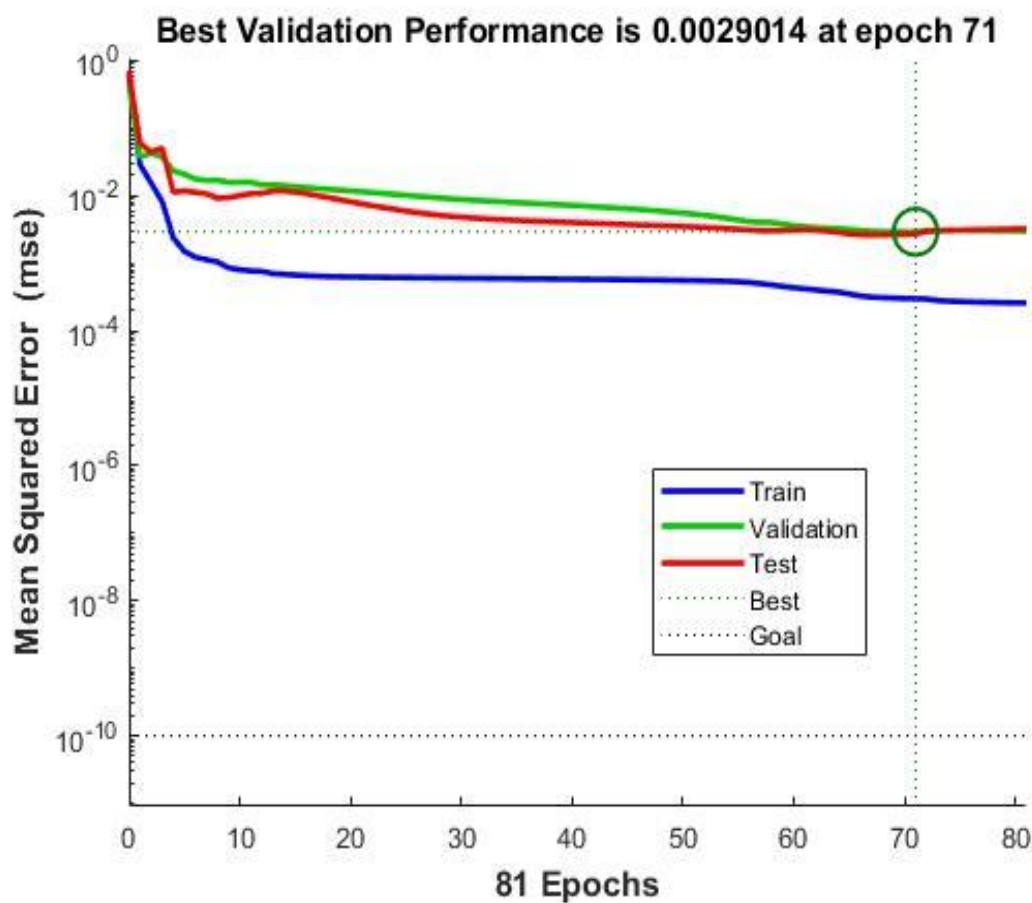


Figure 4.3 : Variation du MSE avec le nombre d'époques au cours du processus d'apprentissage : prédiction des paramètres de performance.

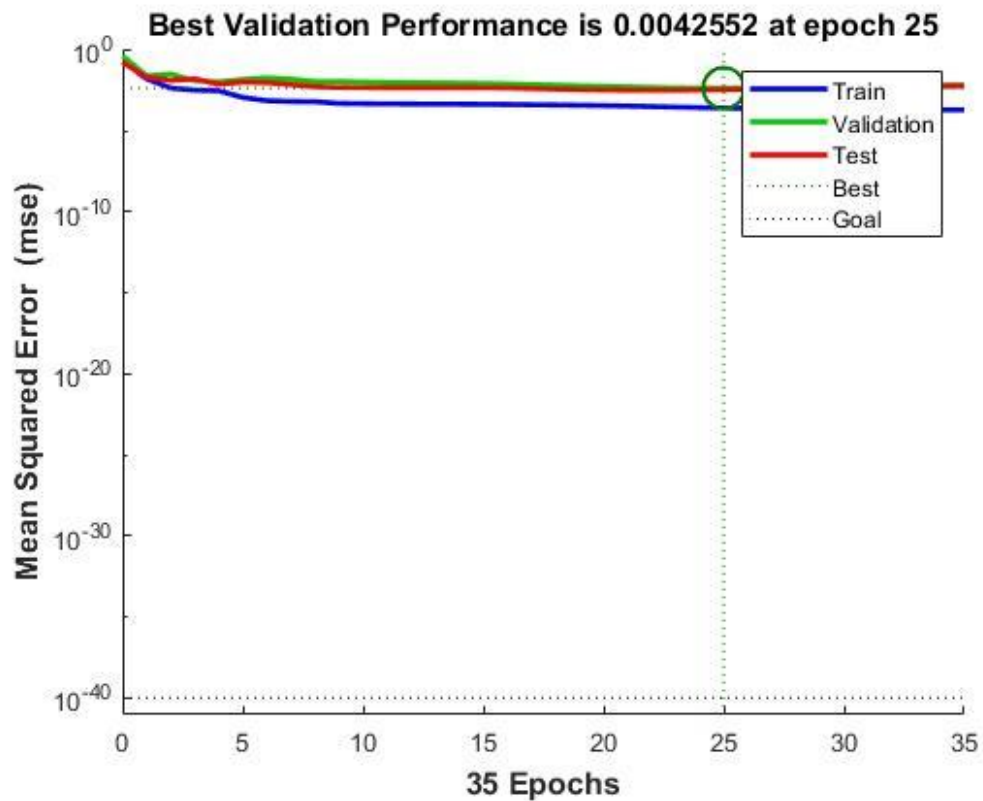


Figure 4.4 : Variation du MSE avec le nombre d'époques au cours du processus d'apprentissage : Prédiction des émissions.

Figure 4.5 et Figure 4.6 présentent les courbes de régression des valeurs des paramètres de performance et des caractéristiques d'émissions expérimentaux par rapport aux valeurs prédites pendant le processus d'entraînement, de validation, de test et de tout l'ensemble de données, respectivement. Les valeurs des R sont présentées dans le Tableau 4.5.

Les valeurs expérimentales des paramètres de performance et des caractéristiques d'émissions sont désignées par T (cible), tandis que les valeurs prédites sont notées Y (sortie). La régression linéaire entre T et Y représente un ajustement linéaire dont la forme idéale serait $Y = T$. Comme le montrent les figures, les données sont majoritairement proches de la ligne $Y = T$, inclinée à 45°, ce qui indique une forte corrélation entre les valeurs expérimentales et prédites normalisées. Quelques données seulement s'éloignent de cette ligne d'ajustement, probablement en raison du bruit des données expérimentales, entraînant des erreurs de prédiction.

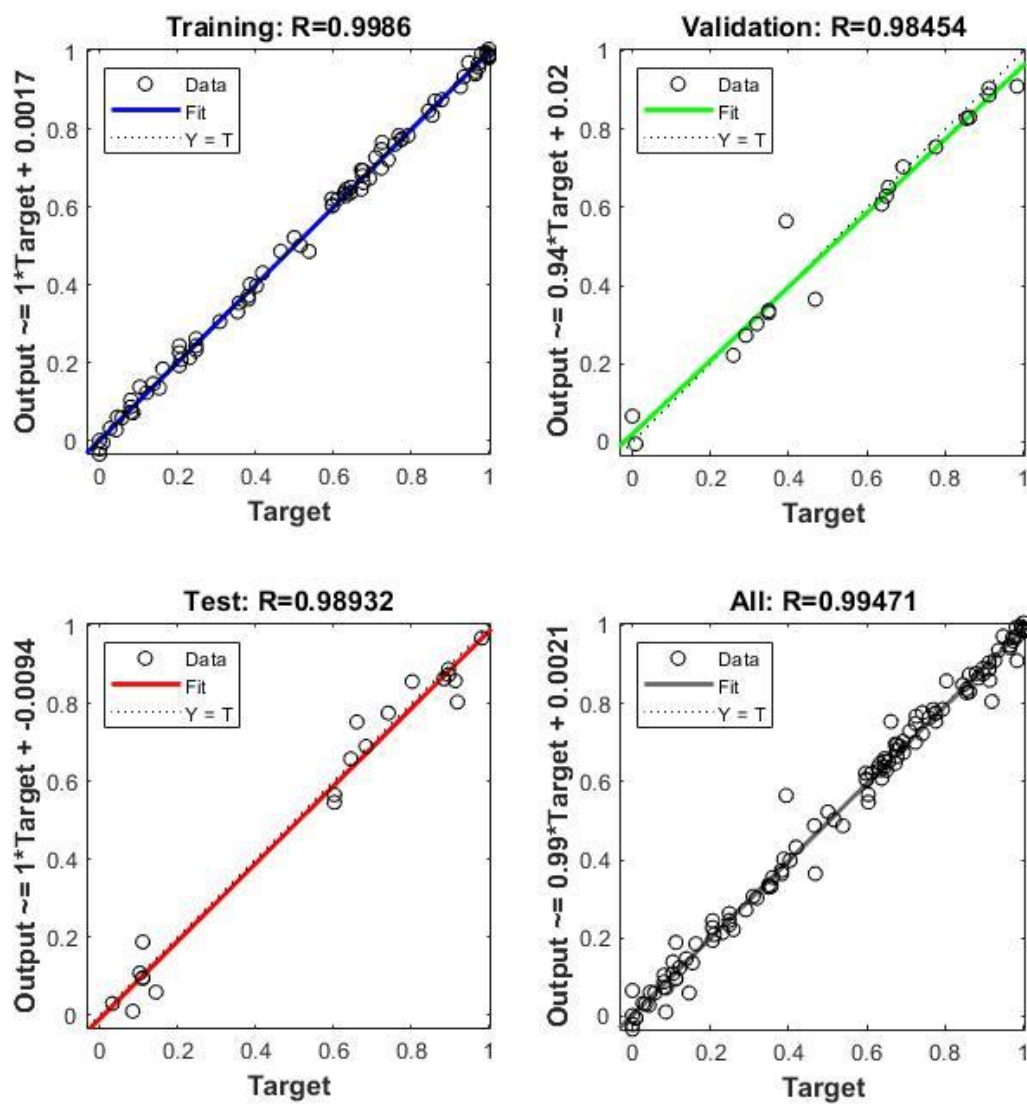


Figure 4.5 : Graphiques de régression du RNA pour la prédiction des paramètres de performance.

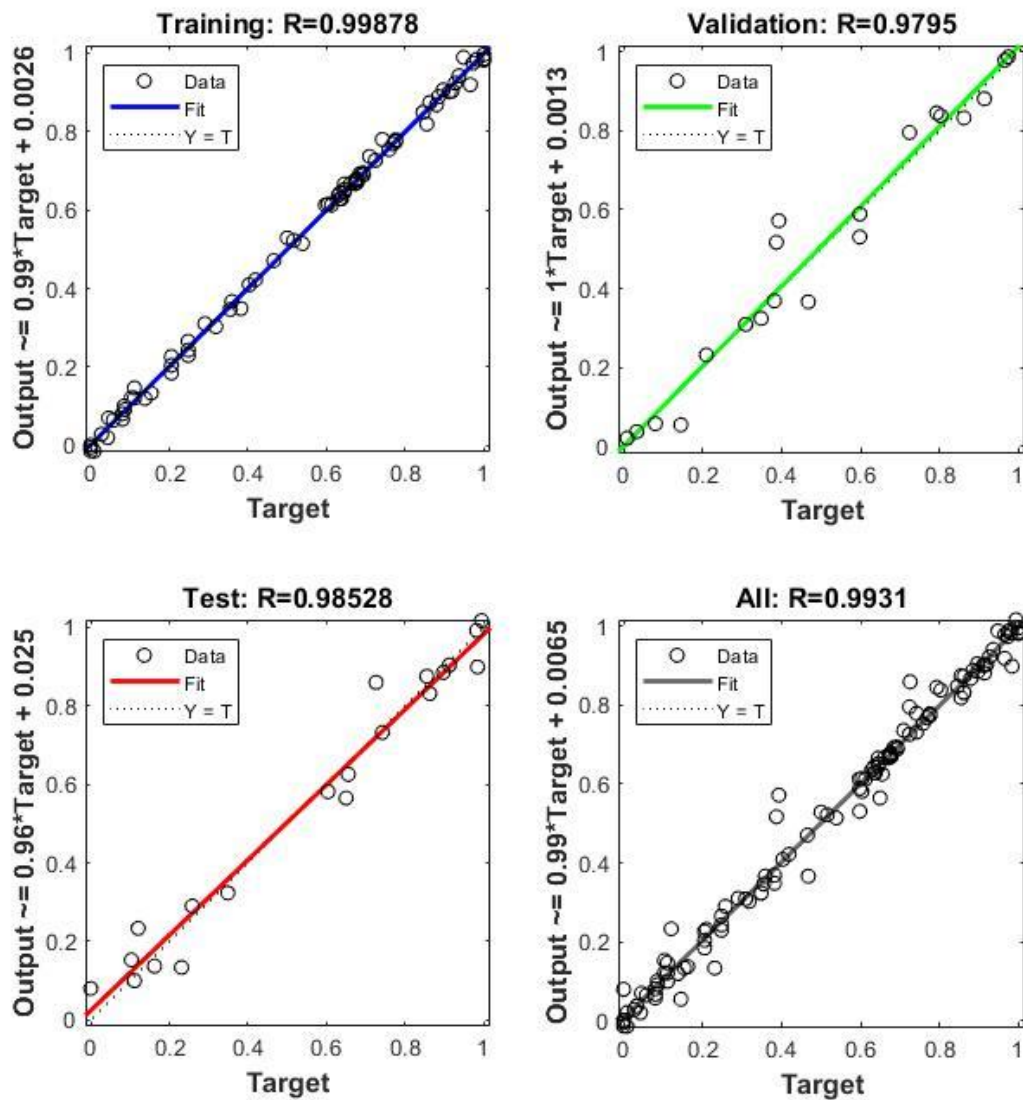


Figure 4.6 : Graphiques de régression du RNA pour la prédiction des caractéristiques d'émissions.

Les résultats du tableau 4.5 montrent que les valeurs de R pour les phases d'entraînement, de validation et de test sont toutes supérieures à 0,98 pour les deux modèles. L'ensemble de données a révélé une valeur maximale de R de 0,99471 pour la prédiction des paramètres de performance, et de 0,9931 pour la prédiction des caractéristiques d'émissions. Ces valeurs de R indiquent que 98 % de la variation totale a été capturée et expliquée par les modèles RNA, correspondant étroitement aux données expérimentales. La proximité des valeurs de R à 1 démontre l'efficacité et la précision élevées des modèles développés, reflétant des performances prédictives adaptées et adéquates.

Tableau 4.5 : Valeurs de R pour la prédiction des deux modèles prédictifs.

RNA	Processus	R
Paramètres de performances	Entrainement	0.9986
	Validation	0.98454
	Test	0.98932
	Tout l'ensemble de donnée	0.99471
Caractéristiques d'émission	Entrainement	0.99878
	Validation	0.9795
	Test	0.98528
	Tout l'ensemble de donnée	0.9931

4.3. Comparaison des résultats expérimentaux et prédits par AG-RNA

Les figures (4.7, 4.8, 4.9 et 4.10) présentent respectivement les résultats dénormalisés du rendement thermique (BTE), la consommation spécifique de carburant (BSFC), le couple du moteur (engine torque), et la puissance de moteur produites expérimentalement par rapports aux résultats prédites par le RNA. Ainsi que les figures (4.11, 4.12, 4.13, 4.14 et 4.15) présentent respectivement les résultats dénormalisés des émissions (CO, CO₂, HC, NO et fumée) déterminés expérimentalement et prédits par les modèles RNA.

On observe que les valeurs prédites sont relativement proches des valeurs expérimentales pour les deux modèles. Les deux modèles se sont bien adaptés aux données expérimentales présentant un écart inférieur à $\pm 5\%$, ce qui est très acceptable, et indique une précision de prédiction élevée. Cela indique l'adéquation de l'approche hybride développée basée sur les réseaux de neurones artificiels et l'algorithme génétique, pour la prédiction des paramètres de performances et des caractéristiques d'émission du moteur diesel alimenté par des mélange de diesel et biodiesel issu de l'huile de cuisson usagée.

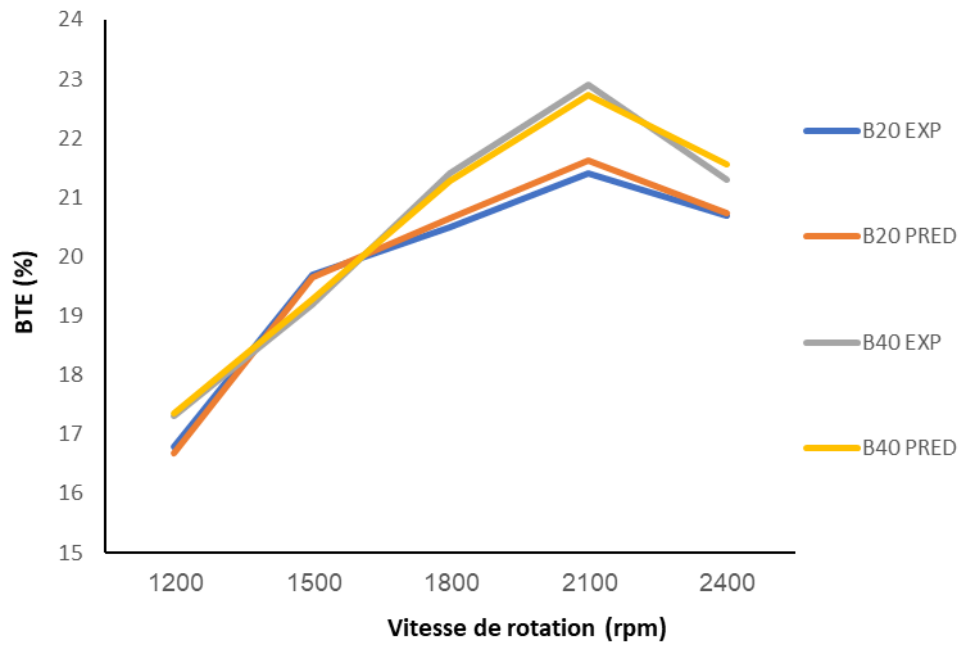


Figure 4.7 : Comparaison entre Rendement thermique (BTE) produit expérimentalement et prédit par le modèle AG-RNA.

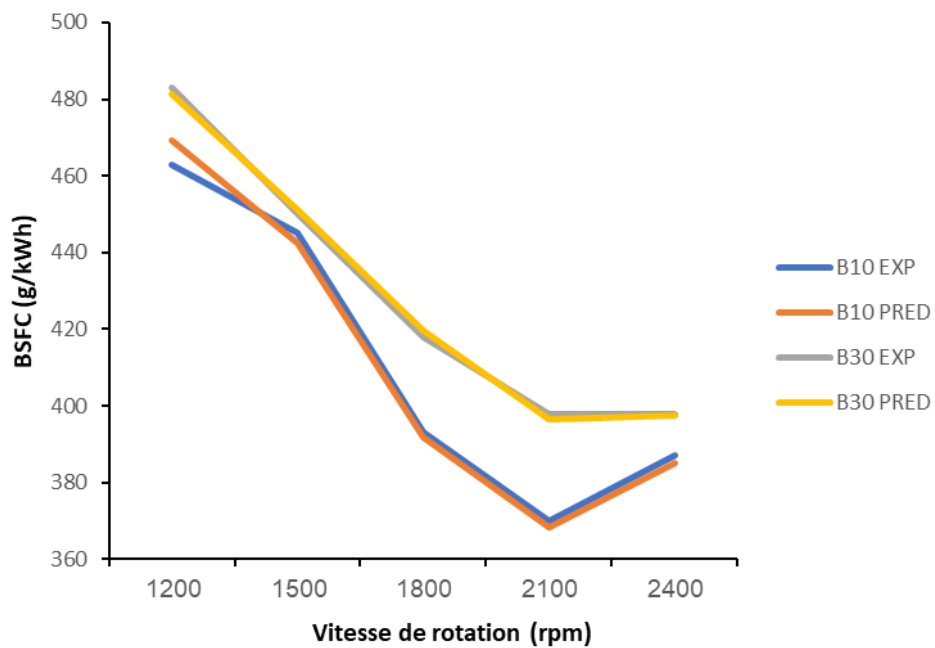


Figure 4.8 : Comparaison entre consommation de carburant spécifique de carburant (BSFC) produite expérimentalement et prédite par le modèle AG-RNA.

Chapitre 04 : Résultat et discussion

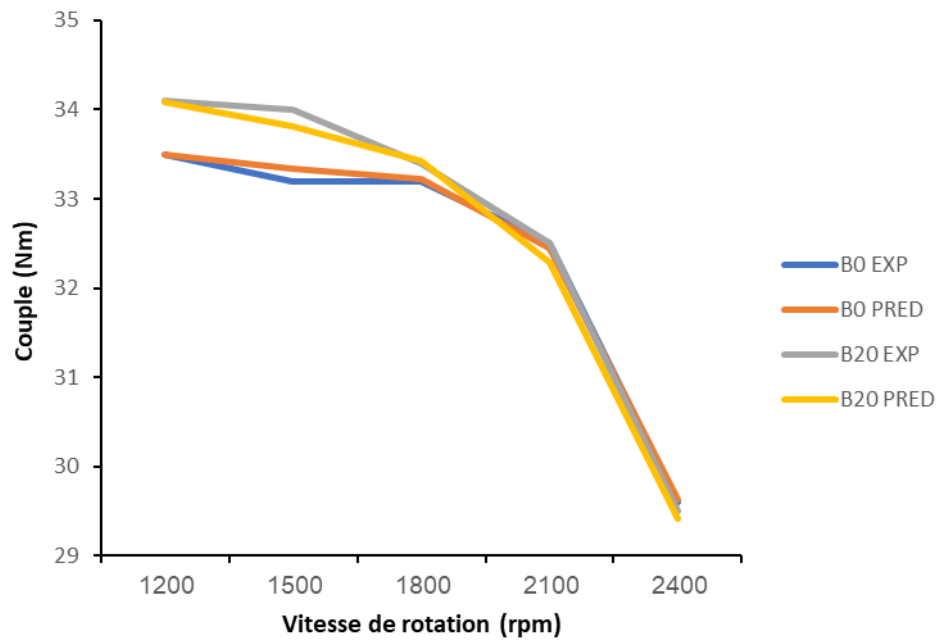


Figure 4.9 : Comparaison entre le couple du moteur produite expérimentalement et prédite par le modèle AG-RNA.

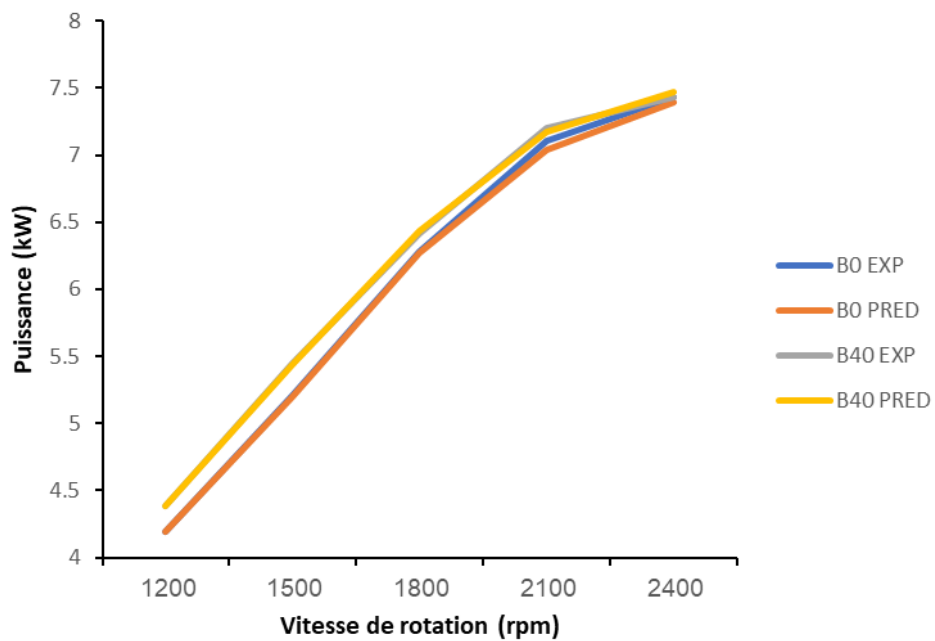


Figure 4.10: Comparaison entre la puissance de moteur produit expérimentalement et prédit par le modèle AG-RNA.

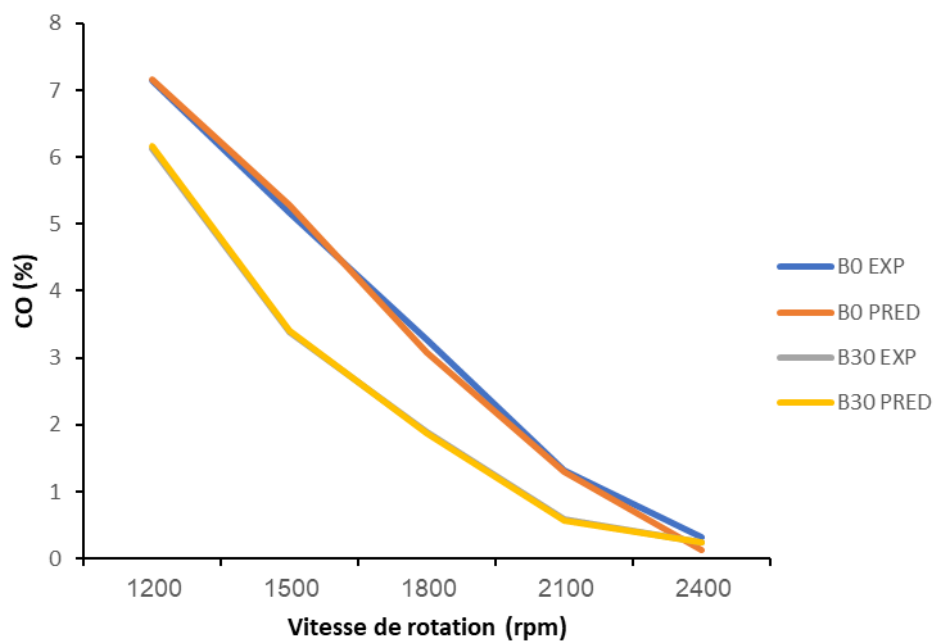


Figure 4.11 : Comparaison entre les émissions de CO produites expérimentalement et prédites par le modèle AG-RNA.

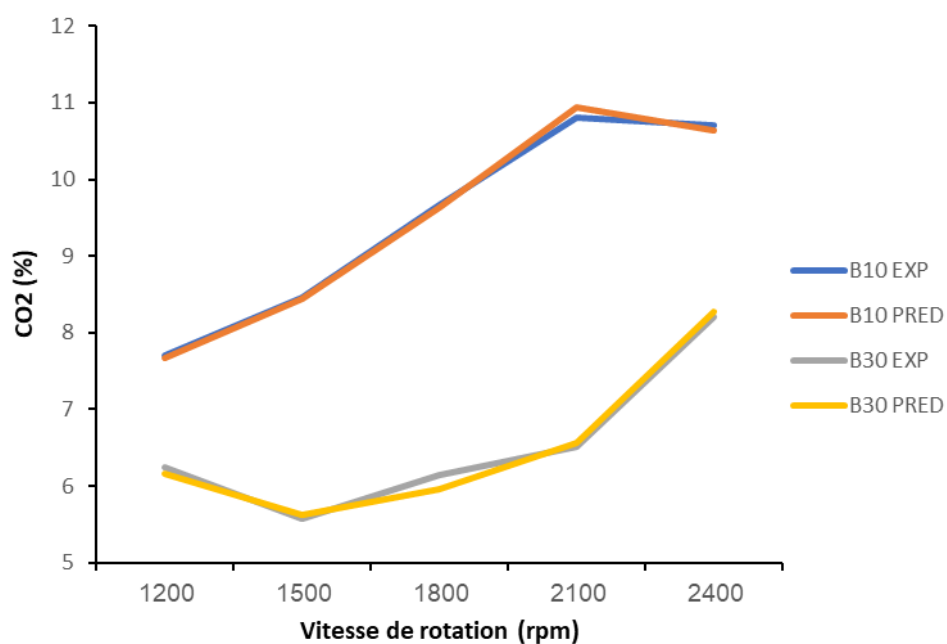


Figure 4.12 : Comparaison entre les émissions de CO₂ produites expérimentalement et prédites par le modèle AG-RNA.

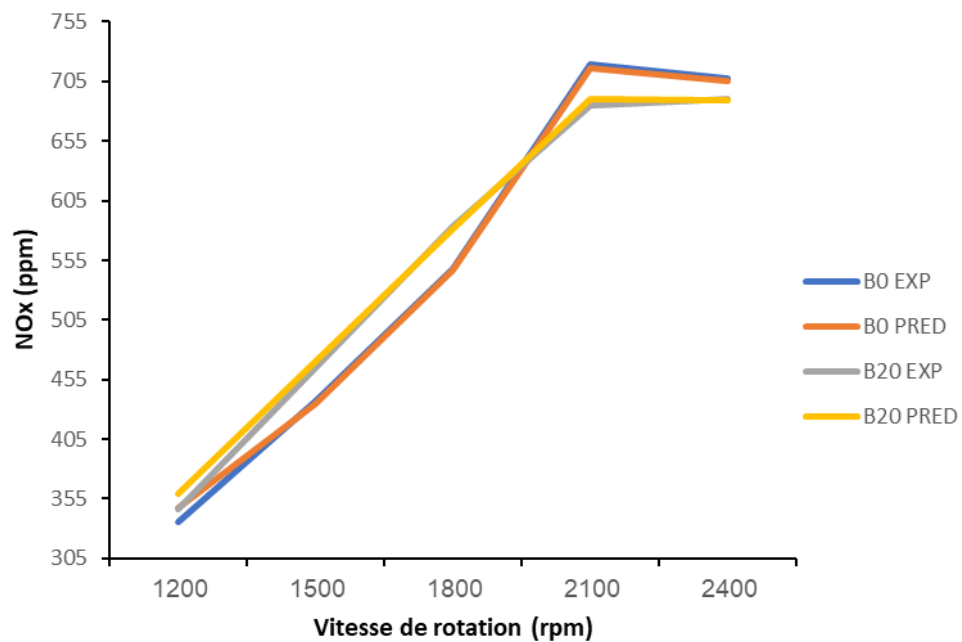


Figure 4.13 : Comparaison entre les émissions de NOx produites expérimentalement et prédites par le modèle AG-RNA.

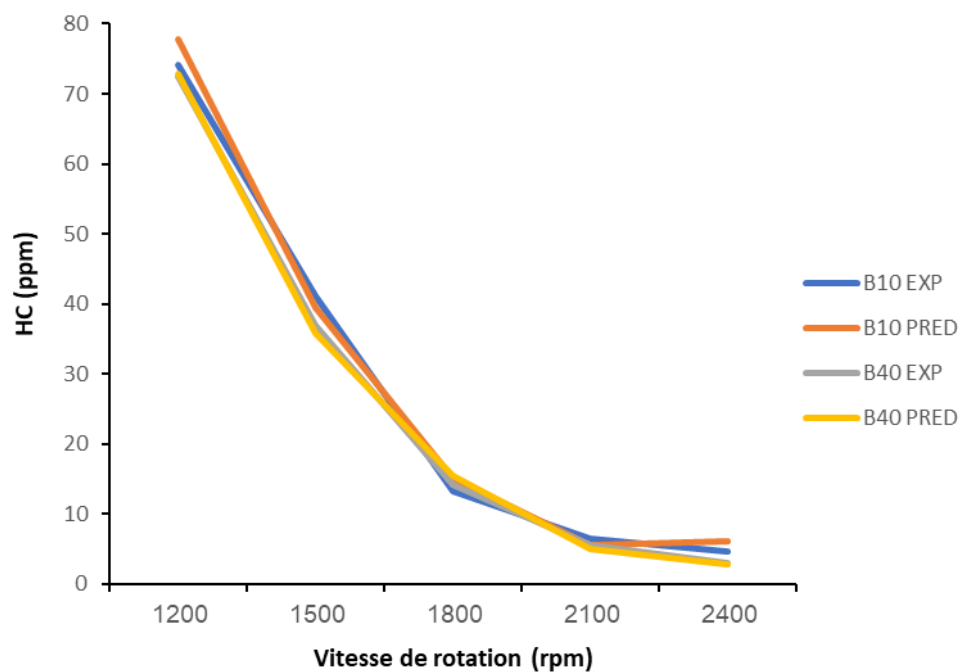


Figure 4.14 : Comparaison entre les émissions de HC produites expérimentalement et prédites par le modèle AG-RNA.

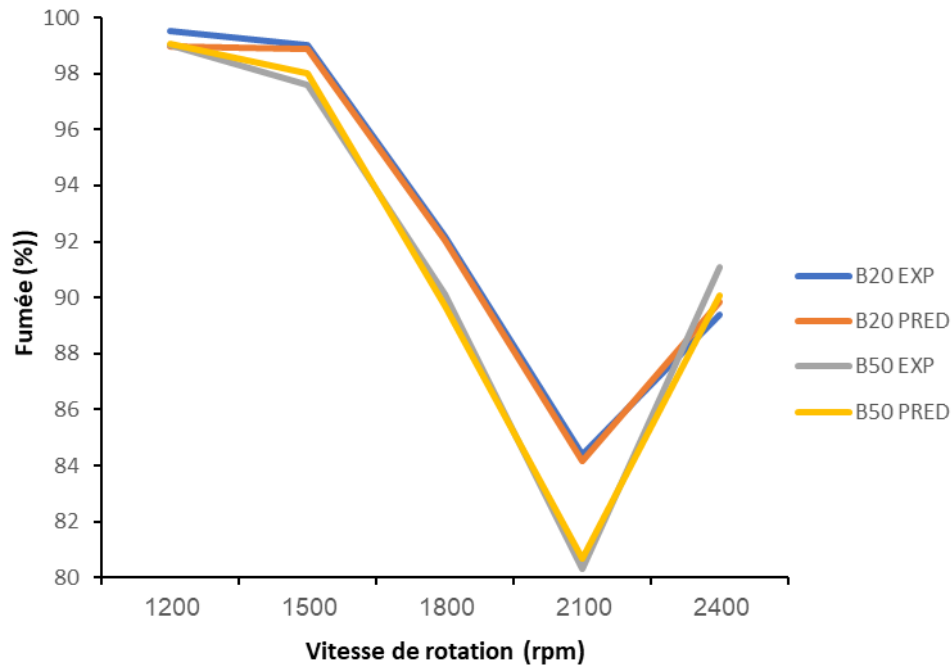


Figure 4.15 : Comparaison entre les émissions de fumée produites expérimentalement et prédites par le modèle AG-RNA.

4.5 Conclusion

Les résultats obtenus à partir des modèles AG-RNA démontrent la robustesse et la haute capacité prédictive de cette approche hybride pour estimer les paramètres de performance tels que le rendement effectif (BTE), la consommation spécifique de carburant (BSFC), le couple moteur et la puissance. De plus, cette méthode s'avère efficace pour prédire les caractéristiques d'émissions (CO, CO₂, HC, NO_x et opacité de fumée) d'un moteur diesel alimenté par un mélange de diesel-biodiesel extrait de l'huile de cuisson usagée. Cette efficacité est principalement attribuée à la rapidité et à la capacité d'apprentissage des RNA.

Par ailleurs, l'intégration l'AG aux modèles RNA a permis de déterminer la distribution des données, le nombre de neurones et la fonction d'activation adéquats pour une architecture optimale de RNA qui permet d'avoir une meilleure précision de prédiction et des performances élevées des modèles. Cette approche hybride AG-RNA s'est révélée efficace pour l'optimisation des configurations des RNA.

Conclusion générale

Conclusion générale

La nécessité de trouver des alternatives durables aux combustibles fossiles est devenue une priorité mondiale, en raison des préoccupations croissantes liées à la pollution environnementale et à l'épuisement des ressources naturelles. Dans ce contexte, l'utilisation de biocarburants, tels que le biodiesel dérivé d'huile de cuisson usagée, s'est imposée comme une solution prometteuse pour réduire l'empreinte carbone des moteurs à combustion interne.

Ce mémoire a mis en lumière le potentiel des réseaux de neurones artificiels couplés à l'algorithme génétique pour améliorer la modélisation des performances et des émissions des moteurs diesel fonctionnant avec des mélanges diesel-biodiesel. Deux modèles hybrides distincts GA-RNA ont été développés : le premier pour prédire les paramètres de performance du moteur, notamment le rendement thermique, la consommation spécifique de carburant, le couple et la puissance. Le second pour prédire les caractéristiques d'émission, telles que le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone, les hydrocarbures, les oxydes d'azote et l'opacité des fumées.

L'intégration de l'AG aux modèles RNA a permis de déterminer la distribution des données, le nombre de neurones et la fonction d'activation adéquats pour une architecture optimale de RNA qui permet d'avoir une meilleure précision de prédiction et des performances élevées des modèles. Cette approche hybride AG-RNA s'est révélée efficace pour l'optimisation des configurations des RNA.

Les résultats obtenus ont montré une forte corrélation entre les valeurs prédites par les modèles AG-RNA et les données expérimentales. Le modèle de performance a atteint un coefficient de corrélation linéaire (R) maximal de 0,99471, tandis que le modèle d'émissions a obtenu un R de 0,9931. Ces valeurs élevées de R , proches de 1, indiquent que les modèles RNA expliquent respectivement 99,47 % et 99,31 % de la variation totale des paramètres de performance et des caractéristiques d'émission, démontrant ainsi leur précision et leur robustesse.

La précision prédictive élevée des modèles AG-RNA résulte de leur capacité d'apprentissage à partir des ensembles de données expérimentales, couplée à leur rapidité de traitement. Ces modèles fournissent des prédictions fiables et adéquates pour les performances du moteur diesel et les émissions, illustrant l'efficacité de l'approche hybrides basée sur les RNA et l'AG pour ce type de problèmes complexes.

Les résultats obtenus soulignent la robustesse et la capacité prédictive élevée des RNA pour la modélisation et l'optimisation des moteurs diesel alimentés par des mélanges de biocarburants. Cette approche offre une méthode alternative robuste aux techniques de modélisation traditionnelles et peut être étendue à d'autres paramètres de performances, d'autres types de biocarburants et de configurations de moteur.

À l'avenir, les modèles développés pourront servir à l'optimisation du fonctionnement du moteur en maximisant les performances et en minimisant les émissions. Des recherches supplémentaires pourraient se concentrer ainsi sur l'amélioration des modèles RNA, en explorant d'autres algorithmes d'optimisation et en élargissant l'application de ces modèles à une gamme plus large de biocarburants et de configurations de moteur. L'intégration de techniques avancées de modélisation et d'optimisation contribuera à la conception de moteurs plus efficaces et plus respectueux de l'environnement, soutenant ainsi la transition vers des sources d'énergie plus durables.

Références bibliographie

Références bibliographie

- [1] Khair, M. K., & Majewsky, W. A. (2006). Diesel emissions and their control. SAE International.
- [2] Hoffmann, K. H., Watowich, S. J., & Berry, R. S. (1985). Optimal paths for thermodynamic systems: the ideal Diesel cycle. *Journal of Applied Physics*, 58(6), 2125-2134.
- [3] Sarikoç, S. (2020). Fuels of the diesel-gasoline engines and their properties. *Diesel and Gasoline Engines*, 31.
- [4] ASTM Committee D-2 on Petroleum Products and Lubricants. (2013). Standard test method for cetane number of diesel fuel oil. ASTM International.
- [5] Basha, J. S., & Anand, R. B. (Eds.). (2020). Recent technologies for enhancing performance and reducing emissions in diesel engines. IGI Global.
- [6] Tamilselvan, P., Nallusamy, N., & Rajkumar, S. (2017). A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1134-1159.
- [7] Sivaramakrishnan, K., & Ravikumar, P. (2012). Determination of cetane number of biodiesel and its influence on physical properties. *ARPJ Journal of engineering and Applied Sciences*, 7(2), 205-211.
- [8] Ozcanli, M., Gungor, C., & Aydin, K. (2013). Biodiesel fuel specifications: A review. *Energy Sources, Part A: recovery, utilization, and environmental effects*, 35(7), 635-647.
- [9] <https://fr.statista.com/statistiques/753684/production-de-biodiesel-par-pays-monde>
- [10] HAMEL, M. L., & OULED BRAHIM, S. (2021). Évaluation physico-chimique et l'activité biologique des extraits des grains de coton et leur utilisation dans la production de biodiesel et bioadsorbant (Doctoral dissertation).
- [11] Kamel, H., Ahmed, B., & Mostafa, K. (2023, December). Biodiesel production using a heterogeneous catalyst from *Balanites aegyptiaca* oil. In 2023 Second International Conference on Energy Transition and Security (ICETS) (pp. 1-5). IEEE.

- [12] Boulal, A., Khelafi, M., & Djaber, A. (2022). Quality Study of biodiesel produced from *Ricinus communis* L.(Kharouaa) in southwest Algeria. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 8(4).
- [13] Agatonovic-Kustrin, S., & Beresford, R. (2000). Basic concepts of artificial neural network (ANN) modeling and its application in pharmaceutical research. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, 22(5), 717-727.
- [14] Dongare, A. D., Kharde, R. R., & Kachare, A. D. (2012). Introduction to artificial neural network. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2(1), 189-194.
- [15] Sazlı, M. H. (2006). A brief review of feed-forward neural networks. *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A2-A3 Physical Sciences and Engineering*, 50(01).
- [16] Medsker, L., & Jain, L. C. (Eds.). (1999). *Recurrent neural networks: design and applications*. CRC press.
- [17] Ranganathan, A. (2004). The levenberg-marquardt algorithm. *Tutorial on LM algorithm*, 11(1), 101-110.
- [18] Mirjalili, S., & Mirjalili, S. (2019). Genetic algorithm. *Evolutionary algorithms and neural networks: Theory and applications*, 43-55.
- [19] Poon, P. W., & Carter, J. N. (1995). Genetic algorithm crossover operators for ordering applications. *Computers & Operations Research*, 22(1), 135-147.
- [20] Ghobadian, B., Rahimi, H., Nikbakht, A. M., Najafi, G., & Yusaf, T. F. (2009). Diesel engine performance and exhaust emission analysis using waste cooking biodiesel fuel with an artificial neural network. *Renewable energy*, 34(4), 976-982.
- [21] Pai, P. S., & Rao, B. S. (2011). Artificial neural network-based prediction of performance and emission characteristics of a variable compression ratio CI engine using WCO as a biodiesel at different injection timings. *Applied Energy*, 88(7), 2344-2354.
- [22] Ismail, H. M., Ng, H. K., Queck, C. W., & Gan, S. (2012). Artificial neural networks modelling of engine-out responses for a light-duty diesel engine fuelled with biodiesel blends. *Applied energy*, 92, 769-777.

- [23] Kumar, D. V., Kumar, P. R., & Kumari, M. S. (2013). Prediction of performance and emissions of a biodiesel fueled lanthanum zirconate coated direct injection diesel engine using artificial neural networks. *Procedia engineering*, 64, 993-1002.
- [24] Javed, S., Murthy, Y. S., Baig, R. U., & Rao, D. P. (2015). Development of ANN model for prediction of performance and emission characteristics of hydrogen dual fueled diesel engine with *Jatropha Methyl Ester* biodiesel blends. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 26, 549-557.
- [25] Tosun, E., Aydin, K., & Bilgili, M. (2016). Comparison of linear regression and artificial neural network model of a diesel engine fueled with biodiesel-alcohol mixtures. *Alexandria Engineering Journal*, 55(4), 3081-3089.
- [26] Rao, K. P., Babu, T. V., Anuradha, G., & Rao, B. A. (2017). IDI diesel engine performance and exhaust emission analysis using biodiesel with an artificial neural network (ANN). *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(3), 593-600.
- [27] Domínguez-Sáez, A., Rattá, G. A., & Barrios, C. C. (2018). Prediction of exhaust emission in transient conditions of a diesel engine fueled with animal fat using Artificial Neural Network and Symbolic Regression. *Energy*, 149, 675-683.
- [28] Gul, M., Shah, A. N., Aziz, U., Husnain, N., Mujtaba, M. A., Kousar, T., ... Hanif, M. F. (2019). Grey-Taguchi and ANN based optimization of a better performing low-emission diesel engine fueled with biodiesel. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(1), 1019–1032.
- [29] Aydın, M., Uslu, S., & Çelik, M. B. (2020). Performance and emission prediction of a compression ignition engine fueled with biodiesel-diesel blends: A combined application of ANN and RSM based optimization. *Fuel*, 269, 117472.
- [30] Karimmaslak, H., Najafi, B., Band, S. S., Ardabili, S., Haghighat-Shoar, F., & Mosavi, A. (2021). Optimization of performance and emission of compression ignition engine fueled with propylene glycol and biodiesel–diesel blends using artificial intelligence method of ANN-GA-RSM. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 15(1), 413-425.
- [31] Magesh, N., Pushparaj, T., Kannan, V. V., Thakur, D., Sharma, A., Razak, A., ... & Ketema, A. (2022). Experimental Investigation and Prediction of Performance, Combustion, and

Emission Features of a Diesel Engine Fuelled with Pumpkin-Maize Biodiesel using Different Machine Learning Algorithms. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022(1), 9505424.

[32] Pitchaiah, S., Juchelková, D., Sathyamurthy, R., & Atabani, A. E. (2023). Prediction and performance optimisation of a DI CI engine fuelled diesel–Bael biodiesel blends with DMC additive using RSM and ANN: Energy and exergy analysis. *Energy Conversion and Management*, 292, 117386.

[33] Mulkan, A., Zulkifli, N. W. M., Husin, H., & Dahlan, I. (2024). Performance and emissions assessment under full load operation of an unmodified diesel engine running on biodiesel-based waste cooking oil synthesized using JPW solid catalyst. *Renewable Energy*, 120145.