

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master
Spécialité : Travaux publics
Option : VOA

Présenté par :

MELIANI Mohamed
HEMAID Abdelkader

Sujet du mémoire

**Application des réseaux de neurones pour la prédiction de la
contribution des composites dans le renforcement au cisaillement
des poutres**

Soutenu publiquement le 28 juin 2025 devant le jury composé de :

- | | |
|-----------------|-----------------------|
| • Président | Pr. TLIDJI Youcef |
| • Rapporteur | Dr. BENFERHAT Rabia |
| • Co-rapporteur | Dr. BENSATTALAH Aissa |
| • Examinatrice | Dr. OUAZIR Khatima |
| • Examineur | Pr. DRAICHE Kada |

PROMOTION : 2024/2025

Remerciements

Avant toute chose, nous rends grâce à Dieu Tout-Puissant, source de force et de sagesse, qui m'a permis de mener à bien ce travail.

nous tiens à exprimer nous profonde gratitude à notre encadreur, pour son accompagnement précieux, ses conseils avisés, sa rigueur scientifique et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire. Sa bienveillance et son exigence ont été pour moi une source de motivation et de progrès constants.

Nous remercieront également les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail, pour l'intérêt qu'ils y portent et pour leurs remarques enrichissantes.

Ma reconnaissance va également à l'ensemble du corps enseignant du **département** de génie civil, dont les enseignements, le soutien et la bienveillance ont nourri mon parcours académique et personnel.

Sans oublier nous camarades de promotion et amis pour leur entraide, leur soutien moral et les moments partagés, si précieux durant ces années d'études.

En fin, nous dédiées une pensée particulière à nous familles. À nous parents, pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible, ainsi qu'à mes frères et sœurs, pour leur présence et leurs encouragements constants. Sans vous, rien de tout cela n'aurait été possible.

Dédicace

Je dédie ce travail à ceux qui occupent une place précieuse dans mon cœur.

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien constant tout au long de mon parcours. Sans leur présence bienveillante, leur patience et leurs prières, je n'aurais jamais pu accomplir ce chemin.

À mes frères et sœurs, pour leur encouragement, leur compréhension et leur affection, qui m'ont toujours donné la force d'aller de l'avant.

À mes amis fidèles, qui ont partagé avec moi les moments de doute comme les instants de joie, et qui ont toujours cru en moi, même lorsque moi-même je doutais.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire, je vous suis infiniment reconnaissant.

Mohamed Meliani

Dédicace

Louange à Allah, Seigneur des mondes,
qui m'a accordé la patience, la force et la persévérance pour accomplir ce travail.

Prière et salut sur notre Prophète bien-aimé Mohammed ﷺ, modèle de science et de sagesse.

Je dédie humblement ce mémoire :

À mes parents chéris,

pour vos prières silencieuses, votre amour infini et vos sacrifices immenses.

Qu'Allah vous protège et vous élève en degré ici-bas et dans l'au-delà.

À mon époux bien-aimé,

pour ton soutien constant, ta compréhension et ta patience.

Qu'Allah te récompense pour ta présence rassurante et ton appui inestimable durant ce parcours.

À mes enfants adorés,

ma source de motivation et de tendresse,

vous êtes la lumière de ma vie. Que ce travail soit pour vous un exemple de foi, de persévérance et d'ambition.

À ma famille élargie,

frères, sœurs, oncles, tantes, et tous ceux qui m'ont encouragée,

merci pour votre bienveillance et vos prières.

À mes amis(es) sincères,

qui ont su m'apporter écoute, motivation et soutien moral dans les moments difficiles.

Que Le Très-Haut vous accorde réussite, bonheur et bénédictions.

Que ce modeste travail soit une preuve de gratitude envers tous ceux qui ont contribué à mon cheminement.

Hemaid Abdelkader

Résumé

Le présent mémoire s'intéresse à l'intégration de l'intelligence artificielle dans le domaine du génie civil, à travers une étude visant à prédire la contribution des matériaux composites dans le renforcement au cisaillement des poutres. L'approche adoptée repose sur l'utilisation des réseaux de neurones artificiels, outils performants de modélisation non linéaire, afin de prédire le comportement des poutres en béton armé renforcées par des bandes composites.

Une première partie du travail est consacrée à l'examen des phénomènes de dégradation structurelle et des différentes solutions de renforcement, en mettant l'accent sur les matériaux composites (FRP) et leurs atouts mécaniques. Une seconde partie aborde les principes fondamentaux de l'intelligence artificielle, avec un focus sur l'apprentissage supervisé et les architectures de réseaux de neurones. Enfin, une étude est menée afin de valider la pertinence du modèle prédictif développé. Les résultats obtenus montrent que les réseaux de neurones sont capables de prédire avec une précision satisfaisante la contribution en cisaillement des bandes composites d'une poutre renforcée.

Mots-clés: Intelligence artificielle; réseaux de neurones artificiels; poutre BA; renforcement par matériaux composite; Contribution en cisaillement.

Abstract

This thesis focuses on the integration of artificial intelligence into the field of civil engineering through a study aimed at predicting the contribution of composite materials in the shear strengthening of beams. The adopted approach is based on the use of artificial neural networks, which are powerful tools for nonlinear modeling, to predict the behavior of reinforced concrete beams strengthened with composite strips.

The first part of the work is dedicated to examining structural degradation phenomena and the various strengthening solutions, with particular emphasis on fiber-reinforced polymer (FRP) composites and their mechanical advantages. The second part addresses the fundamental principles of artificial intelligence, focusing on supervised learning and neural network architectures. Finally, a case study is conducted to validate the relevance of the developed predictive model. The results obtained show that neural networks are capable of predicting, with satisfactory accuracy, the shear contribution of composite strips in a strengthened beam.

Keywords: Artificial intelligence; artificial neural networks; reinforced concrete beam; strengthening with composite materials; shear contribution.

المُلخَص

تركّز هذه المذكرة على دمج الذكاء الاصطناعي في مجال الهندسة المدنية، من خلال دراسة تهدف إلى التنبؤ بمساهمة المواد المركبة في تدعيم الكمرات ضد القص. وتعتمد المنهجية المتبعة على استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية، التي تُعد من الأدوات الفعالة للنمذجة غير الخطية، من أجل التنبؤ بسلوك الكمرات الخرسانية المسلحة المدعّمة بشرائط مركبة.

يخصّص الجزء الأول من هذا العمل لدراسة ظواهر تدهور المنشآت والحلول المختلفة للتدعيم، مع التركيز بشكل خاص على المواد المركبة المدعّمة بالألياف (FRP) وميزاتها الميكانيكية. أما الجزء الثاني، فيتناول المبادئ الأساسية للذكاء الاصطناعي، مع التركيز على التعلم الخاضع للإشراف وهياكل الشبكات العصبية. وفي الختام، تم إجراء دراسة حالة واحدة بهدف التحقق من مدى دقة النموذج التنبؤي المطوّر. وقد أظهرت النتائج أن الشبكات العصبية قادرة على التنبؤ بمساهمة شرائط التدعيم المركبة في مقاومة القص بدقة مرضية.

الكلمات المفتاحية: الذكاء الاصطناعي؛ الشبكات العصبية الاصطناعية؛ كمرّة خرسانية مسلّحة؛ التدعيم بالمواد المركبة؛ المساهمة في مقاومة القص.

Table des matières	Page
• Liste des figures	11
• Liste de tableaux	12
• Liste des notations et abréviations	14
• Introduction	15
I. Chapitre 1 : La dégradation des structures et les types de renforcement.....	18
1.1 Introduction.....	18
1.2 NOTIONS GENERALES.....	20
1.3 Les causes de la dégradation des structures.....	20
1.3.1 Les facteurs physiques.....	22
1.3.2 Les facteurs chimiques.....	23
1.3.3 Les facteurs biologiques.....	24
1.3.4 Les erreurs humaines.....	25
1.3.5 Les erreurs d'exécution	27
1.4 Les effets de la dégradation	29
1.5 Méthodes de diagnostic des dégradations.....	29
1.5.1 Inspection visuelle.....	29
1.5.2 Essais non destructifs (END).....	29
1.5.3 Prélèvements et analyses de laboratoire.....	30
1.5.4 Techniques avancées.....	30
1.6 Classification des pathologies selon leur origine	30
1.7 Les types de renforcement des structures.....	30
1.7.1 Renforcement par matériaux traditionnels.....	31
1.7.2 Renforcement par matériaux composites.....	31
1.7.3 Renforcement métallique.....	32
1.7.4 Renforcement par post-tension ou précontrainte externe :.....	32
1.7.5 Renforcement par confinement (cerclage ou gainage).....	34
1.8 Études de cas sur le renforcement des structures.....	34
1.8.1 Renforcement de planchers d'un hôpital ancien (Grenoble, France)	
1.8.2 Renforcement de poutres en T inversé dans un centre commercial (Barcelone, Espagne):.....	34
1.8.3 Renforcement de dalles de parking souterrain (Tunis, Tunisie):.....	34
1.9 CONCLUSION	35
II. Chapitre 2 : Les Matériaux Composites en Génie Civil	36
II.1 INTRODUCTION	37
II.2 Définition	37
II.2.1 L'INTERET DES MATERIAUX COMPOSITES.....	38
II.2.2 Composant des matériaux composites.....	38
II.2.2.1 Les Matrices.....	38
II.2.2.1.1 Matrices Organiques.....	39
II.2.2.1.2 Les matrices métalliques.....	40
II.2.2.1.3 Les matrices carbonées.....	40
II.2.2.1.4 Les matrices céramiques.....	40
II.2.2.1.5 Technique de fabrication courantes	41
II.2.2.2 Les Renforts.....	41
II.2.2.2.1 Géométrie des renforts.....	42
II.2.2.2.2 Renforts et propriétés mécaniques	42
II.2.3 Les matériaux composites naturels.....	44

II.2.3.1 LES ADDITIFS :.....	44
II.2.3.2 CLASSIFICATION DES MATERIAUX COMPOSITES.....	44
II.2.3.2.1 CLASSIFICATION SELON LEURS PERFORMANCE ET LEURS COUTS.....	45
a) Composite de Grande Diffusion GD.....	45
b) Composite de Haute Performance HP.....	45
II.2.3.2.2 CLASSIFICATION SELON LA FORME DES CONSTITUANTS.....	45
II.2.3.2.3 CLASSIFICATION EN FONCTION DES NATURES DES MATRICES :...	46
a) COMPOSITES A MATRICES ORGANIQUE (CMO) :.....	46
b) COMPOSITES A MATRICES METALLIQUE (CMM).....	46
II.2.3.2.4 CLASSIFICATION EN FONCTION DES NATURES DES RENFORTS...	46
II.2.3.3 Avantages en génie civil.....	47
II.2.3.4 Applications pratiques.....	47
II.2.3.5 Inconvénients et limites.....	47
II.3 CONCLUSION	48
III. Chapitre 3 : L'intelligence artificielle (IA) et l'applications en Génie Civil	49
III.1 Introduction.....	50
III.2 Définition AI.....	50
III.2.1 Typologies Fondamentales de IA.....	51
a) Système expert :	51
b) Apprentissage Supervisé.....	51
c) Apprentissage Non-Supervisé :.....	51
d) Apprentissage par Renforcement :.....	51
e) Deep Learning :.....	51
III.2.2 Apprentissage par Transfert :.....	51
III.2.2.1 Apprentissage Supervisé.....	51
a) SVM (Support Vector Machine ou Machine à vecteurs de support).....	52
b) L'apprentissage Bayésien.....	52
c) La régression linéaire :.....	52
III.2.3 Formulation mathématique d'un module simple	52
III.2.3.1 Les arbres de décision.....	53
III.2.3.2 Le régresseur de forêt aléatoire (Random Forest Regressor) :	53
III.2.4 Les réseaux de neurones artificiels (RNA)	54
III.2.4.1 les fonctions d'activations RNN.....	55
III.2.4.2 La fonction tanh (abréviation de "tangente hyperbolique").....	56
III.2.5 les réseaux de neurones convolutifs.....	57
III.2.5.1 MobileNetV2.....	57
III.2.5.2 ResNet (Residual Network)	58
III.2.5.3 GoogLeNet.....	59
a) Inception.....	59
b) DenseNet.....	59
III.2.6 Outils logiciels utilisés dans AI.....	60
III.2.7 Applications AI en génie civil.....	60
III.3 CONCLUSION	62

IV. Chapitre 4 : Un modèle de prédiction de réseau neuronal artificiel pour calculer la contribution au cisaillement.....	
IV.1 Introduction.....	63
IV.2. Évaluation de la contribution des bandes composites CFRP au cisaillement selon la méthode du BAEL.....	64
IV.2.1. Exemple de calcul:.....	67
IV.3. Environnement de développement	68
IV.3.1. Anaconda:	68
IV.3.2. Jupyter	68
IV.4. Langages de programmation et bibliothèques utilisées:	68
IV.4.1. Python:	68
IV.4.2. Numpy:	69
IV.4.3. Matplotlib:	69
IV.4.3.1. Domaines d'Application:	69
IV.4.4. Tensorflow:	70
IV.5. Base de données utilisée:	70
IV.6. Architecture ANN:	71
IV.7. Évaluation et Résultats:	72
IV.7.1. Graphique prédit vs réel:	72
IV.7.2. Graphique des résidus:	73
IV.7.3. Validation du modèle ANN avec le modèle analytique:	75
IV.7.7. Etude paramétrique:	77
IV.8. Conclusion:	78
CONCLUSION GENERALE	80
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	82

Liste des figures

▪ Figure I.1. Processus de détérioration d'un ouvrage	20
▪ Figure I.2. Principaux types de dégradation des sols	21
▪ Figure I.3. Les facteurs physiques affectant les structures	22
▪ Figure I.4. Les facteurs chimiques affectant les structures	23
▪ Figure I.5. Les facteurs biologiques affectant les structures	25
▪ Figure I.6. Erreur de ferrailage	27
▪ Figure I.7. Endommagement du poteau causé par le déplacement du coffrage	28
▪ Figure I.8. Effet de la dégradation	28
▪ Figure I.4. Tableau récapitulatif des techniques de renforcement	34
▪ Figure II.1. Constituants d'un matériau composite.	38
▪ Figure II.2. Les différentes familles de Matrice	39
▪ Figure II.3. Principaux matériaux de renforts	42
▪ Figure II.4. Les structures géométriques des composites	43
▪ Figure II.5. Exemples de renforts en verre	43
▪ Figure II.6. Classification par type de renfort	46
▪ Figure III.1. Machine à vecteurs de support	52
▪ Figure III.2. Représentation d'un neurone formel (ou logique)	54
▪ Figure III.3. Réseau de neurones avec rétroaction	55
▪ Figure III.4. Neurone artificiel avec la fonction d'activation	55
▪ Figure III.5. Exemple de la fonction Sigmoidale.....	56
▪ Figure III.6. Tracé de la fonction tanh.....	56
▪ Figure III.7. Graphique de la fonction ReLU.....	57
▪ Figure III.8. Sandler, M	57
▪ Figure III.10. Bloc convolutif résiduel	58
▪ Figure III.11. Architecture du réseau ResNet-34	58
▪ Figure III.12. Architecture de GoogLeNet	59
▪ Figure III.13. Architecture DenseNet	60
▪ Figure III.14. Exemples d'images de la base d'apprentissage ou de test.	61
▪ Figure IV.1. Géométrie d'une section transversale d'une poutre en béton armée renforcée en cisaillement par bandes en composites FRP	64
▪ Figure IV.2. Géométrie d'une section en T d'une poutre en béton armée renforcée en flexion par composite CFRP	65
▪ Figure IV.3. Le Navigateur Anaconda	69
▪ Figure IV.4. Graphique prédit vs réel	74
▪ Figure IV.5. Graphique prédit vs réel	75
▪ Figure IV.6. Influence de l'inclinaison des bandes composites sur leur contribution au cisaillement	78
▪ Figure IV.7. Effet de la résistance caractéristique du béton sur la contribution des bandes composites	79

Liste des Tableaux

▪ Tableau I.1. Classification des erreurs humaines.....	28
▪ Tableau I.2. Causes et effets de la perte de capacité portante	29
▪ Tableau I.3. Essais non destructifs	30
▪ Tableau IV.2. Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement	66
▪ Tableau IV.3. Comparaison de la contribution des bandes en cisaillement avec la variation de l'espacement entre les bandes composites S_{FRP}	66
▪ Tableau IV.4. Comparaison de la contribution des bandes en cisaillement avec la variation de l'angle d'inclinaison des bandes composites	67
▪ Tableau IV.5. Comparaison de la contribution des bandes en cisaillement avec du module d'Young de la bande composite	68
▪ Tableau IV.6. Base de données d'apprentissage de contribution au cisaillement	71
▪ Tableau IV.7. Paramètres statistiques de la base de données analytique	72
▪ Tableau IV.8. Corrélation entre les paramètres	72
▪ Tableau IV.9. Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement en fonction de l'inclinaison des bandes composites	76
▪ Tableau IV.10. Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement en fonction de l'espacement des bandes composite	76
▪ Tableau IV.11. Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement en fonction de l'espacement des bandes composite	77

Liste des notations et abréviations

- **a** : taille maximale des granulats [m]
- **Ag** : aire brute du panneau mural [m²]
- **As** : aire des armatures au cisaillement [m²]
- **Ast** : aire des armatures tendues dans les poutres [m²]
- **Asv** : aire des armatures verticales en acier [m²]
- **b** : largeur de la section transversale [m]
- **bw** : largeur minimale de la section transversale en T [m]
- **d** : bras de levier [m]
- **Dfrp** : facteur de distribution contrainte/déformation du FRP [-]
- **Efrp** : module d'élasticité du FRP [N/m²]
- **e** : excentricité de la charge [m]
- **ea** : excentricité additionnelle due aux déformations dans le mur [m]
- **f1** : contrainte principale de traction [N/m²]
- **f2** : contrainte principale de compression [N/m²]
- **fc'** : résistance à la compression du béton [N/m²]
- **fcc'** : résistance à la compression du béton confiné [N/m²]
- **fc0** : résistance à la compression du béton non confiné [N/m²]
- **ffrp** : résistance en traction du FRP [N/m²]
- **fy** : limite d'élasticité de l'acier [N/m²]
- **fys** : limite d'élasticité des armatures au cisaillement [N/m²]
- **fx** : contrainte dans les barres longitudinales [N/m²]
- **fv** : contrainte dans les étriers [N/m²]
- **Gf** : énergie de rupture du béton [N/m² × m]
- **h** : hauteur de l'élément considéré [m]
- **hfrp,e** : hauteur efficace du FRP dans la section transversale [m]
- **H** : hauteur du mur [m]
- **H0** : hauteur de l'ouverture dans le mur [m]
- **Hwe** : hauteur effective du mur [m]
- **k1, k2** : facteurs empiriques déterminés pour murs avec ouvertures [m]
- **kc** : coefficient dépendant de la qualité du béton [-]
- **k** : coefficient dépendant de l'élancement de la colonne [-]
- **L** : longueur du mur [m]
- **L0** : longueur de l'ouverture dans le mur [m]
- **Lmax** : longueur maximale d'adhérence du FRP [m]
- **Le** : longueur efficace d'adhérence du FRP [m]
- **Lcr** : longueur critique d'ancrage [m]
- **M** : moment fléchissant au centre de gravité de la section [Nm]
- **Md** : moment fléchissant de calcul [Nm]
- **Mp** : moment de flexion à l'état de limite élastique pure [Nm]
- **N** : force normale au centre de gravité de la section [N]
- **Np** : charge de traction limite élastique [N]
- **Nps** : charge axiale de calcul d'un mur plein [N/m]

- **Np0** : charge ultime d'un mur avec ouverture [N/m]
- **Nh** : projection horizontale de la force de cisaillement [N]
- **Pi** : charges arbitraires sur un corps rigide [N]
- **Qi** : contrainte généralisée [N/m²]
- **qi** : déformation généralisée [-]
- **q1,2...** : déformations plastiques équivalentes aux charges Pi [-]
- **s** : espacement des étriers [m]
- **sm** : espacement moyen des fissures [m]
- **smx** : espacement moyen des fissures si l'élément est soumis à la traction longitudinale [m]
- **smv** : espacement moyen des fissures si l'élément est soumis à la traction transversale [m]
- **sfrp** : espacement horizontal des bandes FRP [m]
- **tfrp** : épaisseur du FRP [m]
- **tw** : épaisseur du mur [m]
- **ui** : déplacements correspondant aux charges Pi [m]
- **V** : force de cisaillement externe [N]
- **Vc** : contribution du béton à la résistance au cisaillement d'une poutre [N]
- **Vd** : force de cisaillement de calcul [N]
- **Vs** : contribution des étriers d'acier au cisaillement [N]
- **Vp** : contribution de la charge axiale au cisaillement [N]
- **Vi** : autres contributions au cisaillement d'une poutre [N]
- **Vfrp** : contribution du FRP à la résistance au cisaillement [N]
- **W** : travail produit par les charges arbitraires Pi [J]
- **wfrp** : largeur du FRP [m]
- **y0** : longueur de la zone comprimée utilisée en théorie de plasticité [m]
- **zt, zb** : coordonnées des extrémités supérieure et inférieure du FRP efficace [m]

Lettres grecques :

- **α** : angle entre l'armature de cisaillement et l'axe de la poutre [-]
- **β** : facteur tenant compte de l'adhérence [-]
- **β_w** : facteur lié à l'excentricité expérimentale [-]
- **θ** : angle des fissures par rapport à l'axe longitudinal [°]
- **ϵ_x, ϵ_t** : déformations longitudinales et transversales [-]
- **ϵ_1, ϵ_2** : déformations principales en traction et compression [-]
- **ϵ_{bond}** : déformation à la rupture par décollement des fibres [-]
- **$\epsilon_{frp,e}$** : déformation efficace du FRP [-]
- **$\epsilon_{frp,u}$** : déformation ultime du FRP [-]
- **γ_{frp}** : coefficient partiel de sécurité du FRP [-]
- **ϵ_{xy}** : déformation au cisaillement [-]
- **η** : facteur géométrique des murs avec ouvertures [-]
- **$\sigma_{frp,max}$** : contrainte maximale dans les fibres [N/m²]
- **τ_{ci}** : contraintes de cisaillement le long des fissures définies dans la théorie des champs comprimés [N/m²]
- **w** : ouverture des fissures [m]
- **τ_{max}** : contrainte maximale de cisaillement du béton [N/m²]
- **ρ_{frp}** : taux d'armature en FRP [-]

Introduction

Introduction:

Dans un monde en perpétuelle mutation, les infrastructures doivent répondre à des exigences toujours plus élevées en matière de durabilité, de sécurité et de performance. Le génie civil, en tant que pilier fondamental de l'aménagement du territoire et du développement urbain, est au cœur de ces enjeux. Les structures en béton armé, largement utilisées pour leur robustesse et leur coût relativement faible, subissent néanmoins au fil du temps des altérations dues à des sollicitations mécaniques répétées, des agressions environnementales, ou encore des défauts liés à la conception ou à la mise en œuvre. Parmi les mécanismes de dégradation, le cisaillement constitue un phénomène critique, pouvant compromettre la stabilité globale d'un ouvrage, notamment dans les poutres. Dès lors, la recherche de solutions de renforcement efficaces et durables devient une priorité stratégique.

Parmi les avancées majeures en matière de réhabilitation des structures, l'introduction des matériaux composites, notamment les polymères renforcés de fibres (FRP), a permis de révolutionner les approches traditionnelles. Offrant une combinaison exceptionnelle de légèreté, de résistance mécanique élevée, de durabilité face à la corrosion et de facilité de mise en œuvre, les composites se présentent comme une alternative prometteuse aux matériaux classiques dans les travaux de renforcement. Leur utilisation dans le renforcement au cisaillement des poutres a suscité un intérêt croissant dans les milieux académique et professionnel. Cependant, évaluer de manière précise la contribution effective de ces matériaux dans l'amélioration des performances structurelles reste une tâche complexe, en raison de la nature multifactorielle des paramètres en jeu.

C'est dans ce contexte que l'intelligence artificielle, et en particulier les réseaux de neurones artificiels (RNA), offre des perspectives novatrices. Ces systèmes inspirés du fonctionnement du cerveau humain permettent de modéliser des phénomènes complexes et non linéaires en apprenant directement à partir de données expérimentales ou simulées. Contrairement aux méthodes analytiques classiques qui nécessitent des hypothèses simplificatrices, les réseaux de neurones sont capables de capturer des corrélations subtiles entre des variables multiples et hétérogènes. Leur application dans le domaine du génie civil s'est largement développée au cours des dernières décennies, touchant des domaines tels que la prédiction de la résistance des matériaux, la détection des fissures, ou encore l'analyse du comportement structurel sous charges extrêmes.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette dynamique pluridisciplinaire qui combine les acquis du génie civil, des sciences des matériaux et de l'intelligence artificielle. Il vise à développer un modèle prédictif basé sur les réseaux de neurones artificiels pour estimer la contribution des

composites au renforcement en cisaillement des poutres en béton armé. Pour ce faire, une démarche méthodique a été adoptée. Dans un premier temps, une revue bibliographique approfondie est proposée, couvrant à la fois les mécanismes de dégradation des structures, les techniques de renforcement disponibles, et les propriétés des matériaux composites. Ensuite, les principes fondamentaux des réseaux de neurones sont présentés, accompagnés d'une exploration des modèles les plus pertinents pour le problème étudié. Enfin, une étude de cas est menée afin de valider le modèle proposé et d'en analyser sa précision.

Ce mémoire est composé de quatre chapitre:

Le premier chapitre porte sur les types des dégradations des structures ainsi que les différentes méthodes de renforcement.

Le chapitre deux présentes une bibliographie sur les matériaux composites ainsi que leurs avantages.

Le chapitre trois est consacrés aux principes fondamentaux de l'intelligence artificielle, avec un focus sur l'apprentissage supervisé et les architectures de réseaux de neurones.

Dans le chapitre quatre, nous avons présenté un modèle analytique basé sur BAEL, permettant d'estimer la contribution au cisaillement des bandes composites. Ce modèle a été validé en le comparant aux résultats disponibles dans la littérature. Par la suite, une base de données a été constituée en vue de son utilisation dans le modèle prédictif basé sur le réseau de neurones

Chapitre I :

Dégradations structurelles

et

solutions de renforcement

I.1. Introduction:

Dans le domaine du génie civil, la durabilité des structures constitue un enjeu majeur, tant du point de vue de la sécurité que de la pérennisation des investissements. Les infrastructures, qu'elles soient bétonnées, métalliques ou mixtes, sont exposées à des conditions environnementales et mécaniques qui, au fil du temps, altèrent leur performance initiale. Cette altération, qu'on désigne par le terme de dégradation, peut se manifester sous des formes variées, allant de simples fissurations à des défaillances structurelles majeures. Comprendre les mécanismes qui sous-tendent ces dégradations est fondamental pour anticiper les problèmes, intervenir de manière précoce et maintenir les performances structurelles des ouvrages tout au long de leur durée de vie.

Face à ces enjeux, les techniques de renforcement structurel ont connu un développement significatif, tant sur le plan théorique que pratique. Les approches traditionnelles basées sur le béton armé et l'acier ont progressivement été complétées, voire remplacées, par des solutions innovantes faisant appel à des matériaux composites, des technologies de précontrainte externe ou encore des résinages adaptatifs. Le choix de la technique de renforcement dépend d'une analyse fine de la pathologie observée, de la nature de la structure concernée, mais aussi de critères économiques et de durabilité.

Ce chapitre se propose d'explorer de manière approfondie les différents types de dégradation rencontrés dans les structures, les méthodes de diagnostic employées pour les identifier, ainsi que les principales techniques de renforcement disponibles à ce jour. Il vise à fournir aux professionnels et étudiants du bâtiment une base solide pour appréhender les enjeux du renforcement structurel et opter pour les solutions les plus appropriées aux problématiques rencontrées sur le terrain.

I.2. Notions générales:

- Pathologie:

Les qualités des matériaux et les types de structures évoluent sans cesse et ouvrent des perspectives de plus en plus larges dans le secteur de la construction. Une meilleure connaissance de la pathologie doit permettre une meilleure adéquation en choix et en usages. La pathologie dans le génie civil signifie l'examen des désordres, soit « étude des maladies », et notamment leurs causes et leurs mécanisme.

- Durabilité:

La notion de durabilité est le temps durant lequel l'ouvrage remplit ses fonctions et ses exigences. Tous les ouvrages sont soumis à un processus de détérioration comprenant de deux phases

→ Phase d'initiation : aucun désordre n'est visible, l'élément perd d'abord sa protection.

→ Phase de propagation : L'élément est soumis à un processus d'endommagement qui conduit à une capacité portante diminuée ou à une stabilité diminuée.

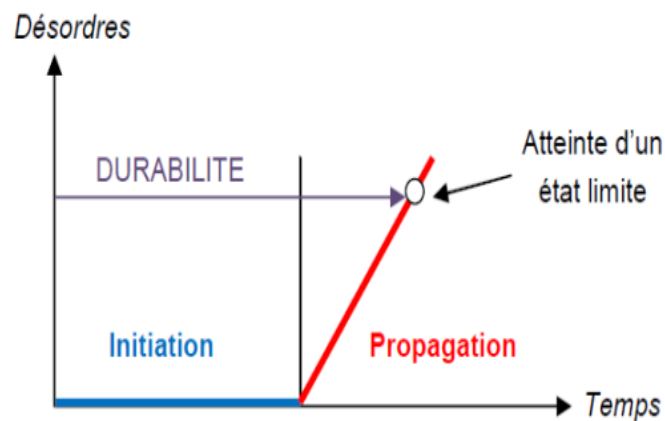


Figure I.1. Processus de détérioration d'un ouvrage

- Diagnostic:

C'est l'ensemble des investigations nécessaires pour définir l'origine et l'étendue des désordres constatés. Indispensable pour:

- Évaluer la gravité des désordres ;
- Permettre la prise de décision ;
- Mettre au point d'une solution de réparation durable.

- Réhabilitation :

La réhabilitation structurale consiste à améliorer le niveau de performance d'un système structural ou quelques éléments de ce système. Suivant l'état de la structure endommagée, la réhabilitation peut être subdivisée en deux catégories : Réparation ou Renforcement

- Réparation :

La réparation d'une structure est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu

- Renforcement :

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier (augmentation de la ductilité, de la résistance) d'une construction pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre des sollicitations

I.3. Les causes de la dégradation des structures:

La dégradation d'une structure résulte de l'interaction complexe entre plusieurs facteurs d'origines diverses. Ces facteurs peuvent être classés en quatre grandes catégories : physiques, chimiques, biologiques et mécaniques. Comprendre les causes de la dégradation permet d'anticiper les risques et de proposer des solutions de renforcement appropriées

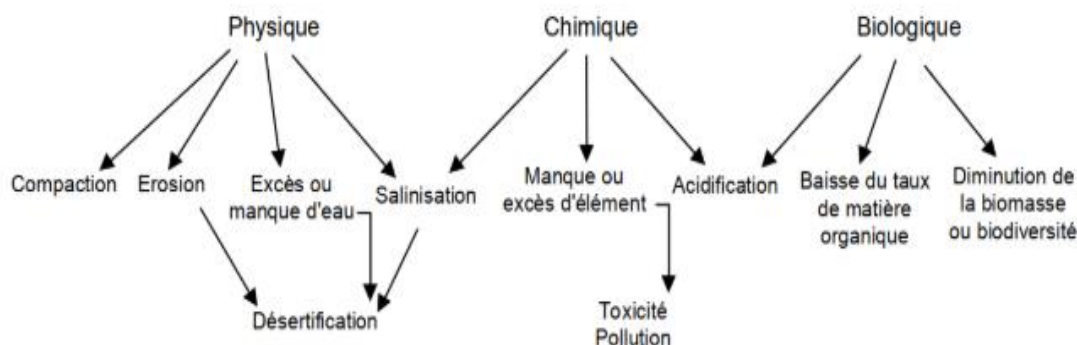


Figure I.2. Principaux types de dégradation des sols

I.3.1. Les facteurs physiques:

Les structures sont constamment exposées à des conditions physiques naturelles susceptibles de compromettre leur durabilité. Parmi ces facteurs, les variations de température jouent un rôle fondamental. Lorsque les matériaux, tels que le béton ou l'acier, sont soumis à des cycles répétés de chaleur et de froid, ils subissent des phénomènes de dilatation et de contraction. À long terme, ces mouvements provoquent des tensions internes qui peuvent entraîner l'apparition de microfissures, une perte d'adhérence entre les couches de matériaux, voire un affaiblissement global de la structure.

Chapitre I : Dégradations structurelles et solutions de renforcement

Un autre facteur essentiel est le cycle gel/dégel, particulièrement problématique dans les régions froides. Lorsque l'eau s'infiltre dans les pores du béton ou dans les fissures existantes, elle gèle et augmente de volume. Ce changement d'état provoque une pression interne qui détériore la surface du matériau, agrandit les fissures et accélère la dégradation de l'ouvrage.

Les vibrations, qu'elles soient causées par le trafic routier, ferroviaire, des machines industrielles ou des mouvements sismiques, représentent également une menace. À travers le temps, ces vibrations peuvent affaiblir les jonctions entre les éléments structuraux, provoquer des déplacements ou des tassements des fondations, et réduire la capacité portante de l'ouvrage.

La fatigue des matériaux constitue un autre phénomène physique important. Elle résulte de l'application répétée de charges, même de faible intensité, qui finissent par détériorer progressivement la structure interne des matériaux. Cela peut conduire à la formation de fissures invisibles à l'œil nu, à une perte de rigidité et, dans les cas extrêmes, à une rupture brutale.

Enfin, les conditions climatiques extrêmes, comme les tempêtes, les vents violents, les pluies intenses ou les inondations, peuvent causer des dégradations soudaines. Ces événements surchargent parfois les éléments porteurs, favorisent les infiltrations d'eau et endommagent les parties exposées de la structure telles que les toitures, les murs extérieurs et les fondations.



Figure I.3. Les facteurs physiques affectant les structures

I.3.2. Les facteurs chimiques:

Les facteurs chimiques jouent un rôle déterminant dans la dégradation des matériaux de construction, en particulier dans les environnements agressifs. L'un des phénomènes les plus fréquents est la corrosion des armatures métalliques à l'intérieur du béton armé. Lorsque l'humidité, l'oxygène et les chlorures pénètrent dans le béton, ils réagissent avec l'acier, provoquant une oxydation. Cette corrosion engendre une augmentation du volume de l'armature, créant des pressions internes qui fissurent et éclatent le béton environnant, réduisant ainsi la capacité portante de la structure.

Un autre mécanisme chimique majeur est la réaction alcali-silice. Elle se produit lorsque les alcalis contenus dans le ciment réagissent avec la silice présente dans certains granulats. Cette réaction forme un gel expansif qui absorbe l'humidité et provoque des gonflements internes. Ces derniers entraînent des fissurations dispersées, souvent caractéristiques, qui dégradent l'intégrité de la structure.

Les attaques acides, bien que moins fréquentes, sont particulièrement destructrices. Elles surviennent dans les environnements industriels ou urbains où les gaz polluants, comme le dioxyde de soufre, se dissolvent dans l'eau pour former des acides. Ces acides réagissent avec les constituants du béton, dissolvant progressivement la matrice cimentaire. Cette dégradation chimique affecte la surface exposée en profondeur, rendant la structure plus poreuse et plus vulnérable aux autres agents agressifs.

Enfin, les sulfates présents dans certains sols ou dans les eaux usées peuvent attaquer le béton en formant de l'ettringite expansive, ce qui conduit à des gonflements et à la fissuration de l'ouvrage. L'action combinée de ces différents agents chimiques accélère la détérioration des matériaux, surtout en l'absence de protections adaptées comme des enrobages, des hydrofuges ou des barrières anti-humidité.



Figure I.4. Les facteurs chimiques affectant les structures

I.3.3. Les facteurs biologiques:

Bien qu'ils soient parfois négligés, les facteurs biologiques peuvent affecter de manière significative la durabilité des structures, notamment dans les milieux humides, confinés ou mal entretenus. Leur action, souvent lente et silencieuse, n'en demeure pas moins destructrice à long terme, altérant non seulement l'apparence des matériaux mais aussi leur intégrité structurelle.

L'un des phénomènes les plus fréquemment observés est le développement de micro-organismes tels que les moisissures, les algues et les lichens. Ces organismes apparaissent principalement sur les surfaces exposées à l'humidité constante ou à une faible exposition au soleil. En produisant des acides organiques, ils attaquent les composants minéraux du béton, de la pierre ou des enduits, augmentant leur porosité et facilitant la pénétration de l'eau.

Les champignons lignivores constituent une menace sérieuse pour les structures en bois. En se nourrissant de la cellulose présente dans les fibres du bois, ils en réduisent progressivement la solidité. La mэрule, par exemple, est un champignon particulièrement invasif qui peut se propager rapidement si aucune mesure préventive ou curative n'est prise.

D'autres agents biologiques, comme les insectes xylophages — notamment les termites, les vrillettes ou les capricornes — s'attaquent directement au bois en y creusant des galeries invisibles depuis l'extérieur. Cette attaque silencieuse fragilise les charpentes, les poutres ou les planchers, compromettant leur capacité à supporter les charges.

Enfin, les racines de végétaux peuvent poser de sérieux problèmes lorsqu'elles se développent à proximité d'un ouvrage. Certaines plantes, en particulier les arbres ou les végétations rampantes, peuvent infiltrer leurs racines dans les fissures existantes, contribuant à les élargir et à provoquer des désordres structurels au niveau des fondations ou des murs porteurs.

De manière générale, l'humidité excessive et le manque d'entretien sont les principaux facteurs qui favorisent ce type de dégradation biologique.

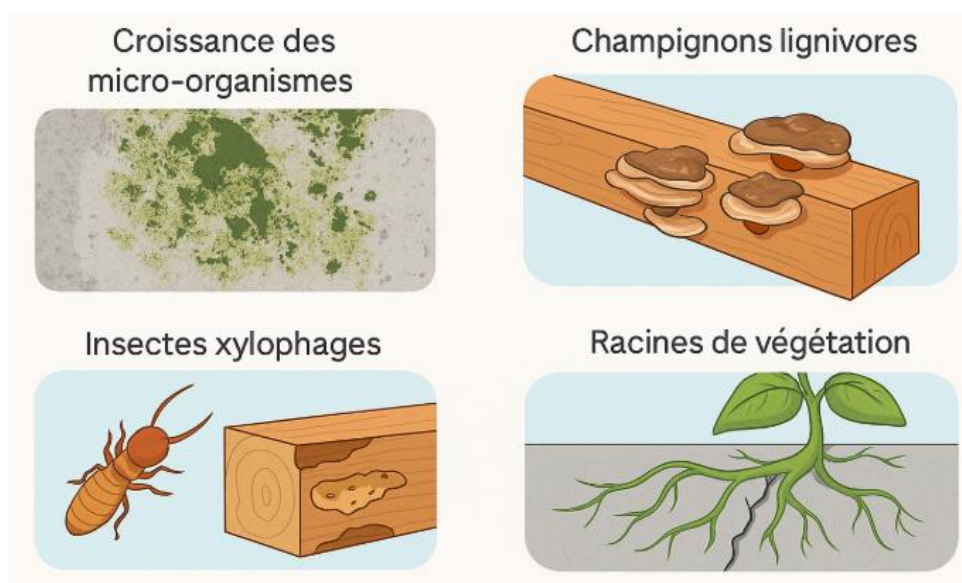


Figure I.5. Les facteurs biologiques affectant les structures

I.3.4. Les erreurs humaines:

Les erreurs humaines représentent une cause majeure de dégradation prématurée des structures. Elles peuvent survenir à toutes les étapes de la vie d'un ouvrage, de la conception à l'exécution, en passant par l'exploitation et l'entretien. Une conception inadéquate, des erreurs de calcul, le choix de matériaux inadaptés ou de mauvaise qualité peuvent entraîner des faiblesses structurelles importantes dès le départ. Lors de la construction, une mauvaise mise en œuvre, le non-respect des plans, ou des pratiques non conformes, comme un mauvais dosage du béton ou un mauvais enrobage des armatures, peuvent compromettre la durabilité de l'ouvrage. Pendant la phase d'exploitation, l'absence de maintenance régulière, la surcharge non prévue ou les interventions non professionnelles peuvent également causer des dommages graves. Ces erreurs, souvent évitables, soulignent l'importance de la compétence, du contrôle de qualité et du respect des normes à chaque étape du projet.

Tableau I.1. Classification des erreurs humaines

Type d'action	Sous-type	Exemples ou définitions
Action involontaire	Méprise	Intrusion, Omission, Inversion, Mélange, Mauvais timing
	Oubli	Oubli d'action, Oubli d'objectif, Perte
Action intentionnelle	Faute	Basée sur les règles ¹ , Basée sur les connaissances ²
	Violation	Violation de routines, Violation exceptionnelle, Sabotage

I.3.5. Les erreurs d'exécution:

L'utilisation de méthodes inadéquates ou la négligence pendant une phase quelconque de la construction peuvent affecter la qualité du béton. Ce béton se détériora plus facilement que celui obtenu conformément aux strictes règles de l'art. En plus, un défaut d'exécution peut entraîner beaucoup des agents agressifs, mais la détérioration du béton n'est pas visée sauf dans les cas suivant :

- Erreurs dans le positionnement des armatures d'acier ;
- Enrobage insuffisant des armatures d'acier ;
- Erreurs dans l'exécution des coffrages ;
- Absence des armatures de peau (pour les retraits) ;
- Mauvaise qualité du béton (une porosité très élevée) ce qui facilite la circulation des agents agressifs et l'eau ;
- La ségrégation du béton due à la condition de transport du béton frais.



Figure I.6. Erreur de ferrailage

Voici une analyse technique des erreurs visibles dans ce ferrailage de semelle filante :

1. Absence ou mauvaise mise en place des entretoises;
2. Croisement de barres non ligature;
3. Surcharge de barres au croisement sans respect du recouvrement;
4. Absence de crochets aux extrémités verticales;
5. Orientation douteuse des barres transversales.

I.3.5.1. Mauvaise disposition des armatures:

La plupart du temps, ce type d'erreurs résulte d'une insuffisance consécutive à des oublis ou à des impasses au niveau des études, parfois aussi d'un manque de coordination entre le bureau d'études et le chantier

I.3.5.2. Déplacements des coffrages:

Les coffrages sont dimensionnés pour résister au poids du béton frais, mais ils sont toujours déformables. La déformation provoquée par le béton frais peut alors entraîner, dans les parties déjà durcies mais encore jeunes, l'apparition de fissures importantes suivit par l'éclatement du béton.



Figure I.7. Endommagement du poteau causé par le déplacement du coffrage

I.4. Les effets de la dégradation:

La dégradation des structures, qu'elle soit lente ou soudaine, engendre des conséquences importantes sur le plan technique, économique et sécuritaire. Ces effets varient en fonction de la nature de l'ouvrage, de l'intensité de la détérioration et du contexte d'usage.

L'un des premiers signes visibles de la dégradation est l'apparition de fissures sur les éléments porteurs ou les finitions. Ces fissures, superficielles ou profondes, peuvent indiquer un affaiblissement structurel, un mouvement différentiel des fondations ou encore des contraintes internes mal réparties. Elles facilitent aussi la pénétration de l'eau, ce qui aggrave la situation en favorisant la corrosion des armatures ou le gonflement de certains matériaux.



Figure I.8. Effet de la dégradation

Un autre effet fréquent est la perte de capacité portante. Lorsque les matériaux sont endommagés — par corrosion, fatigue, ou érosion — leur résistance mécanique diminue. Cela peut mener à une déformation excessive, un affaissement de planchers, voire un effondrement partiel ou total de l'ouvrage si aucune mesure corrective n'est prise à temps.

Tableau I.2. Causes et effets de la perte de capacité portante

Cause	Conséquence structurelle	Exemple visuel
Corrosion des armatures	Réduction de la section utile et affaiblissement	Fissures longitudinales, éclats de béton
Surcharge non prévue	Effondrement de dalle ou de plancher	Affaissement localisé
Affaissement de fondation	Déséquilibre de l'ouvrage, fissures obliques	Inclinaison des murs
Incendie	Perte de résistance des matériaux	Déformation ou chute de dalles

La déformation des éléments (flèches, torsion, inclinaisons anormales) est également un signe d'alerte. Elle indique souvent que l'ouvrage ne se comporte plus comme prévu, ce qui peut nuire à sa stabilité globale. Ces déformations peuvent rendre certaines parties inutilisables ou dangereuses.

En plus des aspects techniques, la dégradation entraîne des risques pour la sécurité des usagers. Un revêtement mal fixé, une dalle fissurée ou un garde-corps affaibli représentent autant de dangers pour les personnes. Des incidents ou accidents peuvent survenir, parfois avec des conséquences graves.

Enfin, les coûts économiques liés à la dégradation peuvent être considérables. Plus les dommages sont avancés, plus les réparations sont lourdes et coûteuses. Dans certains cas, la dégradation peut mener à la mise hors service complète de l'ouvrage, à une démolition ou à un renforcement complexe.

I.5. Méthodes de diagnostic des dégradations:

Le diagnostic des dégradations est une étape fondamentale pour évaluer l'état de santé d'un ouvrage et définir les actions de réparation ou de renforcement à envisager. Il combine l'observation visuelle, des analyses en laboratoire, et des techniques d'essais non destructifs (END).

I.5.1. Inspection visuelle:

C'est la première étape de toute démarche de diagnostic. Elle permet de localiser les zones dégradées telles que les fissures, éclats, corrosion ou déformations. Elle aide à évaluer la gravité apparente et la propagation des pathologies. Des outils simples comme une lampe, une loupe, un mètre ou un drone sont souvent utilisés.

I.5.2. Essais non destructifs (END):

Ces techniques permettent de sonder les matériaux sans les détériorer.

Tableau I.3. Essais non destructifs

Technique	Objectif principal	Exemple d'usage
Rebond (scléromètre)	Estimer la dureté du béton	Vieillessement des surfaces
Ultrasons	Détecter les fissures internes	Béton ou pierre
Radar géophysique (GPR)	Localiser les armatures, vides	Localisation de gainages dans le béton
Thermographie infrarouge	Détecter l'humidité et les défauts d'isolation	Façades ou toitures

I.5.3. Prélèvements et analyses de laboratoire:

Lorsque l'état du matériau doit être connu précisément, on effectue des carottages pour analyser la résistance du béton, des analyses chimiques (carbonatation, chlorures), et des tests de porosité ou perméabilité

I.5.4. Techniques avancées:

Les méthodes avancées incluent la modélisation numérique (FEM) pour simuler le comportement structurel, ainsi que la surveillance continue par capteurs pour mesurer en temps réel les vibrations, déplacements ou corrosion.

I.6. Classification des pathologies selon leur origine:

Tableau I.4. Classification des pathologies selon leur origine

Origine de la dégradation	Méthode de détection privilégiée
Physique (gel/dégel, retrait)	Inspection visuelle, carottage
Chimique (corrosion, sulfates)	Analyse chimique, scléromètre
Biologique (champignons, racines)	Inspection, prélèvement, photos
Erreurs humaines (conception ou exécution)	Relecture des plans, expertise visuelle

I.7. Les types de renforcement des structures:

Le renforcement des structures vise à restaurer ou améliorer les capacités mécaniques d'un ouvrage ou de ses éléments, en réponse à des dégradations, à un changement d'usage ou à des défauts initiaux. Les méthodes sont choisies en fonction du type de structure, de la nature des désordres et des contraintes de mise en œuvre.

I.7.1. Renforcement par matériaux traditionnels:

Cette méthode consiste à appliquer une nouvelle couche de béton armé ou de micro-béton autour de l'élément existant. Elle est souvent utilisée sur les poutres, colonnes ou voiles, après piquage et pose de nouveaux aciers. L'objectif est d'augmenter la section résistante de l'élément, et ainsi sa capacité portante.

Avantages :

- Solution durable,
- compatible avec les matériaux existants.

Inconvénients :

- Poids ajouté,
- nécessité de traitement de surface et d'un temps de cure.

I.7.2. Renforcement par matériaux composites:

Les bandes ou tissus en fibre de carbone, verre ou aramide sont collés avec de la résine époxy sur les zones critiques de la structure. Cette méthode est très utilisée dans les ouvrages en béton armé ou en maçonnerie.

- Avantages :

- Faible poids,
- grande résistance à la traction,
- pose rapide.

- Inconvénients :

- Coût élevé,
- sensibilité à l'environnement (température, humidité).

I.7.3. Renforcement métallique:

On fixe mécaniquement ou colle des profilés métalliques (cornières, plats, U, etc.) sur l'élément à renforcer. Ces dispositifs augmentent la capacité portante en flexion ou cisaillement. Ils sont couramment utilisés dans les poutres, linteaux et cadres porteurs.

- Avantages :

- Haute efficacité,
- rapidité de mise en œuvre.

- Inconvénients :

- Sensibilité à la corrosion,

- impact esthétique

I.7.4. Renforcement par post-tension ou précontrainte externe :

Cette technique consiste à ajouter des câbles ou barres précontraints, placés à l'extérieur de la structure, et tendus à l'aide de vérins. On l'utilise pour renforcer les dalles, ponts ou ouvrages sollicités dynamiquement.

- Avantages :

- Performances élevées sans augmentation de section.

- Inconvénients :

- Mise en œuvre complexe,
- surveillance nécessaire

I.7.5. Renforcement par confinement (cerclage ou gainage)

Ce procédé améliore la résistance à la compression et la ductilité des éléments en les entourant de matériaux résistants comme des armatures en spirale, des profils métalliques ou des bandes en fibre. Très utile pour les colonnes en zone sismique.

- Avantages :

- Excellente résistance aux efforts cycliques,
- maintien de la forme.

- Inconvénients :

- Mise en œuvre précise requise.

Figure I.4. Tableau récapitulatif des techniques de renforcement

Type de renforcement	Éléments concernés	Avantages	Inconvénients
Augmentation de section	Poutres, colonnes, voiles	Durabilité, compatibilité	Ajout de poids
Éléments métalliques	Poutres, linteaux	Rapidité, résistance élevée	Corrosion possible
Matériaux composites (FRP)	Poutres, dalles	Légèreté, efficacité	Coût élevé
Post-tension externe	Ponts, dalles	Performance sans poids ajouté	Technique avancée
Confinement	Colonnes, piles	Haute ductilité	Précision nécessaire

I.8. Études de cas sur le renforcement des structures:

I.8.1. Renforcement de planchers d'un hôpital ancien (Grenoble, France):

- **Problème** : Planchers anciens affaiblis par des charges hospitalières modernes (lits médicalisés, équipements lourds).
- **Diagnostic** : Inspection visuelle, vérification des flèches, contrôle destructif sur béton.
- **Solution** : Pose de bandes de carbone FRP en sous-face des poutrelles, ancrage mécanique complémentaire dans les zones d'ancrage.
- **Résultat** : Capacité portante accrue de 35 %, maintien de l'activité hospitalière durant les travaux.

I.8.2. Renforcement de poutres en T inversé dans un centre commercial (Barcelone, Espagne):

- **Problème** : Ajout d'un étage technique nécessitant la vérification des structures existantes.
- **Diagnostic** : Calcul des surcharges, inspection des poutres, analyse des contraintes internes.
- **Solution** : Application de bandes FRP sur l'âme des poutres, avec système de renfort en U pour éviter le décollement.

- **Résultat** : Renforcement discret, sans impact sur l'esthétique du centre, sécurité renforcée.

I.8.3. Renforcement de dalles de parking souterrain (Tunis, Tunisie):

- **Problème** : Fissures diagonales, corrosion localisée et fléchissement des dalles dans une zone très fréquentée.

- **Diagnostic** : Inspection visuelle, auscultation radar, mesure de la flèche.

- **Solution** : Application de bandes en fibres de carbone croisées selon les deux directions principales, injectées par résine à haute adhérence

I.9. Conclusion:

La dégradation des structures en génie civil compromet leur sécurité, fonctionnalité et durabilité. Elle peut résulter de facteurs physiques, chimiques, biologiques ou d'erreurs humaines. Lorsqu'elle n'est pas maîtrisée, elle peut évoluer rapidement. Dans ce contexte, le renforcement constitue une solution efficace pour restaurer ou améliorer les performances des ouvrages. L'utilisation de matériaux composites (FRP) offre de nombreux avantages : légèreté, résistance, rapidité de mise en œuvre et discrétion esthétique. Ces technologies ont transformé les pratiques de réhabilitation, notamment pour les structures en béton armé. Les exemples analysés montrent la diversité des cas et l'efficacité des solutions personnalisées. Un bon diagnostic et un choix méthodique garantissent des interventions durables et fiables. Le renforcement devient ainsi une véritable stratégie de gestion des infrastructures. Il permet de prolonger la vie des ouvrages tout en répondant aux exigences de sécurité et de durabilité

Chapitre II :

Les matériaux composites

II.1. Introduction:

Les matériaux composites, après avoir suscité un vif engouement durant les décennies 1980 et 1990, ont progressivement perdu de leur attrait en raison de certaines limitations structurelles. De nombreuses entreprises, évoluant dans un cadre artisanal et utilisant des procédés manuels, n'ont pas réussi à franchir le cap de la professionnalisation, exigée par les nouvelles normes en matière de sécurité, d'hygiène et de respect de l'environnement.

Cependant, ces dernières années ont vu une résurgence notable de l'intérêt pour les composites, stimulée par l'élargissement de leurs domaines d'application et les performances exceptionnelles qu'ils offrent. À caractéristiques mécaniques équivalentes, les composites peuvent être trois à cinq fois plus légers que l'acier. De plus, leur résistance naturelle à la corrosion, ainsi que leur aptitude à être façonnés en une seule opération en pièces de grande dimension et à géométrie complexe, en font des matériaux de choix dans les secteurs à haute exigence technologique.

Dès lors, il devient essentiel d'optimiser les méthodes de conception et de prédimensionnement des structures en composites, afin de garantir un compromis optimal entre performance, coût et durabilité. Cela passe inévitablement par une meilleure caractérisation de leurs propriétés à travers divers essais mécaniques et physico-chimiques.

Dans le cadre de ce mémoire, une première partie sera consacrée à une synthèse bibliographique sur les matériaux composites : leur classification, leurs procédés de fabrication, ainsi que leur comportement mécanique et les mécanismes d'endommagement associés. Une seconde partie, expérimentale, portera sur la caractérisation d'un stratifié en fibre de verre (mat-tresse) soumis à un essai de flexion statique en trois points.

II.2. C'est quoi un matériau composite:

Un matériau composite est, par définition, tout alliage ou matière première comportant un renfort sous forme filamenteuse. Il nécessite l'association intime d'au moins deux composants : le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison, l'interface. Contrairement aux matières premières classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques, celles des composites ne sont réellement connues qu'après fabrication, car on réalise, en même temps, le matériau et le produit. Actuellement, les composites à matrice organique représentent plus de 99% des matériaux composites ; toutefois, il existe également des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique) dont la diffusion reste encore marginale.

II.2.1. L'intérêt des matériaux composites:

Un des grands atouts des composites est que les propriétés sont ajustables en fonction des paramètres de conception tels que la nature, le taux, l'orientation et l'architecture des fibres, l'agencement des plis et la nature de la matrice.

Le matériau composite peut être isolant ou conducteur électrique et/ou thermique, avoir un coefficient de dilatation thermique spécifique à l'application visée, être optimisé pour l'absorption d'énergie (impact, acoustique).

Il peut prendre des géométries complexes et/ou avoir de grandes dimensions et intégrer de nombreuses fonctionnalités (inserts, éléments décoratifs, protection, ...). Il trouve des applications dans les domaines "lowcost" comme "hightech".

II.2.2. Composant des matériaux composites :

Les matériaux composites sont généralement composés de deux composants principaux :

Une matrice et un renfort. La matrice est la partie qui lie les renforts ensemble et leur transmet les efforts mécaniques. Les renforts, souvent sous forme de fibres ou de particules, améliorent les propriétés du composite.

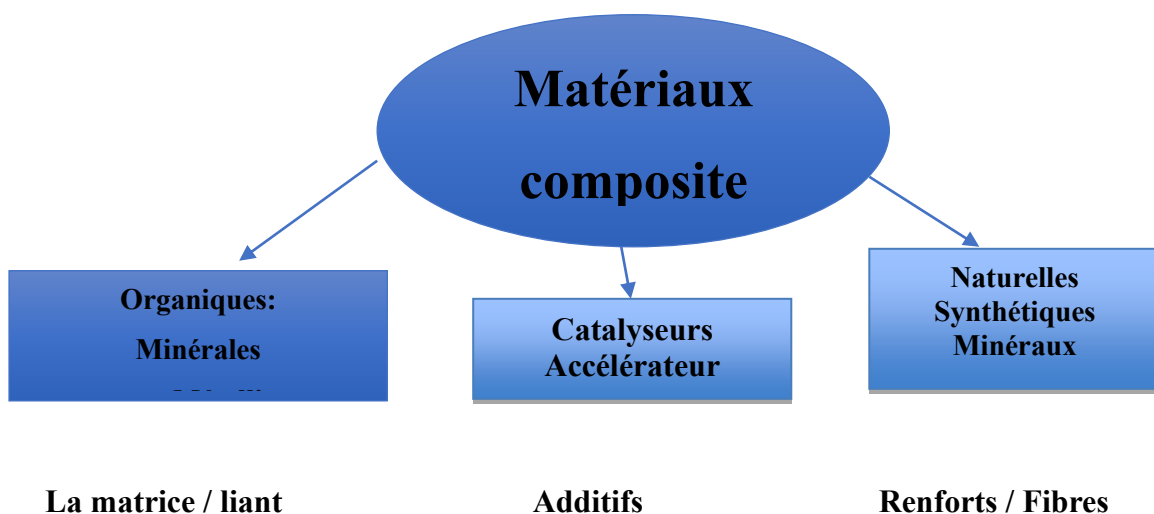


Figure II.1. Constituants d'un matériau composite.

II.2.2.1. Les Matrices:

La matrice réunit les fibres par ses caractéristiques cohésive et adhésive. Elle maintient les fibres dans leur orientation et leur position prévues pour les charges appliquées et le protège contre les agressions extérieures et donnent la forme du matériau. Ses autres rôles consistent à distribuer les efforts entre les fibres, fournir une résistance à la propagation de fissure, et fournir toutes les résistances en cisaillement du composite [1]. Elles doivent être en outre assez déformable et présenter une certaine compatibilité avec le renfort. Ainsi, pour pouvoir apporter aux matériaux

composites des propriétés mécaniques élevées, les résines doivent posséder des masses volumiques faibles. La matrice détermine en général la limite de la température d'utilisation et l'environnement de service du matériau.

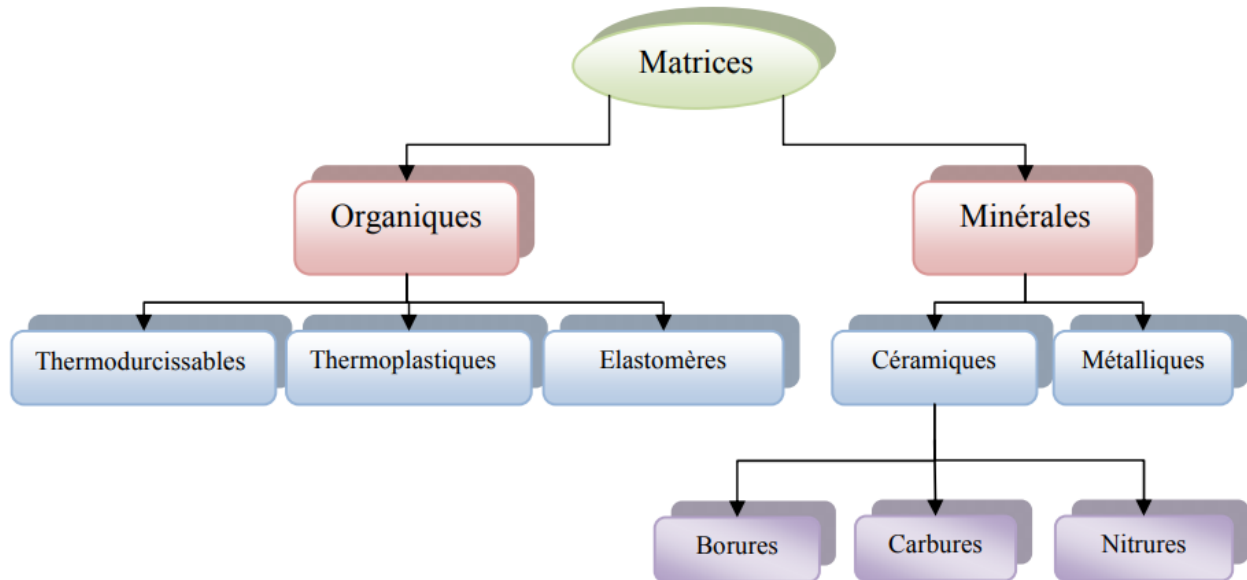


Figure II.2. Les différentes familles de Matrice

II.2.2.1.1. Matrices Organiques:

Un très grand nombre, de matériau plastique peut être utilisé comme matrice dans les matériaux composites. Elles peuvent aussi bien appartenir à la famille des résines « Thermodurcissables » qu'à celles des résines « Thermoplastiques ». Parmi ces familles de résines, on distingue deux types de résines qui sont, actuellement, les plus utilisées:

- **Résines thermodurcissables:**

Les résines thermodurcissables les plus fréquemment utilisées sont les polyesters, les vinylesters, les époxydes, les phénoliques, les polyamides (PA) et les bismaléimides (BMI) .

- **Les résines thermoplastiques:**

Une résine thermoplastique est définie comme un type de matériau plastique haute performance qui peut être recyclé ou valorisé , caractérisé par sa capacité à se ramollir lorsqu'il est chauffé et à durcir lorsqu'il est refroidi, avec des propriétés thermiques et mécaniques comparables à celles des résines thermodurcissables.

- **Elastomère:**

Un élastomère est un matériau polymère élastique, c'est-à-dire capable de se déformer sous l'action d'une force et de retrouver sa forme initiale une fois la force supprimée. Des exemples courants d'élastomères incluent le caoutchouc naturel, le silicone, les élastomères thermoplastiques (TPE) et divers autres polymères synthétique

II.2.2.1.2. Les matrices métalliques:

Pour des applications à hautes températures (dépassant 3000°C), les matrices organiques ne sont pas adaptées, ce qui impose le recours à des matrices métalliques. Dans ces composites, les renforts (fibres ou particules) sont intégrés dans une matrice en métal, offrant une meilleure résistance thermique et mécanique.

Les métaux les plus utilisés sont les alliages légers, notamment :

- L'aluminium (léger et résistant)
- Le titane (haute résistance mécanique et thermique)
- Le nickel (excellente tenue aux températures extrêmes)

Ces matériaux permettent de répondre aux exigences des environnements sévères, notamment dans l'aérospatial, l'énergie et l'industrie automobile de haute performance.

II.2.2.1.3. Les matrices carbonées:

Elles sont produites par pyrolyse (décomposition thermique) d'une matière organique à haute température. Deux méthodes principales existent :

1. Imprégnation en phase liquide :

- Utilisation d'un précurseur organique liquide.
- Processus lent (peut prendre plusieurs mois) pour atteindre une densification optimale.
- Bonne reproductibilité.

2. Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) :

- Utilisation d'un hydrocarbure gazeux.
- Procédé plus rapide, mais moins reproductible.
- Le carbone se dépose sous forme de grains sur les fibres, améliorant leur cohésion.

Ces techniques permettent d'obtenir des composites carbone-carbone dont la densité peut égaler celle du carbone massif, tout en conservant une structure légère et résistante. Ces matériaux sont particulièrement utilisés dans les applications aérospatiales et les hautes températures.

II.2.2.1.4. Les matrices céramiques:

Elles se distinguent par leurs propriétés réfractaires, ce qui les rend idéales pour des pièces soumises à des températures extrêmes, comme les tuiles de protection thermique ou les brûleurs industriels.

Cependant, les céramiques présentent une faible résistance à la traction, une faiblesse atténuée par l'incorporation de fibres de renforcement au sein de la matrice.

II.2.2.1.5. Techniques de fabrication courantes :

1. Imprégnation en phase liquide:

- Exemple : composites SiC-SiC (carbure de silicium).

2. Dépôt par plasma:

- Exemple : dépôt de silicium suivi d'une nitruration sous azote à 1450°C, induisant une expansion volumique qui améliore la densification.

Ces procédés permettent de combiner haute résistance thermique et tenue mécanique, ouvrant la voie à des applications critiques dans l'aérospatial, l'énergie et l'industrie des hautes températures.

II.2.2.2. Les Renforts:

Les renforts jouent un rôle essentiel dans l'amélioration des propriétés mécaniques et de la rigidité des matériaux composites. Ils se présentent sous forme de structures filamenteuses, allant de particules allongées jusqu'aux fibres continues, qui confèrent au matériau un comportement directionnel (anisotrope).

Les renforts se distinguent principalement par deux critères :

- La nature des fibres : elles peuvent être d'origine minérale (ex. : verre, basalte) ou organique (ex. : aramide, carbone).
- L'architecture du renfort :
 - Unidirectionnelle (UD), où les fibres sont orientées dans une seule direction pour maximiser la résistance dans l'axe principal.
 - Tissée (ou textile), où les fibres sont entrelacées selon deux directions perpendiculaires, offrant une meilleure tenue multidirectionnelle.

Le choix du type de renfort dépend des sollicitations mécaniques prévues et des exigences en termes de performance, de coût et de mise en œuvre.

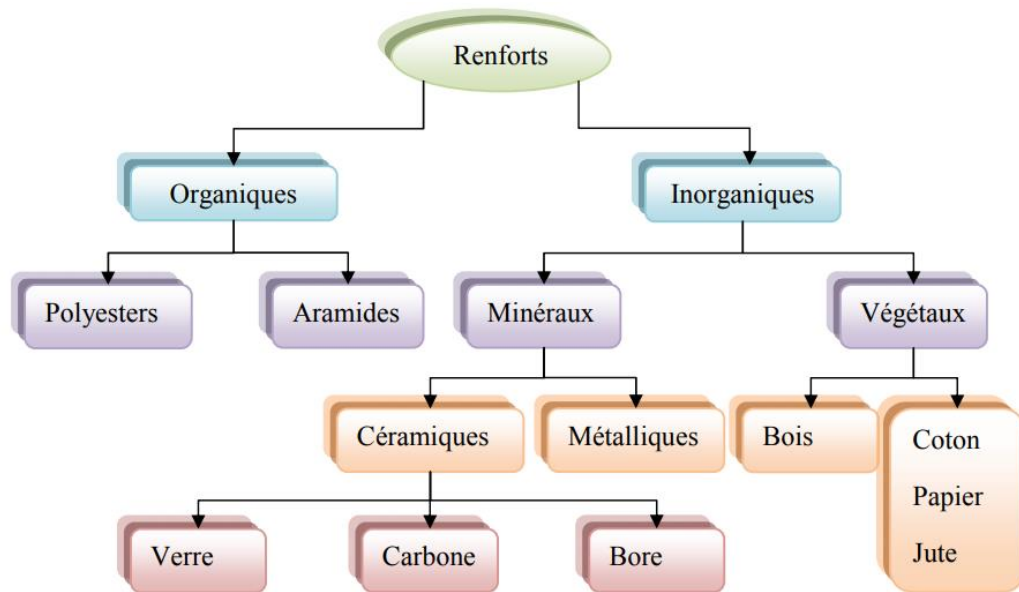


Figure II.3. Principaux matériaux de renforts

II.2.2.2.1. Géométrie des renforts:

D'un point de vue géométrique, on peut distinguer trois grands types de renforts :

- Les fibres longues (i.e. longueur comparable aux dimensions de la pièce,
- Les fibres courtes (i.e. de longueur faible devant les dimensions de la pièce,
- Les particules, ou charges renforçantes

Tous ces renforts sont inclus au sein d'une matrice qui répartit les efforts entre eux et les protège des agressions extérieures, comme indiqué ci-dessus. En outre, lorsque les renforts sont des fibres, celles-ci peuvent être soit orientées dans une direction précise, soit disposées aléatoirement

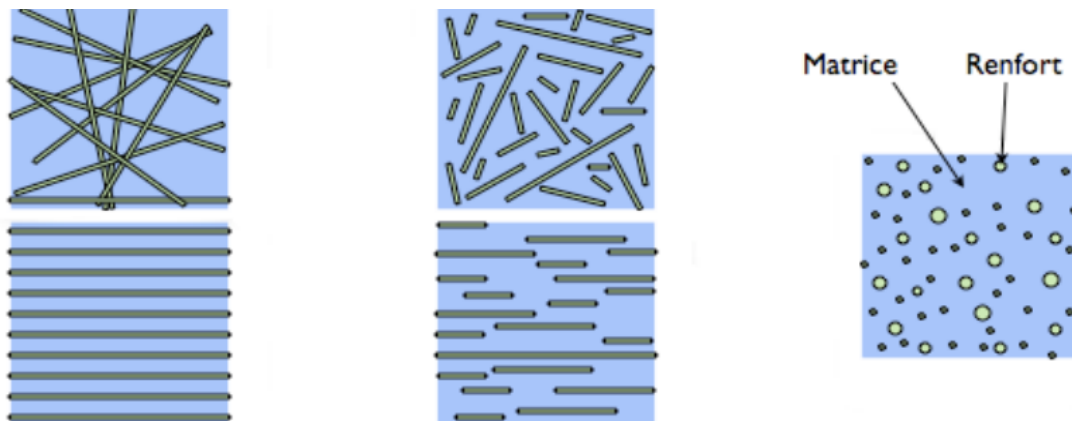


Figure II.4. Les structures géométriques des composites

II.2.2.2.2. Renforts et propriétés mécaniques:

Les renforts sont généralement conçus de sorte à avoir des propriétés mécaniques optimales (notamment la résistance et la rigidité). Ceci passe naturellement par le choix d'un matériau adéquat, mais pas seulement : dans le cas des composites modernes, le caractère particulier ou filamentaire

des renforts fait qu'il est généralement possible de les fabriquer avec très peu de défauts, alors qu'une pièce massive du même matériau en contiendrait beaucoup plus, ce qui nuirait à sa résistance mécanique (c'est pourquoi le verre, peu résistant sous forme massive, peut être employé comme renfort lorsqu'il est sous forme de fibre).

Sauf cas particuliers, les renforts sont donc beaucoup plus rigides et plus résistants que la matrice (souvent d'un facteur 10, voire 100 ou plus). Par conséquent, les propriétés mécaniques du composite dépendent fortement de la forme et de l'orientation des renforts :

- Les composites à fibres longues présentent un meilleur comportement mécanique que les composites à fibres courtes ou à particules, du moins dans les directions renforcées par les fibres ;
- Les composites à fibres parallèles présentent un comportement mécanique anisotrope (voir la ressource « Modélisation du comportement des composites : l'élasticité anisotrope »), tandis que les composites à fibres orientées aléatoirement ou à particules présentent un comportement à peu près isotrope.

Ainsi, pour des applications structurelles, c'est-à-dire des pièces devant résister à des efforts importants, on utilise généralement des fibres longues, dont on adapte l'orientation aux sollicitations subies par la pièce, et les composites ainsi conçus ont généralement des comportements anisotropes. En revanche, pour des applications non structurelles, on utilise généralement des fibres courtes ou des particules, dont le coût de mise en œuvre est moins élevé. Cette distinction vaut aussi bien pour les composites modernes que pour les « multi-matériaux » traditionnels. Par exemple :

- Le verre, associé à des matrices de résine, est utilisé sous forme de microbilles ou de fibres courtes pour réaliser des plastiques renforcés ou des isolants thermiques. Sous forme de fibres longues, il peut servir à des applications structurelles comme les coques des bateaux ;



Microbilles creuses,



Fibres courtes



Fibres longues

Figure II.5. Exemples de renforts en verre

II.2.3. Les matériaux composites naturels

L'histoire des composites à base de produits naturels remonte bien avant celle des polymères conventionnels. On peut trouver des exemples dans la littérature ancienne : dans l'Exode (second livre de la Bible), la mère de Moïse fabrique un panier avec des joncs, de la poix – mélange de résine de sapin et cire d'abeille – et de la vase séchée, qui peut le considérer comme un composite renforcé par des fibres. Durant les guerres de l'opium au 19^{ème} siècle, les troupes chinoises construisirent des défenses en utilisant un composite fait d'amidon de riz, de sucre, de carbonate de calcium et de sable. De nombreuses civilisations utilisèrent, et utilisent encore, des briques d'argiles renforcées de paille et du torchis. Un exemple plus technique mais tout aussi ancien, serait celui de l'arc mongol, constitué d'une âme en « bois » (mélèze ou bambou) contrecollée de tendon sur son dos et de corne sur sa face interne, provenant de buffle ou d'ibex. Suite à l'évolution de la société et à l'industrialisation des procédés, ces matériaux naturels ont progressivement laissé place aux dérivés pétroliers et aux produits de synthèse. Les matériaux composites naturels peuvent utiliser des fibres végétales, des matrices d'origine naturelle ou une combinaison des deux.

II.2.3.1. Les additifs :

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- **Lubrifiants et agent de démoulage** : Leur principale objectif est de faciliter le façonnage des résines et de diminuer leurs adhérences aux moules et aux mandrins.
- **Pigments et colorants** : Se présentant sous formes de poudres ou de paillettes, Ils sont obtenus à partir d'oxydes ou de sels métalliques. Les colorants sont des composés organiques solubles dans un solvant adapté leur emploi est limité, du fait d'une mauvaise tenue chimique et thermique
- **Agent anti retrait** : Les « low profile » et les « lowshrink » sont des produits spécifiques qu'on ajoute pour diminuer et annuler les retraits résultant des polymérisations des résines du au diminution des distances interatomiques du monomère initiales. Ces produits améliorent également l'écoulement des matières dans certaines techniques de moulage Ils sont des produits à base de thermoplastiques ou d'élastomères se présentant sous formes de poudre ou en solution dans des styrènes
- **Agent anti ultraviolets** : Ils protègent les résines de l'action des rayons ultra-violets contenus dans les rayons solaires, absorbant ces rayonnements, ils évitent toute détérioration de la résine par rupture de liaison atomique ou par passage à un état excité qui favorise l'oxydation.

II.2.3.2. Classification des matériaux composites:

Les composites sont classés selon la forme ou la nature des composants, On les classe aussi selon leurs performances et leurs coûts.

II.2.3.2.1. Classification selon leurs performance et leurs couts:

a) Composite de Grande Diffusion GD :

Les plus courants proviennent du couplage de fibre de verre E / poly stère, ou verre E/ techno polymère, avec un taux de renforcement voisin de 30%(en masse). Ils représentent actuellement les plus gros volumes d'emploi avec un bon compromis performance/cout voisin du coût du matériau de base. Les matériaux dits de « grande diffusion GD » dont les propriétés mécaniques sont plutôt faibles mais d'un cout compatible avec une production en grande série

b) Composite de Haute Performance HP :

Leurs résistances mécaniques étant supérieurs aux matériaux conventionnels, ils présentent des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un cout unitaire important. Peu développé, issue surtout des associations de fibres longues de verre R, Carbonne ou aramide (Kevlar) avec des résines époxydes et des taux élevés de renfort supérieur à 50% Ce sont les plus employés en aéronautique et dans le spatial.

II.2.3.2.2. Classification selon la forme des constituants:

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes:

a) Composites à fibres :

Les renforts sont sous formes de fibres continues ou discontinues (coupées, courtes, etc.....).L'arrangement des fibres, leurs orientations permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan. Le concepteur possède donc la un type de matériaux dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécanique et physique en agissant sur : la nature, la proportion des constituants et l'orientation des fibres.

b) Composite à particules :

Les renforts se trouvent sous formes de particules. Les particules au contraire des fibres ne possèdent pas de dimensions précise ou privilégiée Ils sont généralement utilisés pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc.

Assez souvent les particules sont utilisées comme charges pour réduire le cout du matériau sans en diminuer les caractéristiques. Par exemple l'addition des particules d'élastomères dans des matrices polymères fragiles améliore les propriétés à la rupture et au choc par diminution de la sensibilité à la fissuration. Les composites à particules recouvrent un domaine étendu dont le développement s'accroît sans cesse

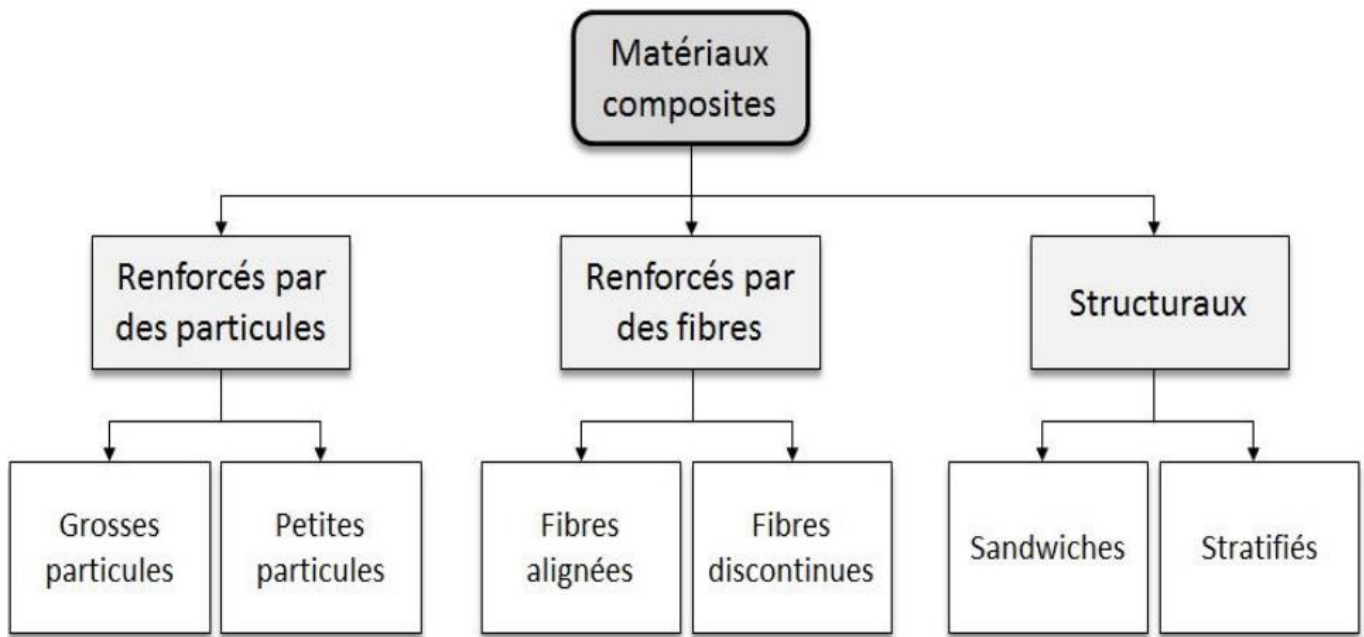


Figure II.6. Classification par type de renfort

II.2.3.2.3. Classification en fonction des natures des matrices :

En fonction de la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés en:

a) Composites à matrices organique (CMO) :

Utilisé pour des $T^{\circ} < 300^{\circ}\text{C}$, ils constituent de loin les volumes les plus importants en industries. Possédant des coûts de revient généralement assez bas pour permettre une production de masse, il s'agit des composites les plus courants, et qui vont être décrits par la suite.

b) Composites à matrices métallique (CMM):

Utilisé pour des $T^{\circ} < 600^{\circ}\text{C}$, la matrice de ces matériaux est un métal léger tel que l'aluminium, le magnésium ou le titane.

II.2.3.2.4. Classification en fonction des natures des renforts:

A ces types de matrices sont associés divers renforts, seuls certains couples d'association ont un usage industriel et d'autres font toujours l'objet de recherche dans les laboratoires. Parmi ces composites nous citerons :

1) Composites à matrices organique (résines et charges) avec :

- Des fibres minérales : verre, Carbone, etc.
- Des fibres organique : Kevlar, polyamides, etc.
- Des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.

2) Composites à matrices métallique :

- Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC) ;
- Des fibres métalliques : bore

- Des fibres métal-minérales : fibres de bore revêtues de SiC

3) Composites à matrices céramique :

- Des fibres métalliques : bore ;
- Des particules métalliques : cermets ;
- Des particules minérales : carbures, nitrures, etc.

II.2.3.3. Avantages en génie civil:

- **Légèreté** : réduction du poids des structures et facilité de mise en œuvre.
- **Résistance à la corrosion** : idéal pour les environnements humides ou agressifs.
- **Facilité de pose** : installation rapide sur structures existantes.
- **Rendement mécanique élevé** : résistance à la traction, au cisaillement et à la fatigue.

II.2.3.4. Applications pratiques:

- **Renforcement des poutres en béton armé** : collage de bandes FRP pour augmenter la résistance à la flexion ou au cisaillement.
- **Consolidation de ponts anciens** : gainage de piles ou de voûtes avec des tissus composites.
- **Structures maritimes** : réparation de quais ou d'écluses sans intervention lourde.
- **Toitures et passerelles légères** : structures entièrement réalisées en composites.

II.2.3.5. Inconvénients et limites:

- **Coût élevé** : lié à la fabrication des fibres et des résines.
- **Comportement au feu** : certains polymères dégagent des fumées toxiques.
- **Sensibilité aux UV** : nécessite un revêtement de protection.
- **Impact des composites sur l'industrie et l'emploi:**

Sur une période de trente ans (1950-1980), le développement des composites se traduit par l'explosion des PME (30 000 employés dans les matériaux composites dont 5 % dans les matériaux haute performance). L'identité de ces professionnels des matériaux n'est pas clairement définie car ce secteur a subi une redéfinition globale demandant un effort supplémentaire en amont de la production et un savoir-faire supplémentaire pour les ouvriers, ce qui s'oppose à la production en chaîne. Le métier de chaque acteur n'est plus clairement défini. De nombreux scientifiques migrent vers l'industrie tandis que les ouvriers acquièrent des connaissances physiques ou chimiques.

Les matériaux composites vont permettre de faire revivre un artisanat voué à disparaître. Des ouvriers acquièrent ainsi une technique extrêmement précise qui est difficilement intégrable dans une production à la chaîne. Bien que la production automatisée en série reste, pour les promoteurs du composite, un idéal à atteindre pour le plein développement de ce secteur, le savoir tacite accumulé par le travail artisanal et l'expérience sont tout de même reconnus comme des facteurs d'innovation non négligeables. C'est notamment cette accumulation de gestes, de consciences professionnelles et

de trouvailles qui ont pu simplifier et optimiser le travail ou encore diminuer le risque de défaut. Cependant, cette production artisanale est lente et coûteuse, ce qui rend les entreprises de composites moins concurrentielles face à l'industrie des matériaux non-composites. Pour y remédier, les entreprises vont réussir à séparer la production en deux phases : une première phase artisanale de préparation durant laquelle les ouvriers préparent un semi-produit et une seconde phase de moulage en continu plus facilement automatisable durant laquelle ce semi-produit est achevé.

II.3. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu général des matériaux composites, en abordant leur définition, leur composition, ainsi que les principaux types utilisés dans le domaine du génie civil. Ces matériaux, constitués d'un renfort et d'une matrice, offrent des performances mécaniques élevées tout en restant légers, ce qui en fait des candidats idéaux pour diverses applications structurelles.

Les avantages notables des composites, tels que leur résistance à la corrosion, leur facilité de mise en œuvre et leur rapport résistance/poids élevé, en font des solutions innovantes pour le renforcement et la réparation des structures. Toutefois, certaines limitations subsistent, notamment en ce qui concerne leur comportement à long terme, leur coût élevé et la sensibilité des assemblages à l'environnement.

Chapitre III :

L'intelligence artificielle (AI)

et ses applications en génie civil

III.1. Introduction:

L'intelligence artificielle (IA) est aujourd'hui considérée comme un outil permettant aux utilisateurs de trouver des informations pertinentes, de résoudre des problèmes et de prendre des décisions. Elle ajoute une couche de raisonnement aux systèmes d'information traditionnels et aux applications web.

L'apprentissage automatique (ou Machine Learning) est une branche de l'intelligence artificielle (IA) qui permet à des systèmes d'apprendre à partir de données pour réaliser des tâches sans être explicitement programmés pour chacune. Au lieu de suivre des règles prédéfinies, ces systèmes identifient des modèles dans les données et s'améliorent avec l'expérience.

Dans ce chapitre nous présentons les différentes méthodes utilisées dans l'intelligence artificielle (IA) et nous concentrons sur les méthodes d'apprentissage supervisé car ces algorithmes sont entraînés à prédire des résultats en fonction de ces données d'apprentissage.

III.2. Définition de l'intelligence artificielle AI:

Selon (Mitchell, T. M. (1997) Un programme apprend de l'expérience E par rapport à une tâche T et une mesure de performance P , si ses performances sur T , mesurées par P , s'améliorent avec l'expérience E .

Le ML repose sur des fondements en statistiques, optimisation et algèbre linéaire. Les méthodes cherchent souvent à minimiser une fonction de coût (ex : erreur quadratique) par des techniques comme la descente de gradient (Bishop, C. M. (2006)).

L'apprentissage automatique (ML) est une sous-discipline de l'intelligence artificielle (IA) qui se focalise sur le développement d'algorithmes capables d'apprendre à partir de données pour effectuer des prédictions ou prendre des décisions sans programmation explicite (Mitchell, 1997). Son essence réside dans la capacité des modèles à généraliser à partir d'exemples, identifiant des motifs complexes invisibles à l'œil humain.

Dans (Kok, 2009), l'IA tente d'imiter un comportement intelligent avec des programmes informatiques.

Selon (Ghosh, A., 2018) L'IA est une technologie qui vise à permettre aux ordinateurs d'effectuer un raisonnement semblable à celui des humains.

Selon (Bensattalah et al,2024) L'IA est un programme qui imite l'intelligence humaine, c'est-à-dire qui observe, étudie et analyse la manière dont les êtres humains raisonnent et résolvent les problèmes, puis traduit ces actions et activités en programmation dans la machine.

III.2.1. Typologies Fondamentales de IA:

Pour créer une IA, il existe plusieurs approches, telles que les systèmes experts, les approches d'apprentissage automatique et autres.

a) Système expert :

Une approche système expert nécessite que les développeurs créent des règles, des connaissances et des inférences pour imiter le travail des experts. Un système expert est programmé avec la logique mathématique (logique propositionnelle, logique du premier ordre) en utilisant des langages de programmation tels que LISP ou PROLOG.

b) Apprentissage Supervisé :

Modèles entraînés sur des données annotées (features → labels). Exemples : Régression linéaire, SVM, Réseaux de Neurones(Hastie et al,2009).

c) Apprentissage Non-Supervisé :

Découverte de structures dans des données non-étiquetées (clustering, réduction de dimension) Ghahramani, Z. (2004).

d) Apprentissage par Renforcement :

Un agent apprend une politique optimale via des récompenses/pénalités (environnement markovien) Sutton & Barto, (2018).

e) Deep Learning :

Utilisation de réseaux de neurones profonds (multi-couches) pour l'apprentissage de représentations hiérarchiques. Percées majeures en vision par ordinateur et NLP (LeCun et al 2015).

III.2.2. Apprentissage par Transfert :

Réutilisation de modèles pré-entraînés sur de nouvelles tâches avec peu de données Pan, S. J., & Yang, Q. (2010).

III.2.2.1. Apprentissage Supervisé:

Vu notre travail focalise sur la prédiction à base de datasheet, nous présentons les méthodes utilisées dans l'apprentissage supervisé. Dans l'apprentissage supervisé, les algorithmes apprennent à partir d'un ensemble de données où les entrées sont associées à des sorties ou étiquettes connues. L'algorithme est entraîné à prédire des résultats en fonction de ces données d'apprentissage.

- a) **SVM (Support Vector Machine ou Machine à vecteurs de support)** est un algorithme d'apprentissage automatique supervisé qui peut être utilisé pour les problèmes de classification ou de régression. Toutefois, il est surtout utilisé dans les problèmes de classification.

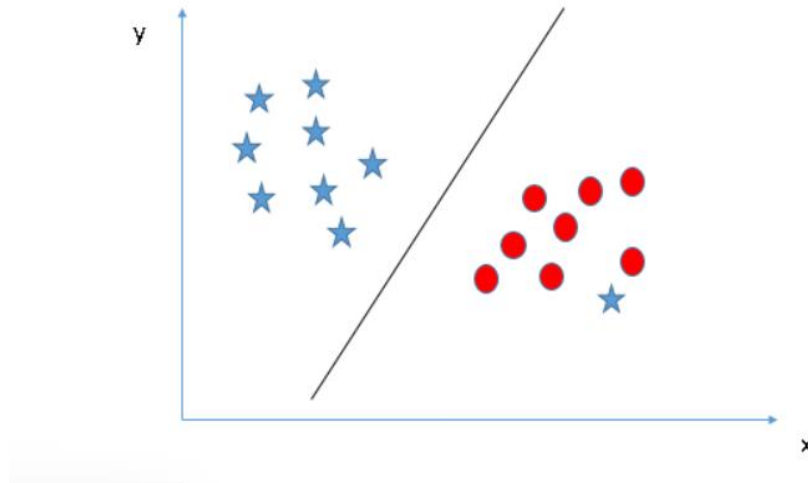


Figure III.1. Machine à vecteurs de support

- b) **L'apprentissage Bayésien** : permet de faire des prédictions en se basant sur des probabilités. Il offre un cadre pour le raisonnement à base de probabilités ;

- Le calcul des probabilités conditionnelles se base sur la formule de Bayes :

$$P(X,Y) = P(X/Y) P(Y) = P(Y/X) P(X)$$

Et sur la règle de chaînage des probabilités conditionnelles :

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = P(X_n | X_{n-1}, \dots, X_1) P(X_{n-1} | X_{n-2}, \dots, X_1) \dots P(X_2 | X_1) P(X_1)$$

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | X_{i-1}, \dots, X_1)$$

- c) **La régression linéaire** : est une méthode statistique fondamentale utilisée pour modéliser la relation entre une variable dépendante (cible) et une ou plusieurs variables indépendantes (prédicteurs). Son objectif principal est d'établir une relation linéaire permettant de prédire la variable cible à partir des prédicteurs, tout en quantifiant l'impact de chaque variable explicative Galton, F. (1886).

III.2.3. Formulation Mathématique d'un modèle simple :

On a deux variables aléatoires, une variable expliquée **Y**, qui est un scalaire, et une variable explicative **X**, également scalaire. On dispose de **n** réalisations de ces variables:

$$(x_i)_{1 \leq i \leq n} \text{ et } (y_i)_{1 \leq i \leq n}$$

soit :

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$$

Où ε_i est le terme d'erreur ; chaque terme d'erreur lui-même est une réalisation d'une variable aléatoire E_i .

Modèle multiple:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i^1 + \beta_2 x_i^2 + \dots + \beta_p x_i^p + \varepsilon_i \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, n$$

La méthode des moindres carrés ordinaires (MCO) est utilisée pour l'estimation des paramètres, qui minimise la somme des carrés des résidus :

$$\beta = (1/n \sum x_i x_i')^{-1} (1/n \sum x_i y_i)$$

Sous forme vectorielle ou:

$$\beta = (X'X)^{-1} X'y$$

III.2.3.1. Les arbres de décision : Les arbres de décision sont des modèles d'apprentissage automatique supervisé non paramétriques, utilisés pour la classification et la régression. Ils partitionnent récursivement l'espace des données en sous-ensembles homogènes basés sur des règles de décision, formant une structure arborescente intuitive. L'article séminal de Ross Quinlan (1986) introduit ID3, le premier algorithme moderne d'arbres de décision utilisant le gain d'information et l'entropie de Shannon. ID3 construit l'arbre de décision récursivement. À chaque étape de la récursion, il calcule parmi les attributs restant pour la branche en cours, celui qui maximisera le gain d'information(wiki). ID3 utilise la formule :

$$I_E(i) = - \sum_{j=1}^m f(i,j) \log f(i,j)$$

$$I_E(i) = - \sum_{j=1}^m f(i,j) \log f(i,j)$$

Puis l'évolutions majeures de l'algorithme C4.5 (Quinlan, 1993) la gestion des données continues et valeurs manquantes. Et l'algorithme CART (Breiman et al., 1984) Arbres binaires avec l'indice de Gini.

III.2.3.2. Le régresseur de forêt aléatoire (Random Forest Regressor) :

C'est un algorithme d'apprentissage automatique supervisé, basé sur une méthode d'ensemble combinant plusieurs arbres de décision pour résoudre des problèmes de régression (prédiction de variables continues). Développé par Leo Breiman et Adele Cutler au début des années 2000, il s'est imposé comme un outil incontournable en science des données grâce à sa robustesse, sa précision et sa capacité à gérer des jeux de données complexes. Les avantages clés de cette méthode selon (réf1) et (réf2):.

- **Haute précision** : En agrégeant des prédictions multiples, la forêt aléatoire surpasse souvent les modèles basés sur un seul arbre ou les régressions linéaires, notamment avec des données non linéaires ou bruyantes
- **Gestion des données complexes** :
 - Tolère les valeurs manquantes et les variables hétérogènes (numériques, catégorielles).
 - Évalue l'importance des variables via la réduction moyenne de l'erreur (MSE) induite par chaque caractéristique.

III.2.4. Les réseaux de neurones artificiels (RNA):

Sont des systèmes computationnels inspirés du fonctionnement biologique des neurones cérébraux, conçus pour résoudre des problèmes complexes via l'apprentissage automatisé. Leur histoire débute en 1943 avec le modèle du neurone formel proposé par McCulloch et Pitts, démontrant que des assemblages de neurones artificiels peuvent réaliser des opérations logiques et arithmétiques (réf3). En 1957, Frank Rosenblatt introduit le perceptron, premier réseau capable d'apprendre par l'expérience, suscitant un enthousiasme médiatique avant d'être critiqué pour ses limitations (notamment l'incapacité à traiter la fonction XOR) par Minsky et Papert en 1969.

La renaissance survient dans les années 1980 : le physicien John Hopfield relance l'intérêt théorique (1982), tandis que l'algorithme de rétropropagation du gradient (formalisé par Rumelhart, Hinton et Williams en 1986) permet l'entraînement efficace des perceptrons multicouches (PMC), résolvant les problèmes non linéaires.

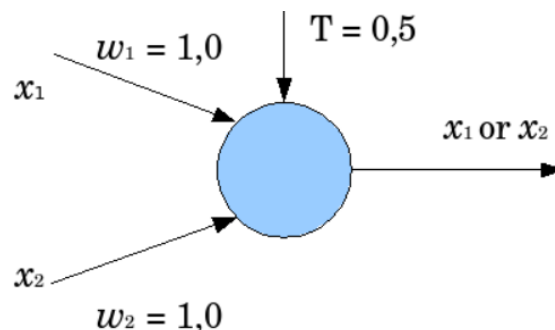


Figure III.2. Représentation d'un neurone formel (ou logique)

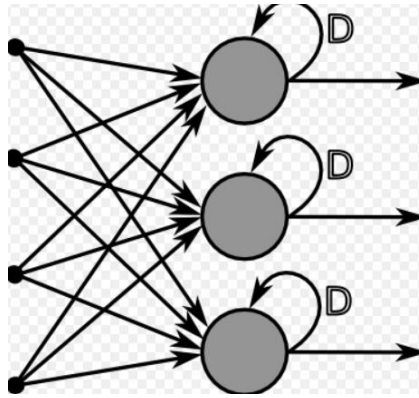


Figure III.3. Réseau de neurones avec rétroaction

La figure suivante présente la structure d'un neurone artificiel ou neurone formel. Le neurone calcule la somme de ses entrées x , pondérée par les poids w , puis cette valeur passe à travers la fonction d'activation ϕ pour produire sa sortie o .

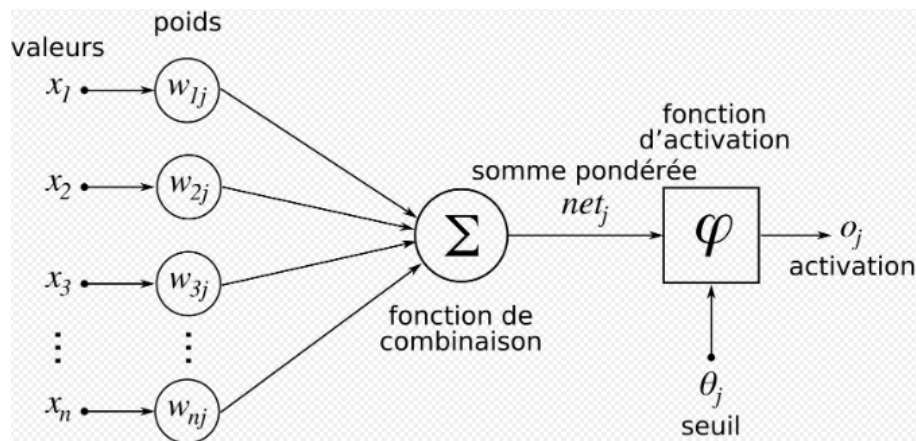


Figure III.4. Neurone artificiel avec la fonction d'activation

III.2.4.1. Les fonctions d'activations RNN:

Dans le domaine des réseaux de neurones artificiels, la fonction d'activation est une fonction mathématique appliquée à un signal en sortie d'un neurone artificiel.

Trois fonctions mathématiques couramment utilisées comme fonctions d'activation sont la fonction sigmoïde, tanh et ReLU.

La fonction sigmoïde est une fonction d'activation largement reconnue, utilisée dans l'apprentissage automatique (ML) et en particulier dans les réseaux neuronaux (NN). Elle se caractérise par sa courbe en forme de "S", qui fait correspondre mathématiquement toute valeur d'entrée à une sortie comprise entre 0 et 1.

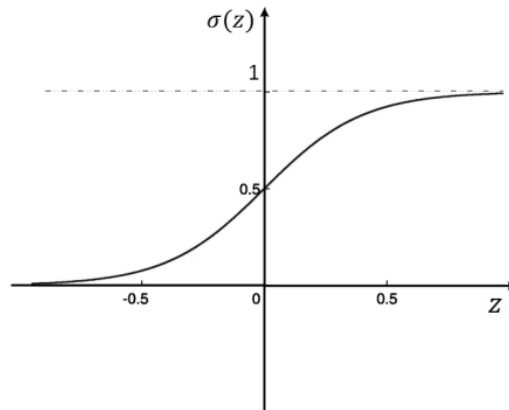


Figure III.5. Exemple de la fonction Sigmoide.

III.2.4.2. La fonction tanh (abréviation de "tangente hyperbolique"):

Elle transforme l'entrée pour produire une valeur de sortie comprise entre -1 et 1:

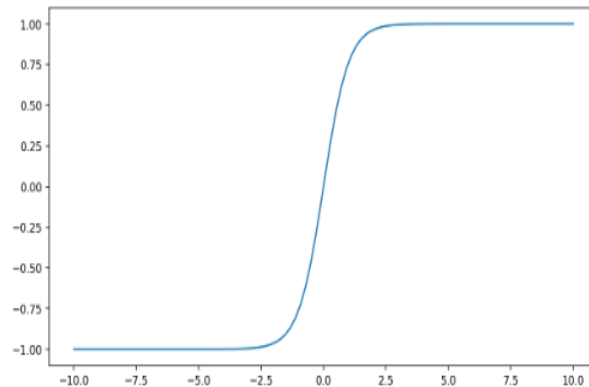


Figure III.6. Tracé de la fonction tanh.

La fonction d'activation unité de rectification linéaire (ou ReLU, pour "rectified linear unit") transforme la sortie à l'aide de l'algorithme suivant:

- Si la valeur d'entrée x est inférieure à 0, renvoyez 0.
- Si la valeur d'entrée x est supérieure ou égale à 0, renvoie la valeur d'entrée.

La fonction ReLU peut être représentée mathématiquement à l'aide de la fonction $\max()$:

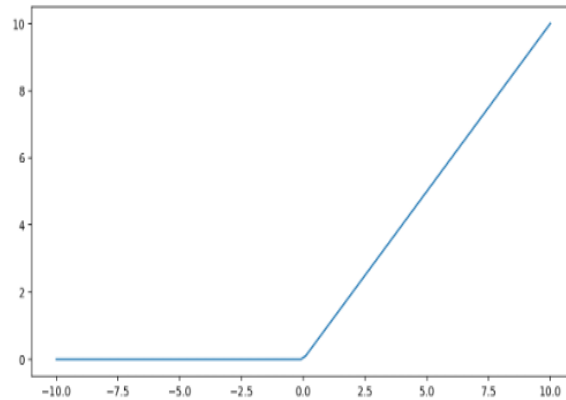


Figure III.7. Graphique de la fonction ReLU.

III.2.5. Les réseaux de neurones convolutifs:

III.2.5.1. MobileNetV2:

MobileNetV2 est une architecture de réseau neuronal convolutif conçue pour optimiser les performances sur les appareils mobiles. Elle repose sur une structure résiduelle inversée où les connexions résiduelles se situent entre les couches de goulot d'étranglement. La couche d'expansion intermédiaire utilise des convolutions légères en profondeur pour filtrer les caractéristiques sources de non-linéarité. Globalement, l'architecture de MobileNetV2 comprend une couche initiale de convolution complète avec 32 filtres, suivie de 19 couches de goulot d'étranglement résiduelles (Sandler, M, 2018).

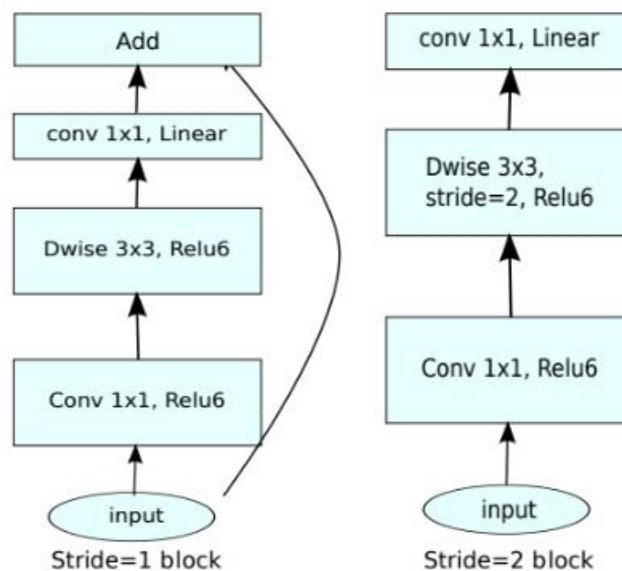


Figure III.8. Sandler, M

III.2.5.2. ResNet (Residual Network):

ResNet (Residual Network) est une architecture de réseau neuronal convolutif (CNN) révolutionnaire qui utilise des connexions de sauts pour entraîner des réseaux beaucoup plus profonds sans le problème du gradient évanescent. Ces connexions permettent aux couches de « sauter » une ou plusieurs couches, permettant ainsi au réseau d'apprendre des mappages d'identité. L'architecture ResNet (Residual Neural Network) a été introduite par Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren et Jian sun dans leur article intitulé « Deep residual learning for image recognition » en 2015.

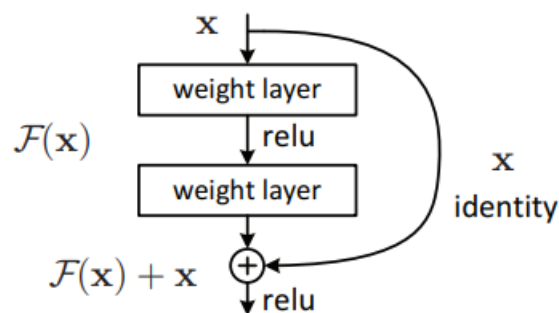


Figure III.9. Apprentissage résiduel : un élément constitutif.

Avec ResNet, l'optimisation des réseaux profonds est assurée en utilisant des connexions résiduelles. Cela permet aux gradients de passer dans deux couches de convolution, mais aussi de passer directement à travers un saut aux couches suivantes en reliant l'entrée de la n ème couche à la sortie de la $(n + a)$ ème couche (Figure 3.10).

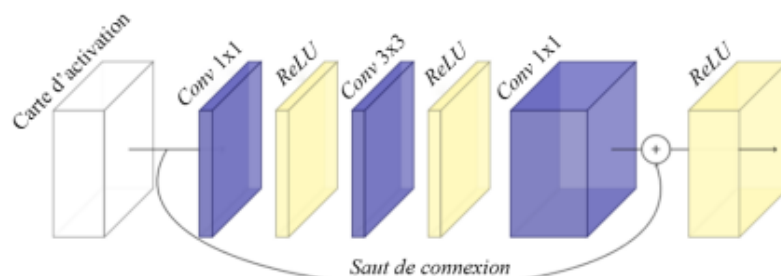


Figure III.10. Bloc convolutif résiduel

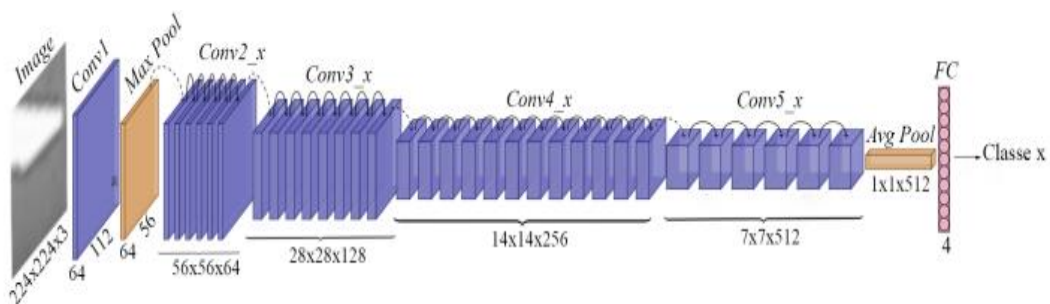


Figure III.11. Architecture du réseau ResNet-34

III.2.5.3. GoogLeNet:

En 2014, une équipe de Google a développé l'architecture GoogLeNet (Szegedy, 2014). GoogLeNet, également connu sous le nom d'Inception v1, est une architecture de réseau neuronal convolutif (CNN) qui a été introduite par Google.

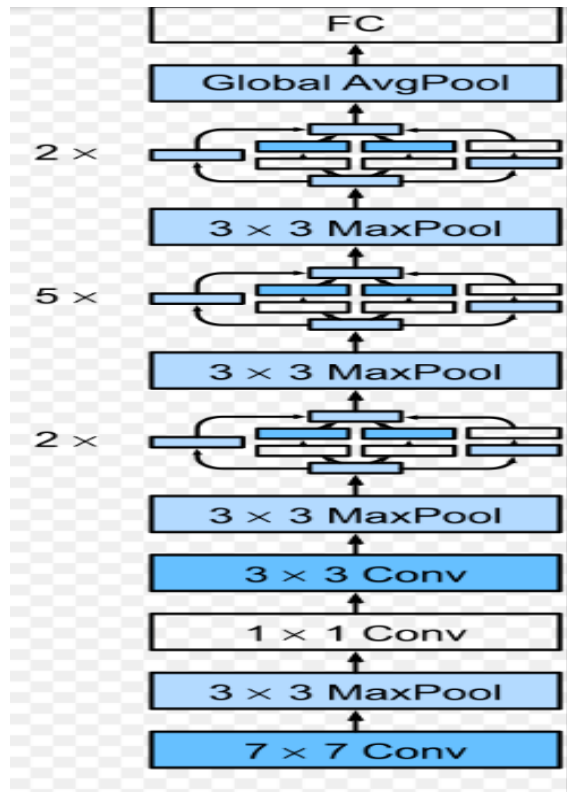


Figure III.12. Architecture de GoogLeNet

a) Inception:

Inception L'un des réseaux les plus complexes est Inception qui a été construit par Google. Il a été conçu de façon à améliorer les performances des réseaux de neurones profonds à la fois en termes de rapidité et de précision. Son évolution a conduit à la création de plusieurs versions du réseau.

b) DenseNet

L'architecture DenseNet a donc été spécialement développée pour améliorer la précision causée par le gradient de disparition dans les réseaux neuronaux de haut niveau en raison de la longue distance entre les couches d'entrée et de sortie et de la disparition des informations avant d'atteindre leur destination.

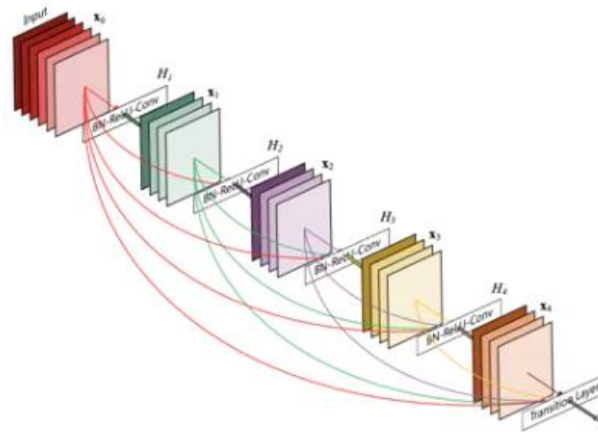


Figure III.13. Architecture DenseNet

III.2.6. Outils logiciels utilisés dans AI:

Parmi les logiciels courants pour la mise en œuvre de AI dans le génie civil :

- Python (avec TensorFlow, Keras, PyTorch)
- MATLAB (Toolbox Neural Network)
- Logiciels spécialisés BIM et FEM intégrant l'AI

III.2.7. Applications AI en génie civil:

Dans le domaine du génie civil, les RNA sont utilisés pour : Prédire la résistance des matériaux (ex. : béton, acier) ; identifier les fissures ou déformations anormales ; estimer la durée de vie des structures ; surveiller en temps réel l'état de santé des infrastructures ou optimiser les phases de conception ou de construction.

Selon BENZAAMIA, A. (2024) La prédiction précise de la contribution à la résistance au cisaillement des composites en polymères renforcés de fibres (FRP) collés extérieurement sur les poutres en béton armé (BA) est une tâche cruciale et difficile. Cette étude explore l'application de techniques avancées d'apprentissage automatique pour remédier à cette limitation. Six modèles d'intelligence artificielle diversifiés sont développés et évalués de manière exhaustive, notamment le Gradient Boosting eXtrême (XGB), les Réseaux de Neurones Profonds (DNN), le XGBoost Monotonique (MXGB), les Réseaux Neuronaux Monotoniques avec Contraintes (CMNN), et leurs homologues ensemblistes. Un ensemble complet de 394 spécimens de poutres BA renforcées avec diverses configurations de PRF est utilisé pour l'entraînement et la validation des modèles.

Kayadelen et al. (2009) ont utilisé des réseaux de neurones artificiels (RNA), la programmation génétique (PG) et des méthodes neuro-floues adaptatives pour prédire la valeur des sols. Sezer (2013) a utilisé la régression multiple non linéaire, la programmation génétique et les méthodes RNA pour prédire le paramètre du sol. Asteris (2016) a développé des modèles RNA pour la prédiction de la résistance à la compression des BAP à base d'adjuvants, basés sur des données expérimentales issues de 169 mélanges issus de la littérature. Omar Belalia Douma (2017) Utilisation de la modélisation par réseaux de neurones artificiels (RNA) pour prédire les propriétés du béton autoplaçant (BAP) contenant des cendres volantes en remplacement du ciment.

Détection d'anomalies (e.g. des fissures) dans des images de tunnels par forêts d'arbres aléatoires ou par apprentissage profond (Décor et al 2019). le modèle est entraîné sur deux banques de données créées à partir d'images de parois en béton et de parois en maçonnerie.

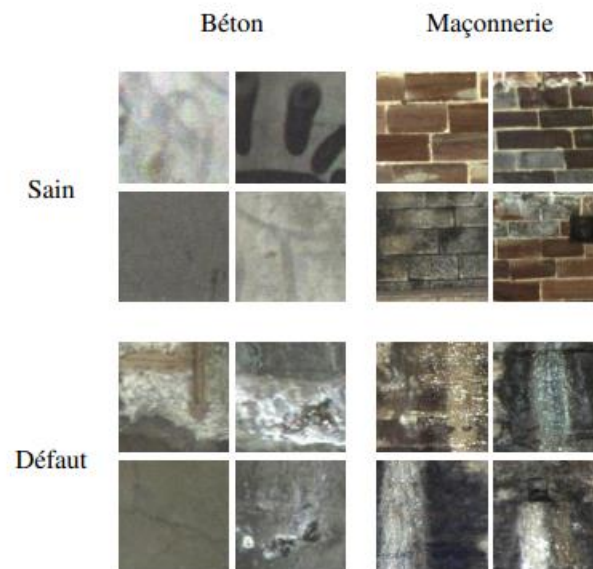


Figure III.14. Exemples d'images de la base d'apprentissage ou de test.

Pour les tunnels en béton, les images de la classe défaut représentent de gauche à droite et haut en bas : un fer apparent, une arrivée d'eau, une fissure et un nid de cailloux (altération en surface). Pour les tunnels en maçonnerie, la classe défaut ne comprend que des arrivées d'eau (Décor et al 2019).

III.3. Conclusion:

L'intégration de l'intelligence artificielle en génie civil transforme progressivement la manière dont les ingénieurs conçoivent, surveillent et entretiennent les infrastructures. Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes méthodes utilisées dans le domaine d'AI et nous avons conclu que les deux méthodes de régresseur de forêt aléatoire et les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont les plus puissances prédictives et robustesses. Dans le chapitre suivant nous allons implémenter une méthode qui possède une bonne précision.

Chapitre IV :

Évaluation de la contribution au cisaillement à l'aide d'un modèle de réseau neurone

IV.1. Introduction:

Dans ce chapitre, nous présentons les étapes de mise en œuvre l'implémentation le modèle de réseau neuronal artificiel pour la prédiction de la contribution au cisaillement. Pour cela, nous présentons les différents outils utilisés pour l'implémentation. Ensuite, nous décrivons architecture du modèle de réseau neuronal artificiel proposé. Enfin, nous présentons un aperçu des résultats obtenus.

IV.2. Évaluation de la contribution des bandes composites CFRP au cisaillement selon la méthode du BAEL:

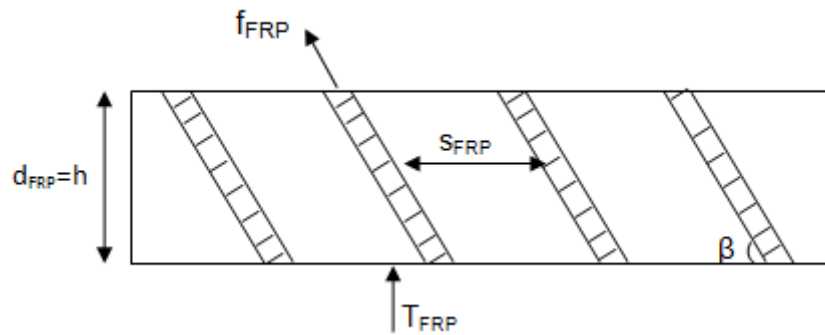


Figure IV.1. Géométrie d'une section transversale d'une poutre en béton armée renforcée en cisaillement par bandes en composites FRP

La contrainte tangente (contrainte de cisaillement) dans la section ou se produit l'effort tranchant sera donnée par l'équation suivante :

$$\tau_U = \frac{T_U}{b.d}$$

Projection vertical:

$$f_{FRP} = A_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} (\sin \beta + \cos \beta)$$

Soit m le nombre de cours de section t A_{FRP} travaillant à t σ_{FRP} pour équilibrer un effort T_{FRP} :

$$m = \frac{d_{FRP}(1 + \cot \beta)}{S_{FRP}}$$

Et:

$$m.A_{FRP}.\sigma_{FRP} = \frac{T_{FRP}}{\sin \beta}$$

D'où:

$$T_{FRP} \geq \frac{A_{FRP} \cdot d_{FRP} \cdot \sigma_{FRP} (\sin \beta + \cos \beta)}{S_{FRP}}$$

IV.2.1. Exemple de calcul:

La présente méthode analytique basée sur le BAEL a été validée par une comparaison des résultats numériques obtenus avec le modèle de Triantafillou; Chen et Teng; Carolin, Täljsten et Sa.

Les caractéristiques géométriques et les propriétés mécaniques des matériaux utilisés sont représentées suivant la figure suivante:

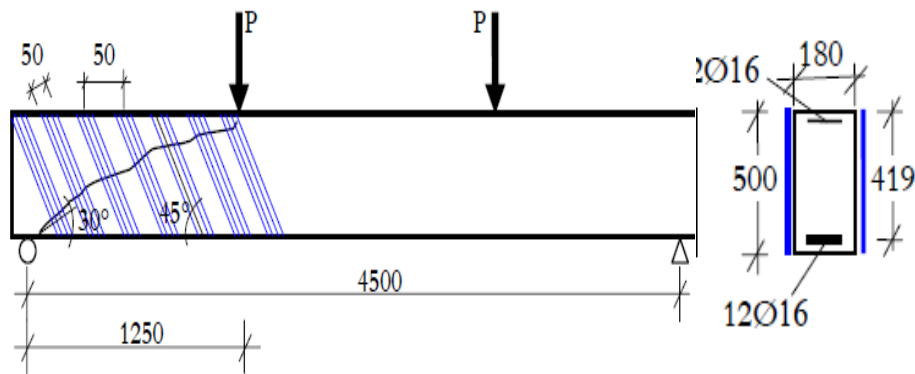


Figure IV.2. Géométrie d'une section en T d'une poutre en béton armé renforcée en flexion par composite CFRP

Tableau IV.1. caractéristiques et propriétés mécanique des matériaux utilisées

Section en béton	armatures	Matériaux composite
$f_{cu}=67\text{MPa}$	$E_s=210\text{GPa}$	$E_{FRP}=234\text{GPa}$
$d=419\text{mm}$	$\sigma_e=500\text{MPa}$	$\sigma_{FRP}=3150\text{MPa}$
$b=180\text{mm}$	$A_s=2413\text{mm}^2$	$\varepsilon_{FRP}=0.015$
$h=500\text{mm}$	$A_{sc}=402\text{mm}^2$	$t_{frp}=0.09$

La comparaison des résultats est présentée dans le tableau IV.2 pour un modèle d'une poutre en béton armé renforcée en cisaillement par composite en CFRP.

Tableau IV.2. Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement

Modèle de calcul	La contribution des bandes CFRP (T_{FRP})KN	
	Rupture des fibres	Décollement par fissuration
Carolin, Täljsten et Sa	138.1	106.8
Chen et Teng	206.36	127.1
Triantafillou	213.15	164.3
Présente méthode	136,26	104,24

A partir du tableau IV.2 nous pouvons constater que les résultats obtenus à partir de la présente méthode sont plus proche avec les résultats du Triantafillou pour la détermination de la contribution des bandes en composite CFRP en cisaillement.

Tableau IV.3. Comparaison de la contribution des bandes en cisaillement avec la variation de l'espacement entre les bandes composites S_{FRP}

S_{frp}	Modèle de calcul	La contribution des bandes CFRP (T_{FRP}) KN	
		Rupture des fibres	Décollement par fissuration
40	Carolin, taljsten et sa	172,60	133,48
	Présente méthode	170,32	130,30
50	Carolin, taljsten et sa	138,08	106,78
	Présente méthode	136,26	104,24
60	Carolin, taljsten et sa	115,07	88,98
	Présente méthode	113,55	86,87
70	Carolin, taljsten et sa	98,63	76,27
	Présente méthode	97,33	74,46
80	Carolin, taljsten et sa	86,30	66,74
	Présente méthode	85,16	65,15
90	Carolin, taljsten et sa	76,71	59,32
	Présente méthode	75,70	57,91

Le tableau IV.3 présente une comparaison des résultats de la contribution des bandes composite à la rupture et au décollement d'une poutre en béton armé renforcée sur sa partie latérale. Il est clair que les résultats obtenus coïncident avec le modèle de Carolin et al. On peut également remarquer que la contribution des bandes composites devient plus faible à mesure que l'espacement S_{FRP} augmente.

Tableau IV.4. Comparaison de la contribution des bandes en cisaillement avec la variation de l'angle d'inclinaison des bandes composites

β	Modèle de calcul	La contribution des bandes CFRP (T_{FRP}) KN	
		Rupture des fibres	Décollement par fissuration
45	Carolin, taljsten et sa	138,08	106,78
	Présente méthode	136,26	104,24
55	Carolin, taljsten et sa	142,41	110,13
	Présente méthode	134,19	102,66
65	Carolin, taljsten et sa	142,41	110,13
	Présente méthode	128,04	97,96
75	Carolin, taljsten et sa	138,08	106,78
	Présente méthode	118,00	90,28
85	Carolin, taljsten et sa	129,56	100,19
	Présente méthode	104,38	79,85
90	Carolin, taljsten et sa	123,80	95,74
	Présente méthode	96,35	73,71

La comparaison des résultats avec de la variation de l'inclinaison des bandes composites sur la contribution en cisaillement est montre dans le tableau IV.4 . On peut constater que les résultats sont très proches avec ceux du Carolin et al.

Le tableau IV.5 présente une comparaison des résultats de la présente méthode avec la méthode de Carolin et al. avec la variation du module d'Young. On peut conclure que la contribution des bandes composites devient plus importante avec l'augmentation du module d'Young.

Tableau IV.5. Comparaison de la contribution des bandes en cisaillement avec du module d'Young de la bande composite

E_{FRP}	Modèle de calcul	La contribution des bandes CFRP (T_{frp}) KN	
		Rupture des fibres	Décollement par fissuration
60	Carolin, taljsten et sa	39,34	30,42
	Présente méthode	43,67	33,41
100	Carolin, taljsten et sa	59,01	45,63
	Présente méthode	72,79	55,68
140	Carolin, taljsten et sa	75,10	58,08
	Présente méthode	101,90	77,96
180	Carolin, taljsten et sa	88,51	68,45
	Présente méthode	131,02	100,23
234	Carolin, taljsten et sa	172,60	133,48
	Présente méthode	170,32	130,30

IV.3. Environnement de développement:

Notre RN a été développé en exploitant la puissance de calcul considérable offerte par langage python et les différentes bibliothèques proposées pour l'apprentissage automatique.

IV.3.1. Anaconda:

Anaconda est une distribution libre et open source des langages de programmation Python et R appliqué au développement d'applications dédiées à la science des données et à l'apprentissage automatique (traitement de données à grande échelle, analyse prédictive, calcul scientifique). Anaconda comprend un ensemble complet de packages essentiels pour l'analyse de données.

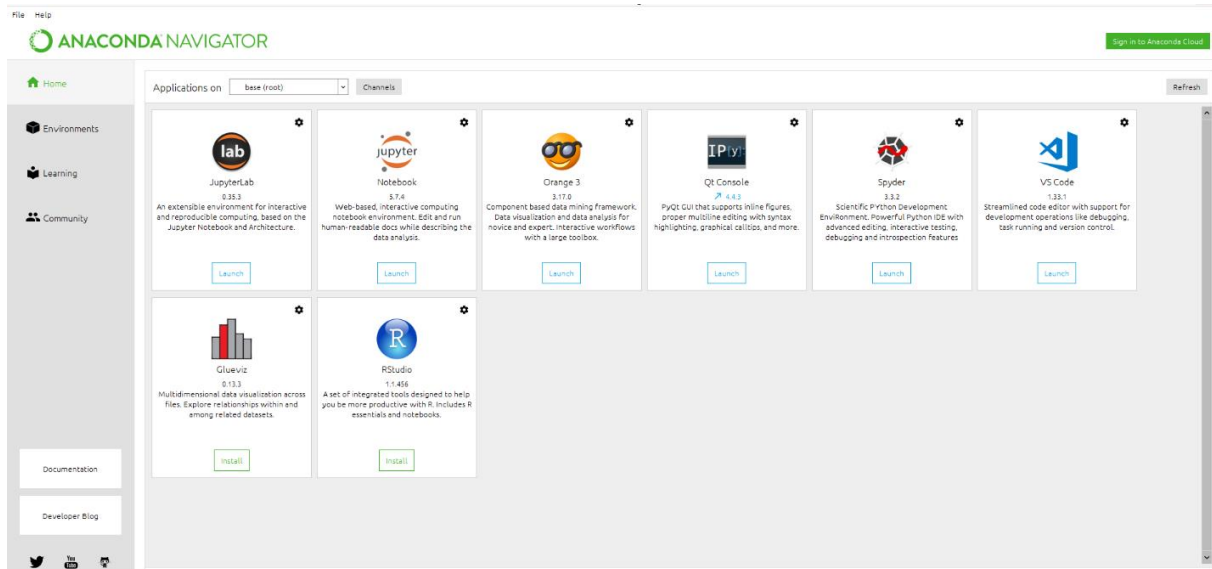


Figure IV.3. Le Navigateur Anaconda

Le Navigateur Anaconda est une interface graphique (GUI) incluse dans la distribution Anaconda, et qui permet aux utilisateurs de lancer des applications (voir la figure), mais aussi de gérer les librairies conda, les environnements et les canaux sans utiliser la moindre ligne de commande. Le Navigateur peut également accéder à des librairies présentes sur le Cloud Anaconda ou dans un Repository Anaconda local, afin de les installer dans un environnement, les exécuter et les mettre à jour. Il est disponible pour Windows, macOS et Linux. Les applications suivantes sont disponibles par défaut dans le navigateur: JupyterLab, Jupyter Notebook, Spyder.

IV.3.2. Jupyter:

Jupyter Notebook est un outil open source gratuit pour écrire du code informatique, il utilise une interface de programmation interactive permettant d'écrire des codes de programmations. Grâce à l'interface des notebooks Jupyter le code est exécuté dans des cellules individuelles, afficher les résultats, visualiser les graphiques et interagir avec les données.

IV.4. Langages de programmation et bibliothèques utilisées:

IV.4.1. Python:

Python est le langage de programmation open source le plus utilisé par les informaticiens. Python est aujourd'hui l'un des langages de programmation les plus populaires et les plus utilisés dans le monde. Python couvre presque tous les besoins en programmation, il propose des bibliothèques comme NumPy (calcul scientifique), Pandas (analyse de données), Django (développement web) et TensorFlow (machine learning)...etc.

IV.4.2. Numpy:

Le terme NumPy est l'abréviation « Numerical Python », c'est une bibliothèque Python populaire principalement utilisée pour les calculs mathématiques et scientifiques. Elle offre des structures de données performantes, notamment (Van Der Walt et al, 2011) les tableaux multidimensionnels (ndarrays), ainsi qu'une vaste collection de fonctions mathématiques optimisées pour des opérations rapides sur de grandes quantités de données. NumPy permet le Prétraitement des données, calculs matriciels pour les réseaux de neurones et Data Science & Machine Learning (Chollet, 2017).

IV.4.3. Matplotlib:

Matplotlib est une bibliothèque Python open source pour la création de visualisations scientifiques et statistiques des données, Développée initialement par John D. Hunter en 2003, elle est devenue un outil indispensable pour les chercheurs, data scientists et ingénieurs. Maptolib permet la Création tout type de graphique : courbes, histogrammes, diagrammes en barres, nuages de points, graphiques 3D, etc.

IV.4.3.1. Domaines d'Application:

- **Sciences expérimentales** : Visualisation de données brutes
- **Finance** : Graphiques de séries temporelles
- **Machine Learning** : Analyse des performances des modèles
- **Ingénierie** : Représentation de signaux et systèmes

IV.4.4. Tensorflow:

TensorFlow est un outil open source d'apprentissage automatique développé par Google. Le code source a été ouvert le 9 novembre 2015 par Google et publié sous licence Apache. Il est fondé sur l'infrastructure DistBelief, initiée par Google en 2011, et est doté d'une interface pour Python, Julia, R et C++. TensorFlow est une bibliothèque open source puissante et populaire développée par Google pour le machine learning et le calcul numérique intensif. Elle fournit un écosystème complet d'outils, de bibliothèques et de ressources communautaires permettant aux chercheurs et développeurs de créer et déployer des applications basées sur l'apprentissage automatique (Abadi et al., 2016).

IV.5. Base de données utilisée:

Pour qu'un réseau neuronal soit efficace, il nécessite une base de données substantielle et complète pour l'entraînement et les tests. Dans cette étude, nous avons utilisé un ensemble de données comprenant 163 exemples de Contribution au cisaillement. Les données ont été collectées et générées à partir des méthodes analytiques proposées comme indiqué dans le tableau IV.6. Cet ensemble de données a constitué une ressource essentielle pour l'entraînement et l'évaluation du réseau neuronal. Le tableau 1 a été limité à 19 exemples de bases de données sélectionnées pour des raisons de concision et d'espace.

Tableau IV.6. Base de données d'apprentissage de contribution au cisaillement

N°	Entrée										Sortie	
	6	β	S _{FRP}	d _{FRP}	E _{FRP}	A _{FRP}	f_c	ρ	$\varepsilon_{FRP, Rupture}$	$E_{FRP, Rupture}$	Contribution au cisaillement	
											A la rupture	Au décollement
1	0,78539816	45	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	136,1237024	104,9132736
2	0,82030475	47	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	136,0407795	104,8493633
3	0,85521133	49	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	135,7921119	104,6577101
4	0,89011792	51	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	135,3780025	104,3385477
5	0,9250245	53	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	134,7989559	103,8922648
6	0,95993109	55	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	134,0556775	103,3194052
7	0,99483767	57	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	133,1490729	102,6206669
8	1,02974426	59	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	132,0802467	101,796901
9	1,06465084	61	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	130,850501	100,8491113
10	1,09955743	63	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	129,4613342	99,77845251
11	1,13446401	65	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	127,9144386	98,58622903
12	1,1693706	67	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	126,2116991	97,27389342
13	1,20427718	69	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	124,35519	95,84304455
14	1,23918377	71	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	122,3471732	94,29542569
15	1,27409035	73	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	120,1900953	92,63292239
16	1,30899694	75	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	117,8865843	90,85756014
17	1,34390352	77	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	115,4394466	88,97150194
18	1,37881011	79	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	112,8516638	86,97704568
19	1,41371669	81	50	500	234	4,5	67	0,001	0,007045098	0,009140930	110,1263886	84,87662128

Le tableau IV.6 présente les paramètres statistiques de la base de données analytiques en utilisant la méthode describe de python, ce tableaux permet d'avoir quelque intuitions par rapport aux données (forme, dispersion, valeurs abérantes, etc)

La méthode describe renvoie la description des données du DataFrame . Pour les données numériques, l'index du résultat comprendra le nombre, la moyenne, l'écart-type, le minimum et le maximum, ainsi que les centiles inférieur, 50 et supérieur. Par défaut, le centile inférieur est 25 et le centile supérieur 75. Le 50 centile correspond à la médiane.

Tableau IV.7. Paramètres statistiques de la base de données analytique

car_df.describe()												
	b1	b2	S	d	E	A	fc	p	FRP1	FRP2	Ar	de
count	163.000000	163.000000	163.000000	163.000000	163.000000	163.000000	163.000000	163.000000	163.000000	163.000000	163.000000	163.000000
mean	0.834233	48.110429	48.098160	492.024540	236.061350	4.564417	64.809816	0.001890	0.006350	0.008540	143.354479	106.964294
std	0.160273	9.193399	8.759626	62.835858	12.154709	0.467285	7.186709	0.002773	0.001598	0.001438	81.285805	65.505794
min	0.780000	45.000000	10.000000	200.000000	200.000000	3.000000	30.000000	0.001000	0.001316	0.003721	54.440000	19.590000
25%	0.780000	45.000000	50.000000	500.000000	234.000000	4.500000	67.000000	0.001000	0.006615	0.008838	109.330000	81.700000
50%	0.780000	45.000000	50.000000	500.000000	234.000000	4.500000	67.000000	0.001000	0.007045	0.009141	130.670000	100.670000
75%	0.780000	45.000000	50.000000	500.000000	234.000000	4.500000	67.000000	0.001000	0.007045	0.009141	152.430000	114.225000
max	1.570000	90.000000	70.000000	700.000000	300.000000	7.000000	70.000000	0.020000	0.007693	0.009582	680.610000	524.560000

Le tableau IV.7 présente corrélation entre les paramètres, en statistique, la corrélation mesure l'intensité et la direction de la relation entre deux variables. Une corrélation positive indique que les variables varient dans le même sens (quand l'une augmente, l'autre a tendance à augmenter), tandis qu'une corrélation négative indique qu'elles varient en sens inverse (quand l'une augmente, l'autre a tendance à diminuer).

Tableau IV.8. Corrélation entre les paramètres

	b1	b2	S	d	E	A	fc	p	FRP1	FRP2	Ar	de
b1	1.000000	0.999974	0.073920	0.043214	-0.057741	-0.046935	0.103759	-0.109208	0.148143	0.142214	-0.116025	-0.092666
b2	0.999974	1.000000	0.073910	0.043208	-0.057733	-0.046928	0.103745	-0.109193	0.148123	0.142195	-0.115981	-0.092626
S	0.073920	0.073910	1.000000	-0.027727	0.037048	0.030115	-0.066575	0.070071	-0.095053	-0.091249	-0.829413	-0.804974
d	0.043214	0.043208	-0.027727	1.000000	0.021658	0.017605	-0.038920	0.040964	-0.055568	-0.053344	0.225238	0.208542
E	-0.057741	-0.057733	0.037048	0.021658	1.000000	-0.023523	0.052003	-0.054734	-0.043105	-0.020999	0.045983	0.030690
A	-0.046935	-0.046928	0.030115	0.017605	-0.023523	1.000000	0.042271	-0.044491	0.060353	0.057937	0.164869	0.165133
fc	0.103759	0.103745	-0.066575	-0.038920	0.052003	0.042271	1.000000	0.098356	0.094776	0.056879	0.076034	0.092502
p	-0.109208	-0.109193	0.070071	0.040964	-0.054734	-0.044491	0.098356	1.000000	-0.917844	-0.936417	-0.311029	-0.394476
FRP1	0.148143	0.148123	-0.095053	-0.055568	-0.043105	0.060353	0.094776	-0.917844	1.000000	0.997848	0.340340	0.437073
FRP2	0.142214	0.142195	-0.091249	-0.053344	-0.020999	0.057937	0.056879	-0.936417	0.997848	1.000000	0.339514	0.434912
Ar	-0.116025	-0.115981	-0.829413	0.225238	0.045983	0.164869	0.076034	-0.311029	0.340340	0.339514	1.000000	0.994323
de	-0.092666	-0.092626	-0.804974	0.208542	0.030690	0.165133	0.092502	-0.394476	0.437073	0.434912	0.994323	1.000000

IV.6. Architecture ANN:

Compte tenu des travaux publiés dans la littérature qui recommandent l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA) pour prédire les données, en raison de leurs bonnes performances et de leur grande précision, les RNA ont également démontré leur utilité avec des résultats comportant plusieurs valeurs réelles, comme dans notre cas.

Selon la complexité du problème à traiter, il existe des couches cachées (Li) entre les neurones d'entrée et les neurones de sortie, ce type de réseau neuronal étant appelé multicouche. À chaque itération, nous comparons le résultat calculé au résultat souhaité. Cette comparaison est appelée erreur, et cette erreur dans l'algorithme représente la condition d'arrêt. Cette condition d'arrêt est liée à l'algorithme d'apprentissage utilisé. Les calculs de l'erreur quadratique moyenne (EQM) sont similaires à ceux de la variance statistique ; l'EQM est calculée pour un ensemble de données (données de validation) qui n'ont pas été utilisées lors du processus d'apprentissage des réseaux neuronaux. L'EQM est un critère utilisé pour évaluer la précision et le pourcentage de performance de l'algorithme d'apprentissage choisi pour une architecture de réseau neuronal. Dans ce travail nous avons utilisé une perception multicouche (MLP).

IV.7. Évaluation et Résultats:

La visualisation joue un rôle essentiel en science des données et en apprentissage automatique. Elle transforme les données brutes en représentations graphiques, facilitant ainsi l'identification des schémas, des tendances et des valeurs aberrantes. Comparer les valeurs réelles aux valeurs prédites nous aide à comprendre les performances de notre modèle. Nous avons utilisé deux représentations graphiques pour analyser la performance de notre modèle.

IV.7.1. Graphique prédit vs réel:

La figure présente le graphique de l'ensemble de base de données d'apprentissage de contribution au cisaillement en utilisant les variables entrées pour prédire la rupture. Ce nuage de points compare la rupture réelle et la rupture prévue, plus les points sont proches d'une ligne droite, meilleures sont les prédictions du modèle.

```
In [6]: ▶ plt.scatter(Y,clf10.predict (X))  
plt.xlabel('Actual')  
plt.ylabel('Predicted')  
plt.title('Actual vs Predicted')  
plt.show()
```

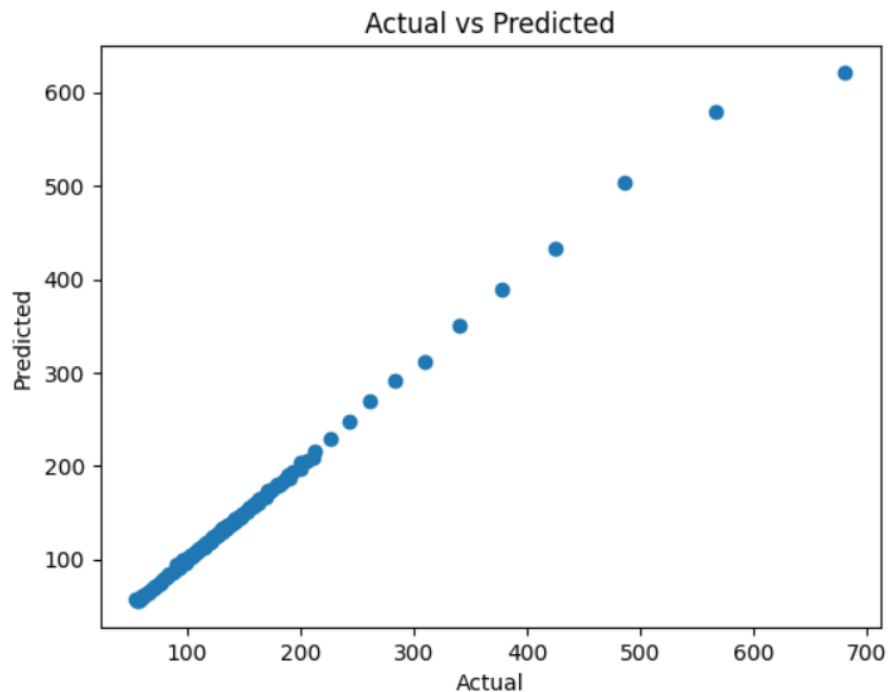


Figure IV.4. Graphique prédit vs réel

IV.7.2. Graphique des résidus:

Ce graphique présente les résidus (différences entre La rupture réelle et la rupture prévue) par rapport aux valeurs prévues. Un modèle performant présente des résidus dispersés aléatoirement autour de zéro (ligne pointillée rouge).

```
In [8]: residuals = Y - clf10.predict(x)
plt.scatter(Y, residuals)
plt.xlabel('Predicted')
plt.ylabel('Residuals')
plt.title('Residual Plot')
plt.axhline(y=0, color='r', linestyle='--')
plt.show()
```

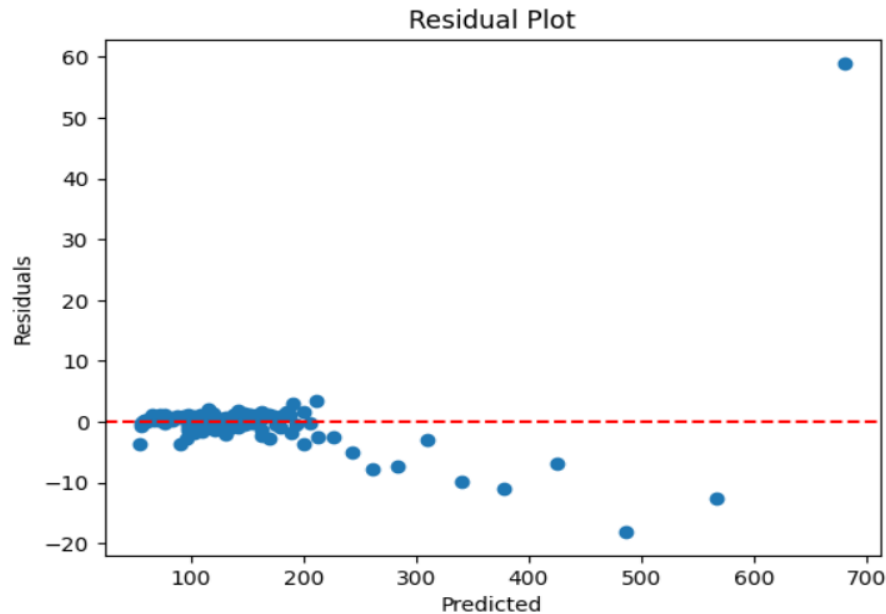


Figure IV.5. Graphique prédit vs réel

IV.7.3. Validation du modèle ANN avec le modèle analytique:

Dans cette partie des comparaisons des résultats du modèle ANN avec le modèle analytique ont été effectués afin de valider le présent modèle basé sur les réseaux de neurones.

Le tableau IV.9 présente une comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement en fonction de l'inclinaison des bandes composites. A travers ces résultats, on peut constater que les résultats du modèle ANN sont en bon accord avec le modèle analytique.

La précision du modèle ANN est encore testé dans le tableau IV.10 en variant l'espacement des bandes composites. Il est clair que les résultats du modèle ANN de la contribution des bandes composites que ce soit à la rupture ou bien au décollement par rupture convergent bien avec le modèle analytique.

La validation du présent modèle est également confirmée en variant le module d'Young des bandes composites dans le tableau IV.11. On peut conclure que la précision du modèle ANN est toujours satisfaisante quel que soit le paramètre varié.

Tableau IV.9. Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement en fonction de l'inclinaison des bandes composites

Modèle de calcul	Inclinaison des bandes FRP β	La contribution des bandes CFRP : T_{FRP} (KN)	
		Rupture des fibres	Décollement par fissuration
Méthode analytique	45	136,26	104,24
Méthode ANN		136.0833	104.8696
Méthode analytique	60	131,62	100,69
Méthode ANN		133.7202	103.1375
Méthode analytique	75	118,00	90,28
Méthode ANN		125.8199	97.3196
Méthode analytique	90	96,35	73,71
Méthode ANN		116.6847	90.6044

Tableau IV.10. Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement en fonction de l'espacement des bandes composite

Modèle de calcul	Espacement des bandes FRP S_{FRP}	La contribution des bandes CFRP : T_{FRP} (KN)	
		Rupture des fibres	Décollement par fissuration
Méthode analytique	30	227,1	173,74
Méthode ANN		230,8035	176.7571
Méthode analytique	40	170,32	130,30
Méthode ANN		171,9931	132.3991
Méthode analytique	50	136,26	104,24
Méthode ANN		136,1076	104.8696
Méthode analytique	60	113,55	86,87
Méthode ANN		114,3198	87.7235

Tableau IV.11. Comparaison des résultats d'une poutre renforcée en cisaillement en fonction de l'espacement des bandes composite

Modèle de calcul	Module d'Young de la bande composite E_{FRP}	La contribution des bandes CFRP : T_{FRP} (KN)	
		Rupture des fibres	Décollement par fissuration
Méthode analytique	200	145,576	93,3275
Méthode ANN		123.5589	98.5636
Méthode analytique	230	167,412	107,327
Méthode ANN		128.9212	101.3875
Méthode analytique	260	189,248	121,326
Méthode ANN		142.5766	107.4166
Méthode analytique	290	211,085	135,325
Méthode ANN		147.6372	109.4955

IV.7.7. Etude paramétrique:

Après la validation du modèle ANN, une étude paramétrique est menée dans cette section à l'aide du modèle développé.

La figure IV.6 présente l'effet de la variation de l'angle d'inclinaison des bandes composites sur leur contribution en cisaillement d'une poutre en béton armé renforcée sur sa partie latérale. L'inclinaison des bandes varie de 45° à 90° . La contribution des bandes composite est évaluée à la rupture et au décollement par fissuration. On peut remarquer que la contribution des bandes composites en cisaillement est plus importante quand l'inclinaison est 45° .

L'effet de la résistance caractéristique du béton sur la contribution au cisaillement des bandes composites est illustré à la figure IV.7. La résistance du béton est considérée variable entre 30 MPa et 60 MPa. Il ressort que cette variation exerce une influence relativement faible sur la contribution au cisaillement.

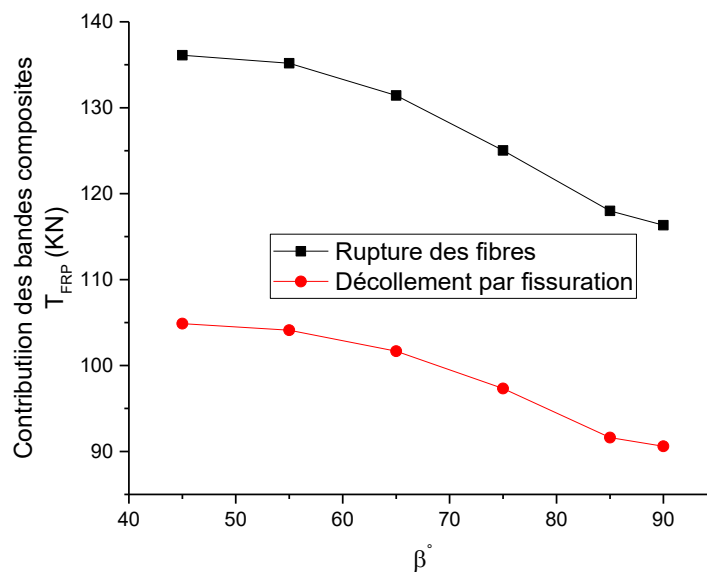


Figure IV.6. Influence de l'inclinaison des bandes composites sur leur contribution au cisaillement

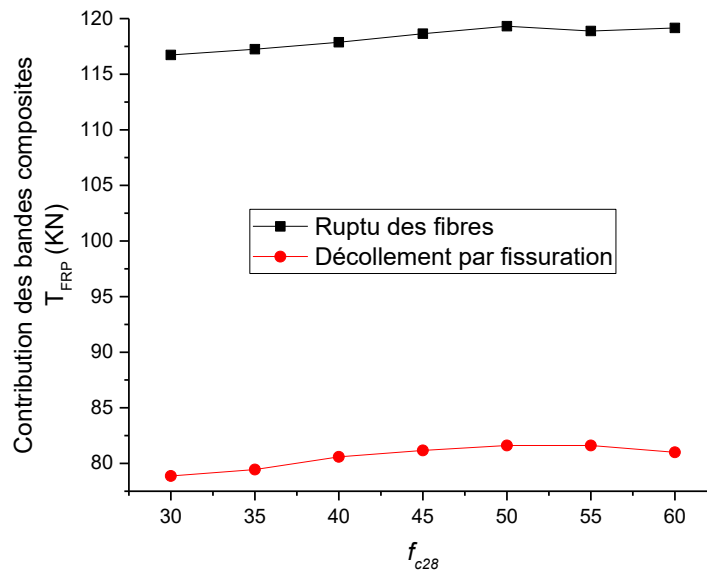


Figure IV.7. Effet de la résistance caractéristique du béton sur la contribution des bandes composites

IV.8. Conclusion:

Dans ce chapitre, un modèle prédictif fondé sur les réseaux de neurones artificiels (RNA) a été développé en vue d'estimer la contribution au cisaillement des bandes composites dans le renforcement des poutres en béton armé. Ce modèle intègre dix (10) paramètres d'entrée et deux (2) paramètres de sortie, et a démontré une excellente capacité de généralisation. Les résultats obtenus montrent une concordance satisfaisante avec les prédictions du modèle analytique, notamment en ce qui concerne les phénomènes de rupture et de décollement, validant ainsi la pertinence de l'approche par intelligence artificielle dans le domaine du génie civil.

Conclusion générale

Conclusion générale:

Face à l'évolution constante des exigences techniques, économiques et environnementales du secteur de la construction, l'optimisation des solutions de renforcement structurel devient une priorité stratégique. Ce mémoire a permis de mettre en lumière l'intérêt croissant pour les matériaux composites, en particulier les polymères renforcés de fibres (FRP), qui offrent une réponse pertinente aux défis posés par les dégradations des structures en béton.

Le présent travail s'est inscrit dans cette dynamique, en s'intéressant à l'intégration de l'intelligence artificielle dans le domaine du génie civil, à travers une étude visant à prédire la contribution des matériaux composites dans le renforcement au cisaillement des poutres. L'approche adoptée repose sur l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA), outils performants de modélisation non linéaire, afin de simuler le comportement des poutres en béton armé renforcées par des bandes composites.

Une première partie du mémoire a été consacrée à l'examen des mécanismes de dégradation structurelle et aux diverses techniques de renforcement, en mettant l'accent sur les matériaux composites et leurs propriétés mécaniques avantageuses. Ensuite, les fondements de l'intelligence artificielle ont été abordés, en particulier l'apprentissage supervisé et les architectures de réseaux de neurones. Enfin, une étude a été menée pour développer et valider un modèle prédictif basé sur les RNA.

Les résultats obtenus confirment la capacité des réseaux de neurones à prédire avec une précision satisfaisante la contribution en cisaillement des bandes composites apposées latéralement sur une poutre en béton armé. Ce modèle validé a également permis de mener une étude paramétrique approfondie, illustrant l'efficacité de cette approche dans l'analyse de l'influence de divers facteurs sur le comportement des structures renforcées.

Ainsi, la combinaison des matériaux avancés et de l'intelligence computationnelle ouvre la voie à une ingénierie plus intelligente, capable non seulement de diagnostiquer avec justesse, mais aussi de prévoir l'efficacité des interventions de renforcement, en vue d'une gestion plus durable et optimisée du patrimoine bâti.

Des travaux futurs pourraient explorer l'intégration d'autres techniques d'apprentissage automatique, comme les forêts aléatoires ou les réseaux neuronaux profonds. L'élargissement de la base de données d'apprentissage et l'application du modèle à d'autres types de structures renforcées constituent également des pistes prometteuses.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- (BAEL, 91) BAEL 91 - Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Édition révisée.
- (Eurocode 2) Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments, EN 1992-1-1, Comité Européen de Normalisation.
- (Torrenti, 2010) Torrenti, J.M., Resplendino, J., Pathologie des structures en béton, Éditions Eyrolles, 2010.
- (Gérard, 2004) Gérard, B., Durabilité des structures en béton armé, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2004.
- (ACI, 2017) ACI 440.2R-17 – Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute, 2017.
- (Dounia, 2020) Dounia, M., & Larbi, B., Techniques de renforcement des structures par matériaux composites, Revue Algérienne de Génie Civil, Vol. 6, n°2, 2020.
- (LNEC, 2012) LNEC (Laboratoire National de Génie Civil, Portugal) – Études expérimentales sur le renforcement des poutres en béton armé avec FRP, 2012.
- (LNEC, 2000) Neale, K.W., FRP Strengthening of Concrete Structures: A Review of Recent Applications in Canada, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 27, 2000.
- (FIB, 2001) Fédération Internationale du Béton (FIB) – Bulletin 14 : Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, 2001.
- (CERIB, 2018) Guide pratique de diagnostic des ouvrages en béton, CERIB (Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton), 2018.
- (Abadi, 2016) Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., ... & Zheng, X. (2016). TensorFlow: A system for large-scale machine learning. 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 16), 265-283.
- (Chollet, 2017) Chollet, F. (2017). *Deep Learning with Python*. Manning Publications.
- (Van, 2011) Van Der Walt, S., Colbert, S. C., & Varoquaux, G. (2011). The NumPy array: A structure for efficient numerical computation. *Computing in Science & Engineering*, 13(2), 22-30.
- (Triantafillou, 1998) Triantafillou, T. C. (1998). Shear strengthening of reinforced concrete beams using Epoxy-bonded FRP composites., *ACI Structural Journal*, 95(2), 107-115.
- (Chen, 2003) Chen, J. F. and Teng, J. G. (2003) .Shear capacity of fiber-reinforced polymer strengthened reinforced concrete beams: fiber reinforced polymer rupture., *Journal of Structural Engineering*, 129(5), 615-625.

Références bibliographiques

- (Carolin, 2008) Carolin, A., and Täljsten, B et Sas, G .A model for predicting shear bearing capacity of FRP strengthened beams., Journal of Composites for Construction, Vol. 44, N°. 3, 2008.

Site d'internet:

<https://www.databricks.com/fr/glossary/tensorflow-guide>

<https://www.anaconda.com/download/>