

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Saad Dahleb de Blida

Faculté des Sciences de l'ingénieur

Département de Génie Civil

Mémoire de Master II

Option : Géotechnique

Titre :

**Application des réseaux de neurones
dans la prévision du comportement des ponts
renforcés par matériaux composites**

Proposé par :

Ministère des Travaux Publics (DIA/MTP)

Présenté par :

M^{elle} Fatma Zohra GHESSAB

Encadré par

Dr Mouloud ABDESSEMED

Directeur Central/MTP

Université Saad Dahleb de Blida
Octobre 2011

REMERCIEMENTS

Je remercie, au premier lieu, le bon Dieu qui m'a offert et préservé une bonne santé et qui m'a entouré de sa bienveillance et sa grâce. Je le remercie également de m'avoir confié à des gens respectueux, responsables et scientifiques durant cette année de mémoire.

Si ce travail a pu être mené à bien, c'est grâce à l'aide précieuse de mon encadreur Dr Mouloud Abdessemed, Directeur des Infrastructures Aéroportuaires au Ministère des Travaux Publics, à qui je voudrais exprimer ma plus profonde reconnaissance pour son encadrement et ses conseils scientifiques tout au long de ce travail.

J'adresse également mes remerciements aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Je voudrais exprimer ma gratitude à Mr Rachid Boukhetala, Directeur des Infrastructures à l'organisme CTTP, pour m'avoir orienté et fourni les fiches techniques des ponts.

Je suis reconnaissante au Pr Abed de m'avoir donné beaucoup d'éclaircissements et consignes dans le domaine des réseaux de neurones.

Je tiens à remercier Dr Bakhta Boukhatem de son aide précieuse dans la programmation par les réseaux de neurones.

Je n'oublie pas de remercier Mme Amina Chentir, Professeur en électronique qui m'a fourni l'aide dont j'avais besoin.

Je tiens à exprimer mes remerciements à tous les enseignants qui ont accepté d'apporter aide par conseils et prestation des documents et références bibliographiques, et en particulier mes professeurs de l'université de Blida, ainsi que Dr Ratiba Kettab, chef de département de génie civil à l'école polytechnique d'Alger, Mme Debbich, enseignante à l'école, et aussi aux cadres de la Direction des Infrastructures Aéroportuaires au Ministère des Travaux Publics.

Dédicace

Aux êtres les plus chers, à ceux qui m'ont munie d'une force morale dure comme fer qui a fait jaillir en moi des ambitions vives comme éclair, je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère qui m'a accompagnée durant ce long parcours. Celle a qui je souhaite une longue vie pleine de joie et de prospérité.

A mon père qui n'a jamais cessé de m'encourager et de se sacrifier pour que je puisse franchir tout obstacle durant toutes mes années d'études.

A mon frère Abdellah et mes sœurs Nassima et Nadjah pour leurs grandes envergures qui m'ont porté sans rupture suivant la trajectoire de la lueur d'espoir jusqu'à mon arrivé à l'îlot de la gloire.

A ma sœur Sihem, son mari et ses deux enfants Maroua et Mahdi qui même étant très éloignés leur présence était toujours côtoyée et leur souvenir n'a jamais été oublié.

A mon fiancé Chahir et à ma belle famille et particulièrement à Ouarda dont ses conseils émettent dans mon ciel des étincelles éternelles et me portent un éclairci spirituel.

FATMA ZOHRA

ملخص

تعرض هذه الدراسة, أولاً, المواد المركبة و مزاياها في تعزيز هياكل الجسور. ومن ثم, السلوك الديناميكي, بتوقع قيم فترة إهتزاز عدد من الجسور (قاعدة بيانات) الواقعة في منطقة معتدلة إلى كثيرة النشاط الزلزالي قبل وبعد تقوية, دعائمها (الركائز), بواسطة تغليفها بالمواد المركبة من ألياف الكربون باستعمال الشبكات العصبية. عن طريق الإختيار الأنسب للهندسة و عملية تعلم الشبكة المستخدمة, تحصلنا على القيم التقديرية لفترة اهتزاز كل جسر, قبل و بعد التعزيز.

النتائج المتحصل عليها بواسطة هذه الطريقة تمثل فارقا صغيرا مقارنة مع النتائج التجريبية و الرقمية (طريقة العناصر المنتهية).

Résumé

Cette étude présente, tout d'abord les matériaux composites et leurs avantages dans le renforcement des structures de ponts. Ensuite, l'étude du comportement dynamique, par la prévision des valeurs des périodes propres d'un certain nombre d'ouvrages (bases de données) se situant dans une zone de moyenne à forte sismicité, avant et après leur renforcement par composites collés à base de fibres de carbone en confinant les futs des piles (appuis intermédiaires).

En utilisant les réseaux de neurones, par un choix approprié de l'architecture et du processus d'apprentissage du réseau utilisé, on a obtenu les valeurs estimées de la période de vibration de chaque pont, avant et après son renforcement. Les résultats trouvés par cette méthode présentent une erreur réduite par rapport aux résultats expérimentaux et numériques (méthode des éléments finis).

Abstract

This study presents, first of all the composite materials and their advantages in the reinforced of the structures of bridges. Then, the study of the dynamic behavior, by the prediction of the values of the clean periods of a certain number of bridges (data bases) located in a zone of average to strong seismicity, before and after repair, of their intermediate supports (batteries) with confinement by these materials to basis of carbon fibers. While using the neurons network, by a choice appropriated of the architecture and the process of training of the network used, we found the values estimated of the period of vibration of each bridge, before and after its repair.

The results found by using this method present a reduced error compared with the experimental and numerical results.

Sommaire

Introduction générale.....	01
-----------------------------------	-----------

Chapitre I	Synthèse bibliographique
-------------------	---------------------------------

I-1 Patrimoine Algérien des ouvrages d'art	03
I-1-1 Répartition des ouvrages d'art en Algérie.....	03
I-1-2 Etat physique des ponts en Algérie	04
I-2 Pathologie des ponts.....	05
I-2-1 Causes liées aux erreurs de conception et de calcul.....	05
I-2-2 Causes liées aux projets d'exécution et de réalisation.....	05
I-2-3 Causes liées aux actions sollicitant les ponts.....	06
I-2-4 Causes liées aux dégradations des matériaux.....	08
I-3 Diagnostic des pathologies	10
I-3-1 Objectifs du diagnostic	10
I-3-2 Examen visuel ou morphologique.....	11
I-3-3 Mesures in –situ.....	11
I-3-4 L'analyse technique des éléments recueillis	15
I-3-5 La formulation de conclusions et de recommandations	15
I-4 Techniques de renforcement des ponts en béton.....	16
I-4-1 Traitements de surfaces	16
I-4-2 La protection du béton et des armatures	18
I-4-3 Régénération des matériaux.....	19
I-4-4 L'ajout de forces (ou de déformations).....	20
I-4-5 Ajout de matière.....	20
I-5 Matériaux composites.....	22
I-5-1 Définition et identification.....	22
I-5-2 Classification des matériaux composites	23
I-5-3 Architectures de renforcement.....	24
I-5-4 Différents types de matériaux composites.....	26
I-5-4 Matériaux composites à base de fibres de carbone.....	27
I-5-4-1 Propriétés des fibres de carbone.....	27
I-6 Confinement des colonnes par les matériaux composites	28
I-7 Exemples d'application des matériaux composites dans le renforcement des ponts.....	31
I-8 Conclusion.....	39

II-1 Préambule	40
II-2 Principe de la méthode	40
II-2-1 Le neurone biologique.....	41
II-2-2 Neurone formel.....	41
II-3 Architecture des réseaux de neurones.....	42
II-3-1 Les réseaux de neurones non bouclés	43
II-3-2 Les réseaux de neurones bouclés	44
II-4 Apprentissage des réseaux de neurones	45
II-4-1 Type d'apprentissage.....	46
II-4-2 Algorithme d'apprentissage.....	47
II-5 Conception d'un réseau de neurones	48
II-5-1 Détermination des entrées/sorties du réseau de neurones.....	48
II-5-2 Choix et préparation des échantillons	48
II-5-3 Elaboration de la structure du réseau.....	48
II-5-4 Elaboration de la structure du réseau	49
II-5-5 Apprentissage	50
II-5-6 Validation et Tests	50
II- 6 Application des réseaux de neurones en génie civil.....	51
II-6-1 Application des réseaux de neurones en géotechnique.....	51
II- 6-2 Application des réseaux de neurones en technologie des bétons et matériaux.....	52
II-6-3 Prédiction du comportement des structures par les réseaux de neurones	52
II-7 Exemple d'application des réseaux de neurones.....	53
II-8 Conclusion	55

III-1 Préambule.....	56
III-2 Problématique.....	56
III-4 Elaboration de la base des données.....	58
III-4-1 Avant renforcement.....	59
III-4-1-1 Calcul de la masse totale de la structure (M)	59
III-4-1-2 Calcul de la raideur totale de la structure.....	62

III-4-1-3 Calcul de la période propre T	63
III-4-2 Après renforcement.....	63
III-4-2-1 Calcul de la masse totale de la structure.....	63
III-4-2-2 Calcul de la raideur totale de la structure.....	64
III-5 Résultats de calcul de M et K.....	65
III-6 Application des réseaux de neurones.....	66
III-6-1 Choix du réseau.....	66
III-6-2 Méthodologie.....	67
III-6-3 Architecture du réseau RPG.....	68
III-6-4 Langage de programmation.....	69
III-6-5 Apprentissage et test du réseau RPG.....	70

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV-1 Présentation des résultats	74
IV.1-1 Principe	74
IV.1.2 Mise en œuvre des réseaux de neurones	74
IV.1.3 Résultats trouvés	77
IV.1.3.1 Avant renforcement	77
IV.1.3.2 Après renforcement	79
IV.2 Comparaison avec résultats numériques.....	82
IV.2.1 Cas d'étude.....	82
IV.2.2 Validation des résultats	84
IV.2.3 Autre exemple	87

Conclusion générale et recommandations

92

Liste des références bibliographiques	93
---	----

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Pourcentage des ponts dans les zones sismiques.....	04
Figure I-2 : Etat récapitulatif des ouvrages d'art en Algérie en nombre.....	04
Figure I-3 : Etat récapitulatif des ouvrages d'art en Algérie en(%)......	04
Figure I-4: Affouillement des rivières sur les ponts.....	07
Figure I-5 : Rupture d'une colonne lors d'un séisme Taiwan, 21/9/1999.....	07
Figure I-6 : Rupture des piles par cisaillement.....	07
Figure I-7 : Choc sur une pile.....	08
Figure I-8 : Ecaillage du béton d'une corniche.....	08
Figure I-9: Eclatement du béton d'une poutre.....	09
Figure I-10 : Fissuration du béton.....	09
Figure I-11 : Désordres dus à l'alcali-réaction sur un pont.....	09
Figure I-12: Corrosion des armatures.....	10
Figure I-13 : Processus d'analyse des structures de béton.....	11
Figure I-14: Le scléromètre.....	12
Figure I-15: Appareil d'auscultation par ultrasons.....	12
Figure I-16: Le pachomètre.....	13
Figure I-17: Le profomètre.....	13
Figure I-18: Le corrosimètre.....	13
Figure I-19: Le fissuromètre.....	14
Figure I-20: L'extensomètre.....	14
Figure I-21: L'hygromètre.....	15
Figure I-22 : Injection de fissures au pont de Châlons-en-Champagne.....	17
Figure I-23 : Calfeutrement de fissures à l'aide d'un mortier.....	17
Figure I- 24: Calfeutrement d'une fissure à l'aide d'un mastic.....	17
Figure I- 25: Pontage d'une fissure avec incorporation d'une armature.....	18
Figure I-26 : Technique de chemisage avec protection des armatures.....	21
Figure I-27: Renforcement d'une poutre au moyen du béton projeté.....	21
Figure I-28 : Renforcement d'un élément par de la tôle collée.....	21
Figure I- 29: Renforcement par tôle d'acier et lamelles de carbone.....	22
Figure I-30 : Constitution des matériaux composites.....	22
Figure I-31 : Fibres parallèles.....	24
Figure I- 32: Fibres coupées et broyées.....	25
Figure I-33 : Fibres orientées.....	25
Figure I-34 : Tissu de fibres de carbone.....	27
Figure I-35 : Comparaison entre les aciers et les matériaux composites.....	27
Figure I- 36: Enchemisement avec CFRP préfabriqué (gauche) et in-situ (droite).	29
Figure I-37 : Enveloppement total de la pile.....	29
Figure I- 38: Colonne partiellement enveloppée par CFRP.....	29
Figure I-39 : Courbe (contrainte- déformation) idéalisée pour un béton confiné par CFRP.....	30
Figure I- 40: Essais de compression sur des colonnes confinées.....	30
Figure I-41 : Rupture d'une colonne carrée avec confinement en carbone.....	30
Figure I-42 : Rupture de colonnes renforcées par des confinements en fibres d'aramide et de carbone.....	30
Figure I-43 : Essais de flexion sur des colonnes renforcées par des tissus de CFRP.....	31

Figure I-44 : Essais d'effort tranchant sur des colonnes en béton avec ou sans renforcements par des tissus en CFRP.....	31
Figure I- 45: Renforcement des piles de pont (Sakawa River au Japon).....	31
Figure I- 46: Enceinte d'isolation pour Polymérisation de la matrice.....	32
Figure I-47: Installation des premiers composites FRP ‘‘Australiens’’ pour test sur un pont.....	32
Figure I-48: Inspection du comportement du tablier du pont renforcé.....	33
Figure I-49: Pont blanc d'El Harrach (Alger) avec dégradation au niveau de la pile.....	33
Figure I-50 : Pose de tissu en fibres de carbone sur les poutres du tablier.....	35
Figure I-51 : Vue des dégradations apparentes sur la pile.....	36
Figure I-52 : Echafaudage des appuis du pont.....	36
Figure I- 53: Eléments en béton très détériorés avec aciers corrodés.....	37
Figure I- 54: Applications des fibres de carbone CFRP sur les poutres du pont.....	38
Figure I-55: Pile du pont après sa réparation.....	38
Figure I-56 : Application des CFRP sur le pont.....	38

Chapitre II Les réseaux de neurone en génie civil

Figure II-1 : Neurone biologique.....	41
Figure II-2 : Passage du neurone biologique au neurone formel.	41
Figure II-3 : structure typique du réseau de neurones.....	42
Figure II-4 : Réseau de neurones à n entrées, une couche de N_c neurones cachés et N_0 neurones de sortie.....	43
Figure II-5 : Réseau de neurone bouclé.....	44
Figure II-6 : Erreur moyenne sur la base d'apprentissage en fonction du nombre d'itérations.....	45
Figure II-7 : Phénomène de sur-apprentissage.....	46
Figure II-8 : Organigramme de conception d'un réseau de neurones.....	51
Figure II-9 : sections des poutres en T formant le tablier du pont.....	53
Figure II-10 : Variation de l'erreur en fonction des éléments traités dans chaque couche cachée.....	54
Figure II-11 : Architecture du réseau adoptée.....	54
Figure II-12 : Variation de l'erreur en fonction du nombre d'itération.....	55

Chapitre III Prévion du comportement des ponts par les réseaux de neurones

Figure III-1 : Coupe longitudinale d'un pont.....	59
Figure III- 2 : Coupe transversale d'un pont.....	59
Figure III-3 : Vue en plan d'une structure de pont.....	60
Figure III-4 : Dimensions du fut et du chevêtre.....	61
Figure III-5 : Architecture adoptée pour le 1 ^{er} cas.....	66
Figure III-6: Architecture adoptée pour le 2eme cas.....	66
Figure III- 7: Méthodologie de développement du réseau de RPG.....	67
Figure III-8 : Graphe caractéristiques de la fonction tansig.....	68
Figure III-9 : Interface du Matlab 7.10.....	70

Chapitre IV Résultats et discussions

Figure IV.1 : Courbe de performances avant renforcement des ponts.....	77
--	----

Figure IV.2 : Corrélation entre périodes mesurées et prédites par le modèle RNA	78
Figure IV.3 : Variation de paramètres durant la formation du réseau par RNA.....	79
Figure IV.4 : Courbes de performances par RNA après renforcement des ponts	80
Figure IV.5 : Variation de paramètres dans la formation du réseau après renforcement ...	81
Figure IV-6 : Corrélation entre périodes mesurées et prédites par le modèle RNA.....	82
Figure IV.7 : Vue en plan de l'ouvrage sur oued oumazer à cherchell.....	83
Figure IV.8 : Modèles des six premiers modes propres	84
Figure IV-9 : Comparaison des fréquences des trois simulations avant renforcement.....	86
Figure IV-10 Comparaison des fréquences des trois simulations après renforcement.....	86
Figure IV-11 Comparaison des fréquences avant et après renforcement.....	87
Figure IV-12: Vue d'ensemble du "Pont 2028 sur RN 52"	88
Figure IV-13 : Premiers modes de vibration de l'ouvrage testé.....	89
Figure IV-14 Comparaison des fréquences des trois simulations avant renforcement.....	90
Figure IV-15 Comparaison des fréquences des trois simulations avant renforcement.....	91
Figure IV-16 Comparaison des fréquences avant et après renforcement.....	91

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Répartition des ponts par wilaya.....	3
Tableau I-2 : Performances comparées des différents types d'architecture.....	25
Tableau I.3 : Comparaison entre les différents types de fibres existants.....	26
Tableau I- 4: Avantages et inconvénients des CFRP.....	28
Tableau III-1 : Exemple de fiche technique.....	58
Tableau III- 2: Résultats de calcul de M, K et T avant et après renforcement.....	62
Tableau III- 3 : Architecture et paramètres du RN adopté.....	69
Tableau VI.1: Valeurs de la masse M et les rigidités K de l'ouvrage et les périodes propres.....	80
Tableau IV.2: Comparaison fréquences entre model FE et expérimental.....	80
Tableau IV.3: Comparaison des fréquences entre model expérimental, FE et RNA.....	81
Tableau IV.3: Fréquences expérimentales avant et après renforcement.....	82
Tableau IV.4: Comparaison des fréquences entre model expérimental, FE et RNA.....	82

Introduction Générale

Introduction générale

L'Algérie dispose de plus de 11000 ouvrages d'art, dont 55% routiers avec 40% qui se trouvent dans un état vétuste et présentent une résistance inadéquate qui pourrait, dans certains cas, mettre en péril la sécurité de leurs usagers.

En effet, à cause de nombreux désordres apparents (erreurs de calcul, anomalies d'exécution, chargement excessifs ou répétés et conditions environnementales agressives). Ces structures atteindront d'ici peu leur durée de vie utile, d'où la nécessité de trouver des solutions alternatives, pour les réhabiliter efficacement et leur redonner leur portance initiale.

A ce titre, un amalgame de techniques de réparation et/ou de réhabilitation en insérant des matériaux additifs et en simulant leur comportement qui contribue dans leur sauvegarde.

Le projet entrepris dans ce mémoire servira d'illustration et exposera l'application des réseaux de neurones dans la prédiction du comportement des ponts renforcés par matériaux composites collés. On voudrait, par ce travail, explorer, développer et exploiter les tous derniers produits de la technologie, qui a besoin de matériaux qui allient à la fois une rigidité, une ténacité élevée et une grande légèreté. Il s'avère qu'aucun matériau simple ne permet de combiner toutes ces caractéristiques physiques et pour atteindre cet objectif, il faut nécessairement utiliser des matériaux innovants tels que les matériaux composites à base de fibres de carbone (CFRP).

En effet, durant ces dernières années, l'utilisation des matériaux composites en génie civil a connu une évolution considérable. Ces nouveaux matériaux trouvent de plus en plus d'applications dans la réparation et le renforcement des structures vétustes et anciennes.

Plusieurs recherches ont été établies pour étudier le comportement des ponts renforcés par collage de matériaux composites, en utilisant des modèles analytiques et numériques, notamment, la méthode des éléments finis. Cependant, l'écart observé dans la simulation par cette dernière laisse penser à appliquer d'autres méthodes plus sophistiquées telles que l'intelligence artificielle.

Les réseaux de neurones qui font partie de l'intelligence artificielle sont des modèles de calcul très robustes et tolérants bruitées ou même incomplètes. Ils simulent très étroitement le système nerveux biologique, ce sont des modèles de calcul parallèles pour la représentation et le traitement de

l'information, du fait de leur grande similitude avec le cerveau, les réseaux de neurones ont des capacités semblables à celle de l'être humain et notamment ; l'apprentissage, la classification et la simulation ou prédiction. [1]

Néanmoins, malgré que ces caractéristiques ont fait des réseaux de neurones un bon candidat pour une large variété d'applications en génie civil, leur utilisation dans l'étude des comportements des ponts réparés reste peu, voire rare.

L'objectif que nous nous sommes fixé à concrétiser à travers ce travail est de participer à la prédiction du comportement des ponts renforcés par les matériaux composites, en utilisant les réseaux de neurones.

Après une introduction générale, le premier chapitre donne une idée générale sur le patrimoine des ouvrages d'art en Algérie, il porte sur l'étude et l'interprétation des statistiques de ponts selon leur nombre, leur distribution selon le zonage sismique, âge et notamment leur état (bon, moyen, mauvais ou inconnu). Dans le même chapitre, on présente une synthèse bibliographique relative à l'étude des matériaux composites, leur historique, leur introduction dans le domaine de la construction, ainsi que les principaux avantages qu'ils présentent.

Le deuxième chapitre portera à bien comprendre l'utilité des réseaux de neurones en génie civil D'autre part en exposant les différentes recherches faites précédemment sur l'application de cette méthode dans la technologie des structures et constructions, en géotechnique, et notamment leur application en technologie des bétons et matériaux.

L'application des réseaux de neurones pour la prédiction du comportement des ponts fera l'objet du troisième chapitre. On présente alors, le modèle adopté par le logiciel Matlab pour simuler le comportement des ponts renforcés par le collage des matériaux composites et pour constater l'effet de ces matériaux dans le renforcement des ponts vétustes.

Pour mieux apprécier la validité de ces modèles, nous consacrons le dernier chapitre aux interprétations des résultats obtenus avec discussion et commentaires, en faisant une confrontation avec les résultats déjà obtenus par la modélisation numérique.

Enfin, une conclusion générale et des recommandations afin de répondre à la problématique posée avec des perspectives pour les futurs travaux.

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I-1 Patrimoine Algérien des ouvrages d'art

Un pays aussi vaste comme l'Algérie, disposant d'un nombre considérable d'équipements routiers (routes, autoroutes, voies express, pénétrantes, ouvrages d'art, tunnels) fait des ponts un puissant facteur de développement économique, politique et social. De plus de telles infrastructures de base, du fait de leur hauteur, permettent le franchissement d'obstacles naturels (oueds) ou artificiels (routes, voies ferroviaires...etc.), et garantissent ainsi la cohérence du réseau routier national, en réalisant la jonction des voies de circulation.

Afin de donner une image globale du patrimoine Algérien des ouvrages d'art, on exposera les dernières statistiques connues, en précisant le nombre total d'ouvrages présents sur le territoire national, leur répartition ainsi que leur état physique.

I-1-1 Répartition des ouvrages d'art en Algérie

Les ponts en béton armé constituent une partie importante du patrimoine Algérien des ouvrages d'art. Le tableau ci après illustre la répartition des ponts par wilaya.

Tableau I.1 : Répartition des ponts par wilaya [2].

Wilaya	Nombre	Wilaya	Nombre	Wilaya	Nombre
Adrar	3	Djelfa	126	Illizi	0
Chlef	107	Jijel	59	B.Bouariridj	84
Laghouat	27	Setif	235	Boumerdes	108
O.Bouaghi	83	Saida	50	El taraf	39
Batna	178	Skikda	96	Tindouf	1
Bedjaia	107	S.bel abbes	74	Tissemsilt	52
Biskra	113	Annaba	60	El Oued	8
Bechar	25	Guelma	95	Khenchla	35
Blida	104	Constantine	109	Souk Ahras	39
Bouira	104	Medea	106	Tipaza	53
Tamanrasset	2	Mostaganem	60	Mila	104
Tebessa	56	M'sila	231	Ain defla	123
Tlemcen	144	Mascara	121	Naama	19
Tiaret	53	Ouargla	1	A.Temouchent	68
Tizi-ouzou	140	Oran	56	Ghardaia	9
Alger	229	El bayadh	29	Relizane	71

Le tableau ci avant montre que les wilayas (Chlef, Batna, Bejaïa, Biskra, Blida, Bouira, Tlemcen, Tizi-Ouzou, Alger, Sétif, M'Sila, Mascara, Boumerdes, Mila, Ain Defla), se trouvant dans la partie du nord Algérien, disposent à elles seules un total de 2008 ponts, soit taux très élevé se situant dans les zones sismiques [3]. Ce nombre, de 53% d'ouvrages susceptibles à se détériorer en cas de séismes majeurs (Figure I-1). Aussi, on remarque que ce taux est de 48% dans la zone II connue par une moyenne sismicité, 17% dans la zone III de forte sismicité et 30% en zones I ou 0.

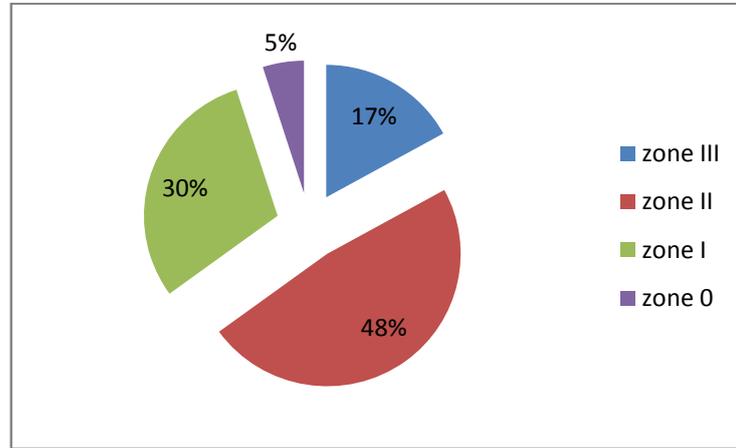


Figure I-1 : Pourcentage des ponts dans les zones sismiques.

I-1-2 Etat physique des ponts en Algérie

Concernant la vétusté des ouvrages, on remarque aussi que ce recensement montre que 50% des ponts dépassent les 40 ans de service (Figure I-2), ce qui représente une consommation de presque 50% de vie (durée de vie d'un pont est estimée entre 70 et 100 ans), et par conséquent, nécessitant une maintenance et surveillance permanente pour les sauvegarder. Pour l'état physique des ponts existant, nous constatons que 1305 des ponts sont dans un état de dégradation avancée. En effet, d'après la figure I-3, le pourcentage global des ouvrages qui se trouvent dans un mauvais ou moyen état est d'environ 50%.

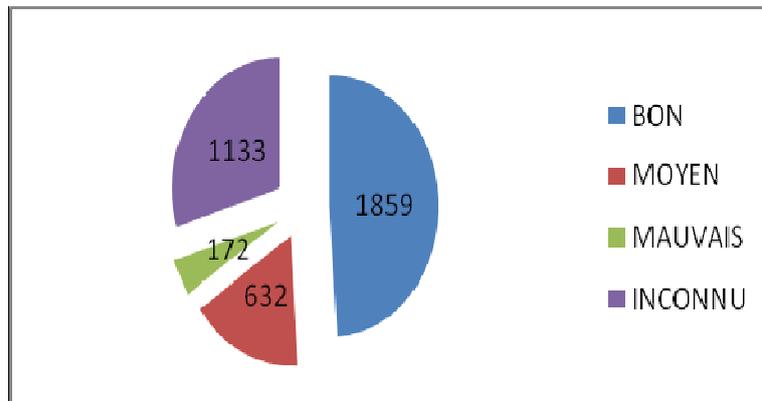


Figure I-2 : Etat récapitulatif des ouvrages d'art en Algérie en nombre.

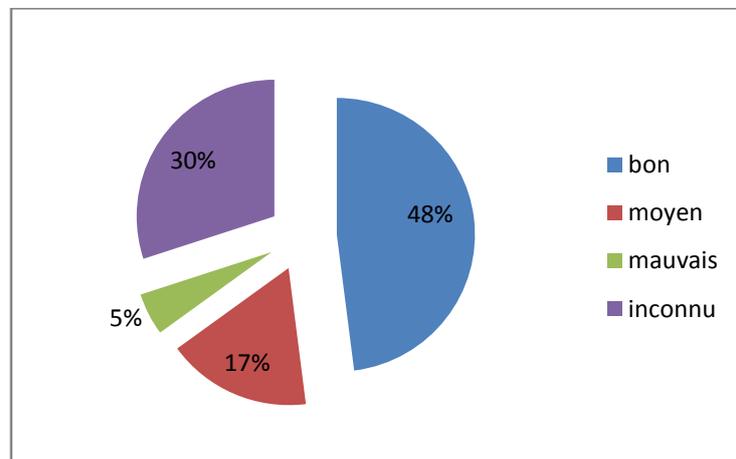


Figure I-3 : Etat récapitulatif des ouvrages d'art en Algérie en(%).

I-2 Pathologie des ponts

La présence de dégradations, de détériorations locales ou générales, de déformations ou de fissurations inhabituelles est souvent le signe visible de la pathologie. Cependant, certains ouvrages peuvent être endommagés bien avant l'apparition de signes évidents (cas des bétons attaqués par alcali réaction) [4]. L'étude du comportement pathologique de ces ouvrages, met en évidence des endommagements de matériaux et de structures dus à des erreurs de conception, à des modifications de conditions d'exploitation, au vieillissement des matériaux dont elles sont détaillées par la suite.

I-2-1 Causes liées aux erreurs de conception et de calcul

a. Conception

- Erreurs dans le bon choix du matériau constituant l'ouvrage (nuances et qualité des aciers) ;
- Structure instable ;
- Erreurs dans le pré dimensionnement ;
- Négligence totale de la sismicité de la zone ;
- Le non respect des règles de l'art ;
- Adoption d'un type d'ouvrage inadéquat en égard du sol de fondation ou la nature de l'obstacle à franchir.

b. Calcul

- Erreurs dans les hypothèses de calcul ;
- Erreurs dans l'introduction des données dans un calcul automatique ;
- Non vérification des états limites de services (déformation) ;
- Mauvaise utilisation des règlements ;
- Dessins incomplets ou insuffisants, et/ou non conforme à la note de calcul.

I-2-2 Causes liées aux projets d'exécution et de réalisation

I-2-2-1 Insuffisance des documents d'exécution

- Non respect des documents contractuels ;
- Les dessins sont incomplets,
- Insuffisance de vérification des plans par le maître de l'ouvrage ou le bureau de contrôle;
- La négligence de certains documents d'exécution qui ne fournissent pas d'indications suffisamment précises.

I-2-2-2 Déficiences dans l'organisation ou le contrôle de la qualité

a) Béton

La qualité du béton prévu au projet (résistance à la compression, maniabilité), peut être compromise sur site:

- Choix du lieu de stockage du ciment ainsi que la manière de la stocker ;
- Non respect des phases de bétonnage prévues par le bureau d'études ;
- Mauvaise mise en œuvre du béton surtout le béton précontraint;

- Absence ou insuffisance de cure humide;
 - Utilisation inopportune d'adjuvants ;
 - Irrégularité de la fabrication des bétons sur chantier ;
 - Délai de transport aléatoire.
- b) Armatures
- Changement intempestif de la nuance d'acier ;
 - Le non respect des rayons de courbures ;
 - Soudure d'aciers non soudables, pliage et dépliage d'armatures à haute adhérence ;
 - Défauts de positionnement des armatures, et manque de couture en cas de reprise de bétonnage ;
 - Ferrailage non conforme aux plans, et faux manœuvres (oublis de certains aciers importants).
- c) Cintres et coffrages
- Tassement des cintres ;
 - Coffrages et cintres insuffisamment rigides et mal étayés ;
 - Joints de panneau défectueux.

I-2-3 Causes liées aux actions sollicitant les ponts

I-2-3-1 Actions permanentes

- Rechargement abusif de la chaussée ;
- Erreurs de métré portant sur le poids de certaines pièces ;
- Sous estimation du poids des équipements des ouvrages.

I-2-3-2 Actions liées au comportement rhéologique des matériaux

- Evaluation insuffisante du comportement des matériaux utilisés dans le temps sous effet des contraintes et des déformations ;
- Estimation insuffisante ou erronée des phénomènes liés au comportement dans le temps des matériaux.

I-2-3-3 Actions dues au trafic

- Circulation d'engins de terrassement sur un tablier dont le béton était encore jeune ;
- Les effets répétitifs sur les ponts (phénomène de fatigue) ;
- L'amplification des effets statiques qui engendre la fissuration des dalles de béton armé ;
- Chocs lors du passage du train sur des rails interrompu engendrant une déconsolidation des assemblages rivés ;
- Effet de souffle provoqué par le train à grande vitesse sur les équipements placés en bordure de voie.

I-2-3-4 Actions climatiques

Les principales actions climatiques affectant les ponts sont la température, le vent et la neige pour les ouvrages couverts en site montagneux. La température élevée, peut causer la fissuration des bétons en raison du retrait de dessiccation. La température engendre dans les structures hyperstatiques, des efforts qu'on doit prendre en compte dans les combinaisons d'action. En ce qui concerne le vent, son action sur les structures se manifeste par de nombreuses manières. Cela

va de l'effet de dessiccation du béton frais en surface à la pression dynamique appliquée aux structures et à leurs mises en mouvement éventuelle, pouvant provoquer des phénomènes de flottement, et peut engendrer des phénomènes de fatigue dans les câbles, aboutissant à des ruptures.

I-2-3-5 Actions à caractère accidentel

a) Action mécanique de l'eau

L'affouillement des rivières autour des piles fut la principale cause de destruction des ponts, maintenant l'utilisation des fondations profondes, à diminuer l'action de l'eau sur les ouvrages.



Figure I-4: Affouillement des rivières sur les ponts.

b) Séismes

Lorsque l'accélération au sol dépasse 0.03g. L'action de séisme pouvant devenir dramatique. Les effondrements les plus spectaculaires ont été observés dans le cas de structures peu hyperstatiques comportant des éléments de ductilité insuffisante, liée le plus souvent à une insuffisance d'armatures transversales et/ou à un excès d'armatures longitudinales mal maintenues dans les zones sollicitées au-delà du domaine élastique. [5]



Figure I-5 : Rupture d'une colonne lors d'un séisme Taiwan, 21/9/1999. [6]



Figure I-6 : Rupture des piles par cisaillement

c) Chocs de navires et de bateaux

Les chocs de navires contre des piles de pont sont des événements moins rares qu'on ne le pense généralement, dans le monde. La fréquence d'accidents aux conséquences catastrophiques avec pertes de vies humaines (200 à 300 personnes ont trouvées mortes de ce genre de circonstance entre 1960 et 1983) avec d'importants dégâts affectant les ouvrages, est de l'ordre de 1.5 pont/an.

Chocs de véhicules routiers et ferroviaires

Les chocs de véhicules sur les piles de ponts sont des accidents relativement fréquents. Les chocs sur tabliers sont moins fréquents, mais beaucoup plus dangereux dans le cas des passerelles. Du fait de leur légèreté, ou même dans le cas de tabliers de ponts peu robustes.

Les détériorations vont de simples épaufrures à de véritables fractures selon la nature et les dimensions de la marchandise transportée.



Figure I-7 : Choc sur une pile.

d) Incendie

L'action du feu sur les ponts présente une probabilité comparable à celle des chocs de véhicules.

I-2-4 Causes liées aux dégradations des matériaux

I-2-4-1 Altération du béton

Le béton subit de nombreuses agressions physiques, physicochimiques et chimiques dont l'intensité est liée à la cinétique de pénétration de l'eau et de gaz dans le système capillaire. Ses qualités s'altèrent lorsque les agents extérieurs réagissent avec les hydrates du ciment en formant des composés expansifs ou solubles. Parmi les principales causes de dégradation on cite les types suivants :

- Dégradations d'origine physique ou mécanique (cycles de gel - dégel)



Figure I-8 : Ecaillage du béton d'une corniche.[7]

- Dégradations mécaniques (phénomène d'abrasion et d'érosion) ;



Figure I-9: Eclatement du béton d'une poutre [8].

- Dégradations d'origine physico-chimique (comme le retrait qui engendre la fissuration du béton) ;



Figure I-10 : Fissuration du béton [9].

- Dégradations d'origine chimique (action du dioxyde de carbone, action des ions sulfates et sulfures, actions des chlorures, et la réaction alcali - granulats).



Figure I-11 : Désordres dus à l'alcali-réaction sur un pont. [7]

I-2-4-2 Corrosion de l'acier

La corrosion des aciers du béton armé est généralement due à la carbonatation du béton sous l'action du gaz carbonique, et à l'action de l'oxygène et l'humidité.

La présence d'ions chlorure dans l'environnement cause aussi une détérioration progressive de structure.



Figure I-12: Corrosion des armatures [9].

I-3 Diagnostic des pathologies

I-3-1 Objectifs du diagnostic

Afin de réparer une structure en béton armé, il faut passer par une étape intermédiaire qui est le diagnostic. Ce dernier comme le montre le diagramme ci-dessous est le résultat des investigations effectuées pour se prononcer sur l'état d'une construction et ses conséquences. Il est devenu habituel de désigner par la même appellation de "diagnostic" la réalisation des examens nécessaires à la formulation de conclusions. [10]

Le déroulement du diagnostic comporte quatre volées : [11]

- Un examen visuel ou morphologique :
 - Une estimation quantitative de la dégradation.
 - Une estimation qualitative de la dégradation.
 - La détermination des problèmes de structure.
- Des mesures in- situ (Appareillages de détection).
- L'analyse technique des mesures et essais, effectuée en laboratoire des éléments recueillis.
- La formulation des conclusions et recommandations.

Il faut cependant souligner que dans le cas général, un diagnostic reste une approximation plus ou moins précise où il est rarement possible d'obtenir un recueil exhaustif des données.

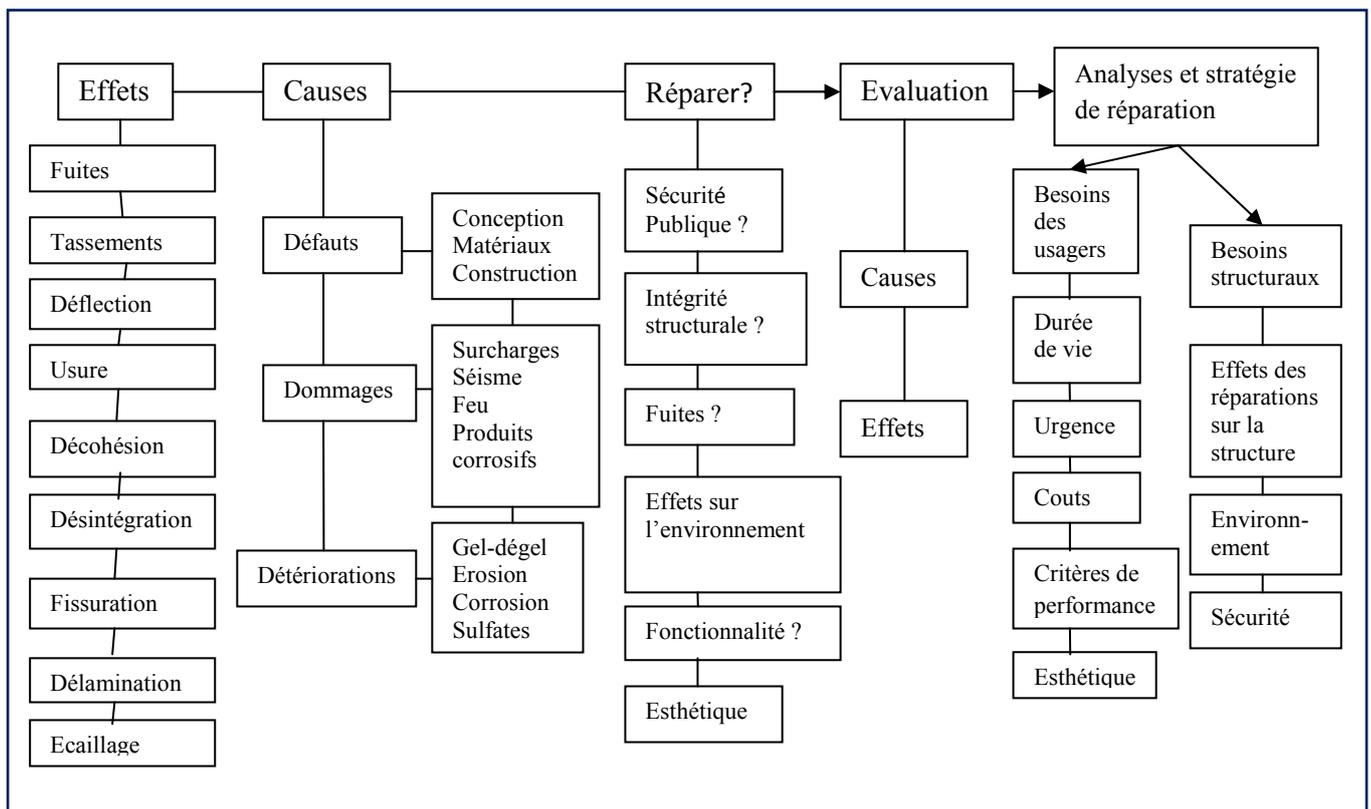


Figure I-13 : Processus d'analyse des structures de béton. [12]

I-3-2 Examen visuel ou morphologique

L'examen visuel est la forme d'investigation la plus simple et la plus économique. Dans un premier temps, il s'agit d'identifier la constitution des places permettant par ailleurs de définir l'éventuel programme d'investigation complémentaire à envisager pour affiner le diagnostic. [11]

Quel que soit leur origine, ces informations doivent être utilisées avec prudence, et surtout pas comme des données de base du diagnostic, elles sont plutôt à considérer comme des éléments de recoupement des constats faits ultérieurement sur place ou comme des sources d'indication sur la manière d'orienter le diagnostic. Ces informations sont obtenues par :

- une prise de photos.
- une identification et localisation des zones fortement sollicitées.
- une observation de zones critiques telles : joints, appuis, etc.
- la localisation des fissures.

I-3-3 Mesures in –situ

La détermination des caractéristiques : un niveau d'existence, de position et de la section des armatures dans le béton, la dureté et la résistance du béton, le degré de corrosion et d'oxydation des armatures. A l'issue d'un tour d'horizon général, on peut déjà conclure sur:

- L'homogénéité de l'état des lieux ou au contraire sur l'existence de plusieurs cas de figure bien distincts. [11]
- La nature et la localisation des manifestations.
- Des désordres vétustes, la non conformité réglementaire, des anomalies de fonctionnement.
- La nature et la localisation des sondages, une auscultation ou des prélèvements à effectuer.

- les points dont l'état apparent est suffisamment explicite pour pouvoir se prononcer d'emblée, sans avoir à envisager d'autres investigations
- L'ouverture des fissures dans le béton.

Les différentes mesures in-situ sont :

a) Le scléromètre :

Cet instrument permet d'estimer la résistance du béton et mesure la dureté superficielle du béton par rebondissement d'une masselotte.

Il est nécessaire de procéder à une quinzaine d'essais sur chaque zone testée pour déduire une valeur moyenne représentative.

Le scléromètre est un instrument particulièrement performant pour préciser l'homogénéité de la résistance du béton aux différents points d'une structure, mais l'information sur le béton reste imprécise par cette méthode. (Figure I-14)



Figure I-14: Le scléromètre.[11]

b) L'auscultation par ultrasons :

Cette méthode permet d'estimer la résistance d'un béton ou de détecter la présence de microfissures internes. C'est une corrélation entre la résistance, la vitesse du son VL, la compression Rc, et le module d'élasticité. (Figure I-15)



Figure I-15: Appareil d'auscultation par ultrasons. [11]

c) Les détecteurs d'armatures :

Ils fonctionnent par effets magnétiques ou électromagnétiques mais la profondeur d'investigation reste limitée à une dizaine de centimètres.

Il y a trois types de détecteurs:

- Le pachomètre :

Il sert à déterminer la position des armatures dans le béton (Figure I-16)



Figure I-16: Le pachomètre. [11]

- Le profomètre :

Utilisé pour la détermination précise de la position et du diamètre des armatures dans le béton. (Figure I-17)



Figure I-17: Le profomètre. [11]

- Le corrosimètre:

Employé dans le but de détecter la corrosion des armatures, d'ouvrages en béton avant l'apparition des dommages visibles, en mesurant le potentiel de surface du béton. (Figure I-18)



Figure I-18: Le corrosimètre. [11]

d) La radiographie :

Ce procédé permet de réaliser des clichés radiographiques du béton , son coût est relativement élevé compte tenu du matériel nécessaire (source radioactive) et surtout des mesures de protection à mettre en place (évacuation du site, périmètre de sécurité , autorisation administrative ..), utilisables pour des éléments dont l'épaisseur ne dépasse pas 60à 80 cm. La gammagraphie fournit des informations multiples et très précises sur les armatures et les défauts internes du béton:

L'analyse de la radiographie obtenue à travers les rayons traversant le béton est interprété comme suit :

- trace claire => corps plus dense que le béton.
- trace noire => présence de vide.

e) Carottage:

Le prélèvement de carotte a comme but de faire des analyses en laboratoire. Ces examens peuvent être demandés en vue de:

- examen pétrographique pour identification des agrégats, détériorations des agrégats, homogénéité du béton, profondeur de carbonations, répartition des fissures.
- analyse chimique
- Essais physico – mécanique : densité, résistance à la compression, module d'élasticité.

f) Détecteur des fissures :

-Fissuromètre

Il permet de suivre l'évolution d'une fissure sur un plan ou dans un angle. (Figure I-19)

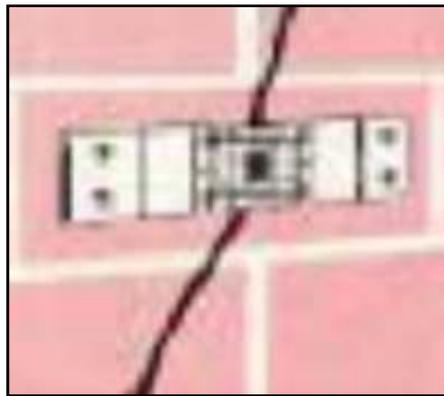


Figure I-19: Le fissuromètre. [11]

-Extensomètre :

Il mesure la déformation linéaire d'un élément de structure. (Figure I-20)



Figure I-20: L'extensomètre. [11]

c) Hygromètre

Pour l'évaluation de l'humidité, en surface et en profondeur, de parois de construction .cet humidimètre permet de mesurer le taux d'humidité en profondeur de façon non destructive par une méthode basée sur la radiofréquence. (Figure I-21)



Figure I-21: L'hygromètre. [11]

I-3-4 L'analyse technique des éléments recueillis

L'analyse des informations et les données collectées, doit permettre d'interpréter les constats effectués en vue de formuler des conclusions. Pour faciliter ce travail, on peut reporter les données de manière à modéliser les phénomènes observés et les constats effectués.

Les modes d'analyse font appel à plusieurs types d'opérations:

a) Le calcul

Il permet notamment de déterminer la capacité portante des structures ainsi que les zones critiques au niveau des éléments structuraux.

b) Le recoupement

C'est la recherche de la cohérence ou au contraire de l'incompatibilité entre les données ou les informations portant sur un même aspect, mais provenant de sources différentes. Cela permet de consolider la validité de certaines hypothèses et d'en écarter d'autres.

c) La comparaison

Il s'agit de repérer les ressemblances et les écarts permettant souvent, d'extrapoler ou d'exclure des résultats de données ou d'informations. Cela permet de hiérarchiser les différentes constatations.

d) L'évaluation

C'est une estimation quantitative ou qualitative elle comporte une part d'approximations par rapport à un calcul scientifique. L'évaluation peut par ailleurs s'appuyer sur des comparaisons, des recoupements ou des calculs.

e) La vérification

L'objectif est de détecter les éventuels écarts par rapport aux exigences des références techniques et réglementaires prises en compte. [11]

I-3-5 La formulation de conclusions et de recommandations

Les conclusions correspondent à des avis argumentés, fondés sur les constats et les analyses effectuées. Il s'agit là d'une véritable prise de position du diagnostic sur l'état de la structure ou des éléments structuraux.

Les recommandations se déduisent des conclusions en les replaçant dans la perspective de la commande du diagnostic.

Les recommandations doivent donc tenir compte des enjeux économiques et de la faisabilité technique des travaux préconisés en matière de :

- Réparation, renforcement des structures.
- Traitement des causes et des effets de désordres constatés lors du diagnostic.

I-4 Techniques de renforcement des ponts en béton

Avant de s'engager dans une réparation ou un renforcement de structures présentant des dégradations de béton ou d'armatures, il est indispensable de procéder à un diagnostic déjà cité précédemment et à la détermination des causes.

Suivant l'importance et les causes des désordres affectant une structure en béton (pont, bâtiment, autres constructions), le projet de réparation et/ou renforcement repose, en général, sur la mise en œuvre d'une combinaison de plusieurs techniques que l'on peut classer dans l'une des cinq catégories suivantes [10] :

- Les traitements de surfaces : ragréages et injection des fissures ;
- La protection du béton et des armatures ;
- La régénération des matériaux ;
- L'ajout de forces (ou de déformations).
- L'ajout de matières.

I-4-1 Traitements de surfaces

Parmi les principaux traitements de surface sont le ragréage et l'injection de fissures.

a- Le ragréage

Cette technique consiste, en premier lieu, à préparer avec soin les surfaces à traiter afin de créer un support sain, rugueux, pour favoriser une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise. Les procédures les plus courantes sont l'hydro-démolition, le décapage par marteau pneumatique, ou dans le cas extrême, au brise-béton. D'autres procédures, telles que le bouchardage, le burinage et le piquage par marteau pneumatique, ainsi que le décapage thermique, le décapage chimique et le rabotage ; qui sont des techniques déconseillées en raison de leur brutalité. Dans le cas de présence des aciers corrodés, il est indispensable de les décaper (par sablage ou grenailage), ensuite de leur conférer une nouvelle protection à l'aide de produits hydrauliques ou de résines organiques, voire, de les remplacer dans les cas extrêmes. Les produits de ragréage peuvent être classés en trois types principaux [10]:

- Produits à base de liants hydrauliques, constitués par un mélange de ciment, sable, de résines miscibles dans l'eau et éventuellement des fibres.
- Les produits à base de résines de synthèse, constitués de sable (dans le cas de mortier), de polymères organiques réactifs additionnés d'adjuvants spécifiques et, éventuellement, des charges minérales. Les produits les plus utilisés sont ceux à bases de résines époxydiques ou polyuréthanes;
- Les produits mixtes, qui sont des produits à base de ciment et de polymères organiques réactifs.

b- Injection de fissures

Le traitement des fissures par injection consiste à faire pénétrer dans des fissures un produit susceptible de créer une liaison mécanique et/ou une étanchéité. Il ne s'applique normalement qu'aux fissures injectables, c'est-à-dire dont l'ouverture est au moins comprise entre 0,1 et 0,2 mm. [13]



Figure I-22 : Injection de fissures au pont de Châlons-en-Champagne. [13]

Parmi ces traitements, le calfeutrement; qui consiste à colmater sur une certaine profondeur les fissures par un produit souple, voire rigide pour rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou pour empêcher la pénétration de matières solides (risque de blocage des mouvements des fissures). Il s'applique donc aux fissures qui ne mettent pas en jeu la résistance de la structure. Il est bien adapté, par exemple, aux fissures des dallages industriels... [13]



Figure I-23 : Calfeutrement de fissures à l'aide d'un mortier. [13]



Figure I- 24: Calfeutrement d'une fissure à l'aide d'un mastic. [13]

Le traitement des fissures par pontage et protection localisée consiste à recouvrir en surface des fissures actives ou non pour rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou pour empêcher la pénétration de matières solides (risque de blocage des mouvements des fissures) tout en les laissant libres leurs mouvements. Il doit permettre, si nécessaire, la mise en œuvre d'un revêtement de finition. Il s'applique donc aux fissures qui ne mettent pas en jeu la résistance de la structure. Il est bien adapté, par exemple, à certaines fissures des balcons d'habitation quand elles ne compromettent pas la stabilité de ceux-ci... [13]

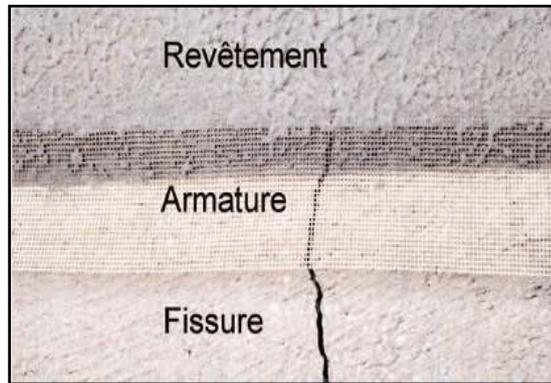


Figure I- 25: Pontage d'une fissure avec incorporation d'une armature. [13]

Le traitement des fissures par protection généralisée consiste à mettre en œuvre sur la surface de la structure fissurée un revêtement qui ferme les fissures et qui peut remplir d'autres rôles tels que [13]:

- l'imperméabilisation et l'aspect,
- l'étanchéité et l'aspect,
- la protection contre la pénétration de produits agressifs,
- etc.

I-4-2 La protection du béton et des armatures

La protection des éléments porteurs des éléments structuraux en béton armé est parmi les phases primordiales dans la réparation de ces éléments. On distingue [10]:

a- Techniques de protection du béton

Si l'enrobage des aciers est trop poreux ou d'épaisseur insuffisante, ou lorsque l'environnement est particulièrement agressif, il est souvent nécessaire d'appliquer un traitement de protection du béton. Une telle protection peut aussi être appliquée à un mortier fraîchement déposé, vis à vis des agressions atmosphériques, des fondants de l'eau de mer, des attaques chimiques ou bactériologiques ou, tous simplement, vis-à-vis de la pénétration de l'eau, afin d'assurer une grande durabilité de la réparation. Les cinq grandes familles de produits de différentes caractéristiques sont :

- Hydrofuges des surfaces

Sont destinés à rendre la surface du béton imperméable à l'eau. Il s'agit principalement de silicone en solution aqueuse que l'on peut appliquer à une surface légèrement humide.

- Minéralisateurs

Ce sont des produits qui contiennent des atomes de silicium capables de réagir avec le calcium contenu dans la chaux du ciment pour donner des microcristaux de C-S-H qui pénètrent dans les pores et créent une sorte de "minéralisation" du support.

- Peintures

On peut protéger le béton par la peinture, qui joue aussi un rôle esthétique. Ces peintures sont à base des copolymères acryliques ou vinyliques en émulsion aqueuse ou autres résines époxydiques. Parmi les peintures qui constituent des revêtements pour le béton, il y a :

- Revêtements minces à base de liant hydraulique modifié ou à base de polymère

Ils sont appliqués en une ou deux couches sur des épaisseurs totales de 1 à 2 mm. Ces revêtements minces constituent la meilleure protection contre les agressions extérieures, mais pour les surfaces horizontales, la protection est difficile en raison des stagnations des eaux.

- Revêtement plastiques épais

Ils ont la même composition que les peintures classiques, mais comportent en plus des charges dont la granulométrie atteint le millimètre. Ils sont appliqués avec un dosage de 1.5 à 4 kg/m², et donnant une épaisseur finale de 1 à 3 mm. Le liant est souvent une résine acrylique en émulsion.

b- Protection des armatures

Dans ce contexte, et afin de protéger les aciers porteurs du béton armé constituant les éléments structuraux, il est impérativement nécessaire de passer par les étapes suivantes [10]:

- **Prévention de la corrosion des armatures**

La corrosion est la principale cause de dégradation des ouvrages en béton armé. Le risque de corrosion peut être réduit considérablement si les précautions suivantes sont respectées :

- L'enrobage suffisant des armatures selon l'environnement;
- Qualité du béton;
- Dosage minimal en ciment, l'épaisseur carbonatée est d'autant plus faible que le dosage du béton en ciment est plus élevé.

Les principales causes de la corrosion des armatures du béton armé, sont la carbonatation et la présence d'ions agressifs tels que les chlorures dans un milieu sec et humide. Les armatures peuvent être protégées par une des techniques suivantes :

- **Protection cathodique**

Cette technique permet de stopper le processus de corrosion, elle doit être appliquée avant que les risques d'ordre mécanique soient importants. Cette méthode consiste à abaisser en un point de l'armature le potentiel de ce métal jusqu'à une valeur qui telle que la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable. L'abaissement du potentiel est obtenu en imposant le passage d'un courant électrique qui va de l'enrobage vers l'armature.

- **Les inhibiteurs de corrosion**

Ce sont des composés chimiques à base de nitrite ou benzoïques de sodium, qui prolonge la passivité de l'acier dans le béton en présence d'agents agressifs, s'ils sont appliqués sur les barres d'acier.

- **Revêtement des armatures**

Cette technique est plus pratique et consiste à la protection de l'acier par revêtement organique de polymères comme les résines époxy; ou par revêtement métallique comme le zinc.

I-4-3 Régénération des matériaux

Afin de donner une renaissance aux matériaux (béton, aciers, câbles), plusieurs techniques peuvent être appliquées, parmi ces techniques, on peut citer [10]:

- **Technique de réinjection des câbles de précontrainte**

Cette technique, applicable pour les structures en béton précontraint, consiste à remplacer l'air présent dans la cavité (vides laissés par une injection incomplète de câbles de précontrainte), par un produit du type coulis de ciment très fluide et stable. Le remplissage ne peut pas être complet que si l'on parvient à évacuer l'air emprisonné. Pour ce faire, on utilise la technique du vide qui exige l'emploi de tuyauterie et de produits spéciaux.

- **Extraction des chlorures**

Ce traitement, permet d'extraire les chlorures présents dans le béton de la structure. Ce traitement peut durer de 6 à 12 semaines et permet d'extraire 40 à 50 % des chlorures situés dans le béton surtout au voisinage de la surface.

I-4-4 L'ajout de forces (ou de déformations)

Afin d'augmenter la capacité portante ou prolonger la durée d'exploitation d'un ouvrage existant, on applique des efforts d'une intensité connue et suivant des directions définies par le biais de câbles précontraints, qu'on appelle précontrainte additionnelle. Cette précontrainte, qui est en général extérieure, permet de renforcer la structure. Son application suppose un traitement préalable des fissures par injection car elle ne peut, à elle seule, refermer les fissures. Parmi ces applications, on distingue [10]:

- **Renforcement des ouvrages en flexion**

On applique ce renforcement en particulier dans les tabliers de ponts, pour augmenter leur résistance à la flexion. Le tracé des câbles précontraints additionnels peut être rectiligne ou polygonal. On peut soit renforcer et/ou réparer les éléments porteurs (poutres, dalles, caissons, etc..) ou les éléments secondaires (entretoises, éléments de tablier).

- **Renforcement des ouvrages vis-à-vis de l'effort tranchant**

Lorsque le problème majeur, dans une structure en béton précontraint, est celui de l'effort tranchant, et si l'inclinaison de câbles de précontrainte additionnelle n'est pas possible, on recourt à l'emploi d'étriers actifs, généralement verticaux et constitués de fils, de barres ou de mono torons.

I-4-5 Ajout de matière

Les techniques d'ajout de matière sont [14] :

- L'ajout d'armatures passives (appelé parfois chemisage);
- L'ajout de béton (tel que le béton projeté);
- Les tôles collées.

L'ajout de matière est la technique la plus répandue en ce moment, est appliquée dans la réparation et la réhabilitation des ouvrages en béton armé, vu sa maîtrise par l'exécutant. La pratique a montré que ces techniques présentent des limites et pas mal d'inconvénients. En effet, les techniques de chemisage (Figure I-26) ou de béton projeté (Figure I-27) présentent beaucoup d'inconvénients tels que : le changement de géométrie, de l'esthétique, les grands réaménagements, le coût et le surplus de poids ajouté à la structure sur la fondation. Le chemisage est toujours pratiqué dans la réhabilitation du bâtiment et le renforcement des appuis des ponts vétustes ou anciens [14].



Figure I-26 : Technique de chemisage avec protection des armatures. [19]

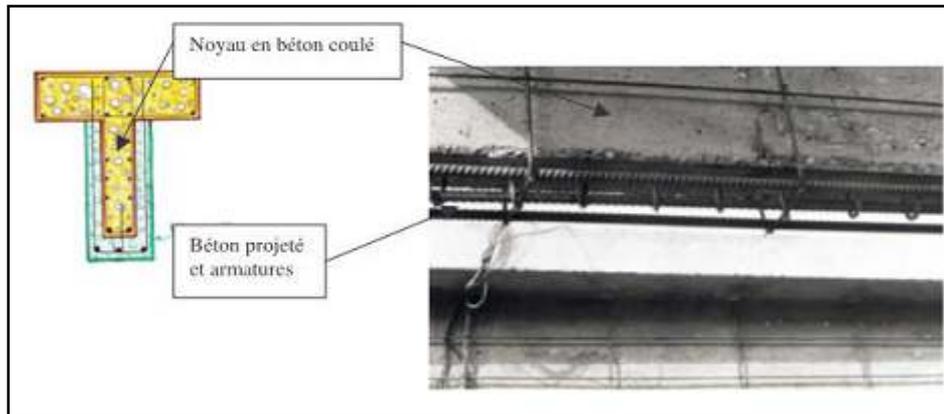


Figure I-27: Renforcement d'une poutre au moyen du béton projeté. [10]

Contrairement aux techniques sus mentionnées, la technique de tôles collées (figure I-28), qui a remplacé ces techniques traditionnelles, a permis d'éliminer pas mal d'inconvénients, vu sa simplicité de mise en œuvre.

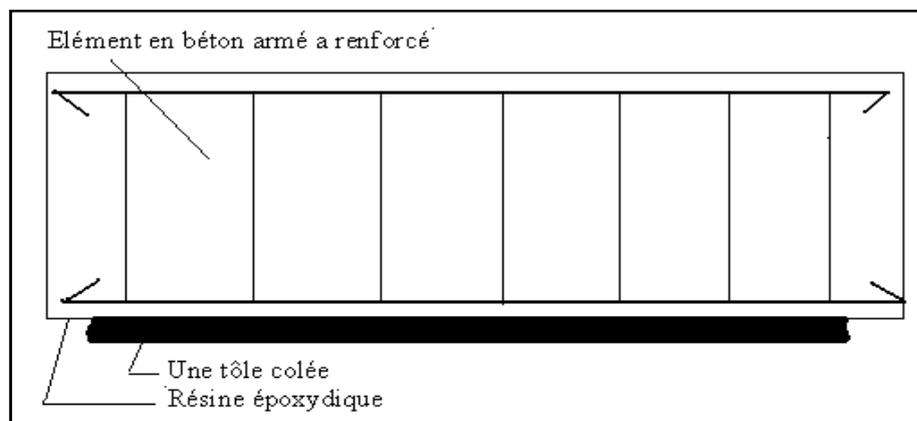


Figure I-28 : Renforcement d'un élément par de la tôle collée. [10]

I-5 Matériaux composites

Les composites, produits de synthèse, donnent des concurrences aux métaux parce qu'ils sont légers, inaltérables et que leur résistance dépasse celle de l'acier (leur rapport résistance/poids est très élevé), en effet les plaques de PRF sont normalement au moins deux fois et peuvent être 10 fois plus résistantes que les plaques en acier tandis que leur poids est seulement 20% celui de l'acier. Depuis une dizaine d'années, ils sont présents dans le secteur de la construction, en particulier pour des interventions de renforcement d'ouvrages. Les matériaux composites composés des fibres de verre, d'aramide ou fibres de carbone, de par leur souplesse, leur facilité d'installation et leurs caractéristiques mécaniques adaptées, permettent d'intervenir sur des ouvrages de formes complexes. Ils s'adaptent à toutes les formes de supports et ne requièrent aucun placage sous pression et apportent une performance à la structure que l'on ne retrouve pas avec les méthodes traditionnelles (béton armé ou plats métalliques collés). Toutefois, la pose, d'une apparente simplicité, est en fait très technique et nécessite une grande minutie au niveau de la préparation lors de l'encollage. [16]

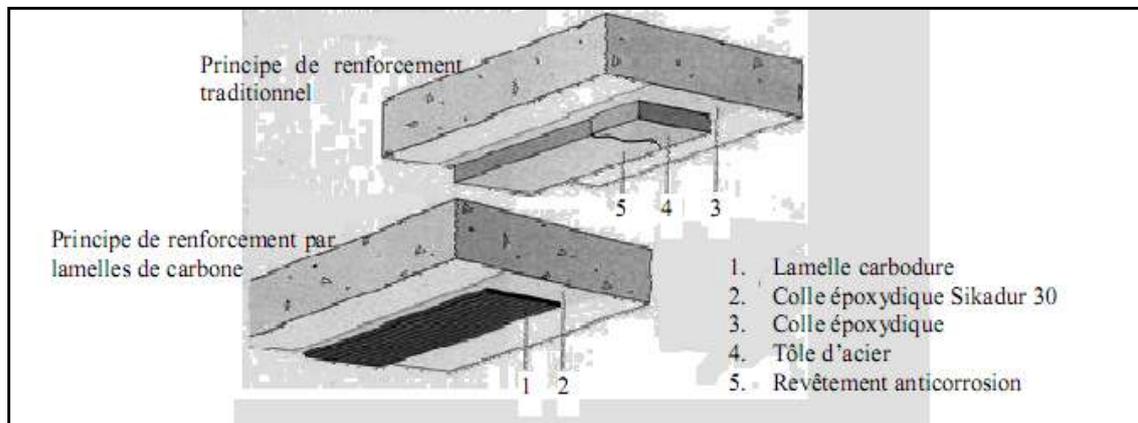


Figure I- 29: Renforcement par tôle d'acier et lamelles de carbone. [16]

I-5-1 Définition et identification

Le matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles. Le matériau ainsi constitué possède des propriétés que les éléments constitutifs seuls ne possèdent pas. [17]

Il est constitué comme le montre la figure I-30 d'une :

- Ossature appelée renfort, présentant diverses architectures, qui assure la tenue mécanique.
- Protection appelée matrice, assurant la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort, qui est généralement une matière plastique (résine thermoplastique ou thermodurcissable). [10]

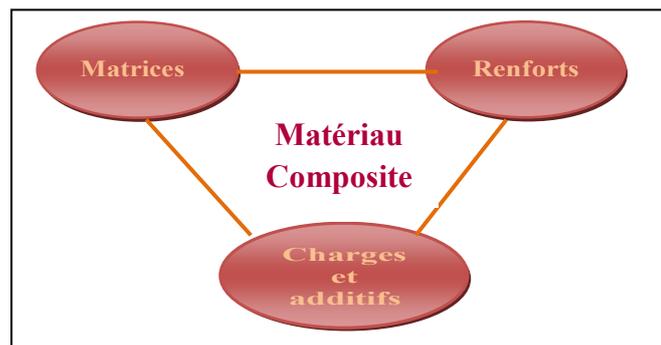


Figure I-30 : Constitution des matériaux composites.

Le renfort:

- se présente le plus souvent sous forme fibreuse ou filamenteuse
- assure l'essentiel des propriétés mécaniques.

La matrice:

- assure le liant fibre / matrice,
- maintient le renfort dans sa position initiale,
- assure la transmission des efforts.

Entre le renfort et la matrice:

- Existence d'une zone de liaison appelée interface (interphase).

Charges et additifs:

Les charges et additifs sont incorporés dans un matériau composite pour :

- Modifier la couleur
- Modifier sensiblement les propriétés mécanique, électrique ou thermique
- Réduire le coût
- Résister au feu
- Diminuer le retrait
- Faciliter le démoulage
- Améliorer la résistance au vieillissement
- Modifier la densité du matériau.

I-5-2 Classification des matériaux composites

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants ou suivant la nature des composants :

I-5-2-1 Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres [18].

a) Composites à fibres

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc. L'arrangement des fibres et leur orientation 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 là un type de matériaux dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécaniques et physiques en jouant sur la nature des constituants ; la proportion des constituants ; ou l'orientation des fibres.

b) Composites à particules

Un matériau composite est un mélange de particules si le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion et la diminution de retrait. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

I-5-2-2 Classification suivant la nature des constituants

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés comme composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renforts sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autres faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche. Parmi ces composites, nous pouvons citer [19]:

- Les composites à matrice organique (résine, charges), avec des fibres minérales (verre, carbone, etc.); des fibres organiques (kevlar, polyamides, etc.); ou des fibres métalliques (bore, aluminium, etc.).
- Les composites à matrice métallique (alliages légers et ultra-légers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec des fibres minérales (carbone, carbure de silicium (sic)); des fibres métalliques (bore); ou des fibres métal minérales (bore revêtu de carbure de silicium (BorSiC).
- Les composites à matrice minérale (céramique), avec des fibres métalliques (bore); des particules métalliques (cermets); ou des particules minérales (carbures, nitrures, etc.).

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300°C, alors que les matériaux composites à matrices métallique ou minérale sont utilisés jusqu'à 600°C pour une matrice métallique et jusqu'à 1000°C pour une matrice minérale [19].

I-5-3 Architectures de renforcement

La disposition des fibres les unes par rapport aux autres dans la matrice influe grandement sur les propriétés finales du composite, et notamment sur sa résistance. L'orientation, la concentration et la répartition des fibres sont donc importantes [19]. En fonction de l'orientation des fibres, on rencontre plusieurs architectures de renforcements [20]:

- a- Unidirectionnelle : les fibres parallèles peuvent se présenter sous deux formes :
 - Sans liaison particulière ou reliées par un fil (nappes).

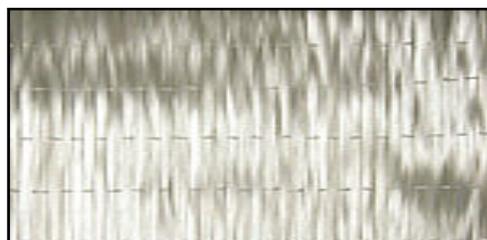


Figure I-31 : Fibres parallèles. [20]

- b- Multidirectionnelle aléatoire :
 - Fibres coupées et broyées, sans arrangement particulier ;
 - Feutre de fibres agglomérées par un liant : la disposition des fibres courtes (longueur inférieure à 50 mm), sans orientation particulière ou à fibres continues.

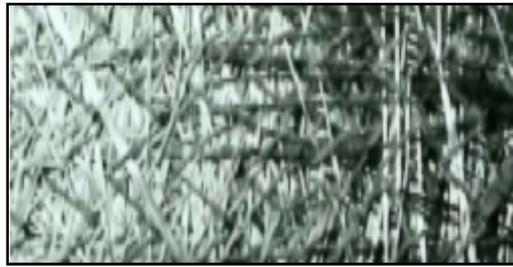


Figure I- 32: Fibres coupées et broyées. [20]

- c- Orientée : le tissu comporte des fils de chaîne ou de trame (fibres bidirectionnelles) ; suivant le mode de croisement de la trame et de la chaîne, le tissu sera une toile, un sergé ou un satin.



Figure I-33 : Fibres orientées. [20]

- d- Bi ou tridimensionnelles on réalise également, pour des applications particulières (aérospatial, défense), des armatures de renforcements bi- ou tridimensionnelles.

Les performances résultantes de ces différents types d'architecture sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau I-2 : Performances comparées des différents types d'architecture.[20]

Architecture des fibres	Comportement mécanique recherché	Orientation de la tenue mécanique	Taux maximal de renfort	Type de fibres
Fibres coupées et broyées	Moyen	quelconque	30%	verre
Mats fibres coupées	Moyen	quelconque	30%	verre ou carbone
Mats fibres continues	Moyen	orientée	30%	verre
Fibres continues	Intermédiaire	unidirectionnelle	50 à 70%	toutes
Tissu	Fort	bi ou tri directionnelle	30 à 70%	toutes
Nappe	Très fort	Unidirectionnelle (Bi-directionnelle si superposition)	50 à 85%	toutes

Certaines composites hautes performances (HP) utilisent des structures de fibres à orientation maîtrisée pour des performances mécaniques élevées.

I-5-4 Différents types de matériaux composites

Les composites trouvent leurs principales applications dans le transport aérien (civil et militaire), maritime et ferroviaire, le bâtiment et ouvrages d'art, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs, notamment grâce à leur bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes comme l'acier et leur faible masse volumique. Parmi les matériaux composites de renforcement, on trouve des stratifiés (lamelles), des tissus unidirectionnels ou des tissus bidirectionnels. Les fibres composants ces composites sont à base de [10]:

- Fibres de carbone, utilisées dans le génie civil et l'aviation ;
- Fibres de verre (ou Kevlar), utilisées dans la fabrication de piscine;
- Fibres d'aramides (ou Kevlar), utilisées dans la protection balistiques gilet pare-balles;
- Fibres cramique, utilisées dans l'industrie ;
- Fibres synthétiques thermostables (fibres Kermel, fibres Nomex, fibres Kynol, etc.).
- Autres fibres, généralement à faibles module et contrainte à la température, telles fibres d'origine végétale, d'origine minérale ou fibres métalliques ou synthétiques.

Dans cette étude, on s'intéressera aux matériaux composites à base de fibre de carbone, vu les performances qu'ils présentent comparativement aux autres fibres d'une part, et leur large utilisation en génie civil, d'autre part.

Tableau I.3 : Comparaison entre les différents types de fibres existants. [21]

Renforts	Diamètre du filament (μm)	Masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique $^{\circ}\text{C}^{-1}$
	d	Mv	E	G	k	C_r	A	α
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	$0,5 \cdot 10^{-5}$
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	$0,3 \cdot 10^{-5}$
Carbone HM	6,5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	$0,08 \cdot 10^{-5}$
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	$0,02 \cdot 10^{-5}$
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	$-0,2 \cdot 10^{-5}$
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	$0,4 \cdot 10^{-5}$
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

I-5-4 Matériaux composites à base de fibres de carbone

I-5-4-1 Propriétés des fibres de carbone

Les fibres de carbone distinguées sur la figure (I-34) sont les plus utilisées dans les applications hautes performances. Elles sont obtenues par carbonisation des fibres de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres [17]:

- fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C;
- fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

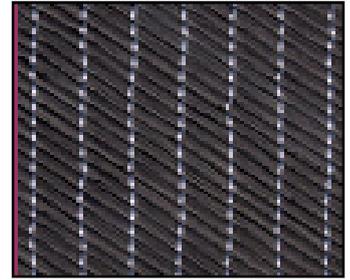


Figure I-34 : Tissu de fibres de carbone. [17]

La technique de renforcement ou de réparation des structures en béton par collage de matériaux à haute résistance par rapport au béton a été appliquée pour la première fois par l'HERMITE et BRESSON dans les années 60. Depuis, cette technique a fait l'objet de nombreux thèmes de recherche dans différents pays, elle est apparue comme efficace et fiable et permet d'augmenter considérablement la résistance des structures (donc leur durée de vie en service et leur capacité portante) [22].

Les fibres de carbone bénéficient de caractéristiques sans équivalent et des propriétés physiques très étendues [21] :

- Grande résistance et haut module d'élasticité en traction longitudinale,
- Grande résistance à la fatigue et à la déformation et faible masse volumique ;
- Grande résistance à l'usure et absorption des vibrations ;
- Grande stabilité dimensionnelle ;
- Grande résistance à la corrosion vis-à-vis des acides, des bases, des sels et des produits organiques ;

La figure ci après permet de juger de l'intérêt, en termes de rigidité et de résistance spécifique couplées, d'utiliser les matériaux composites hautes performances en substitution de l'acier.

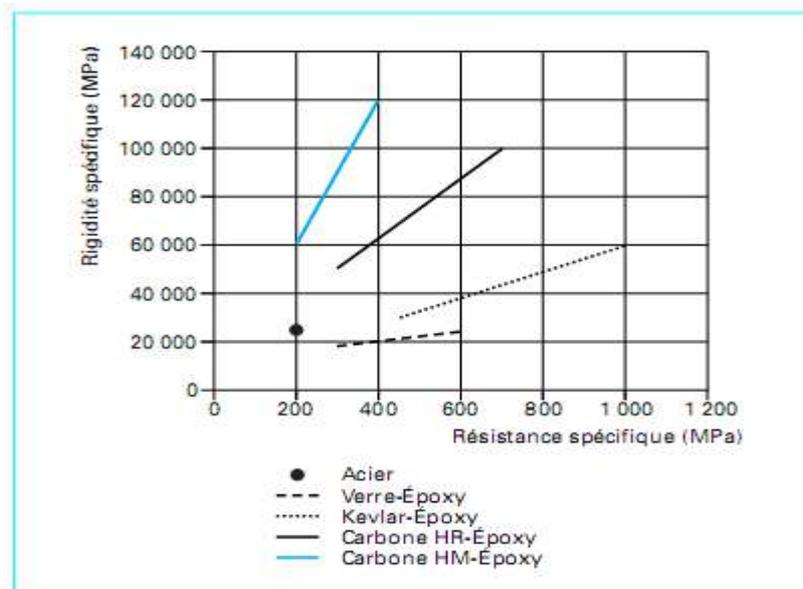


Figure I-35 : Comparaison entre les aciers et les matériaux composites. [24]

Les matériaux composites à base de fibres de carbone ont un certain nombre d'avantages une fois comparés aux matériaux de construction traditionnels tels que l'acier et les autres types de matériaux composites, le tableau ci-dessus présente ces avantages ainsi que les inconvénients de l'utilisation des matériaux composites à base de fibres de carbone.

Tableau I- 4: Avantages et inconvénients des CFRP.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - excellentes propriétés mécanique (Rt,Rc,E) - très bonne tenue en température (en atmosphère non oxydation). - dilatation thermique nulle - bonne conductibilité thermique et électrique - amagnétisme et perméabilité aux rayons X - bonne tenue à l'humidité - usinabilité aisée - faible densité <2 	<ul style="list-style-type: none"> - prix très élevé - précautions à prendre dans la mise en œuvre (fibres cassantes) - tenue limitée aux chocs et à l'abrasion - mauvais comportement chimique - adhésion difficile avec les résines

Les fibres de carbone offrent une résistance excellente à la corrosion aux agents environnementaux aussi bien que les avantages des rapports élevés de rigidité-poids et de force-poids une fois comparé aux matériaux de construction conventionnels. Cependant, le coût élevé apparent de FRP compare aux matériaux conventionnels a été un obstacle important. Mais, une comparaison directe de la base de prix unitaire peut ne pas être appropriée quand l'installation est incluse dans la comparaison des coûts, le FRP peut concurrencer les matériaux conventionnels. Le bas poids de FRP réduit des dépenses de transport et permet à une certaine préfabrication d'avoir lieu à l'usine.

I-6 Confinement des colonnes par les matériaux composites

Le confinement avec CFRP est principalement utilisé pour des éléments en compression afin d'augmenter leur résistance face à ce type de contrainte et leur comportement ductile. L'utilisation de CFRP pour confiner les supports présente de nombreux avantages comparée à l'emploi d'acier. Tandis que l'acier maintient une tension de confinement constante, le CFRP présente un comportement élastique qui provoque un accroissement de l'action de confinement sous dilatation. En contrepartie, le CFRP présente une rupture moins ductile que l'acier. Il contribue de plus à éviter le glissement de barres dans des points où la longueur de joint n'a pas été bien conçue et retarde l'apparition de flambement. Le confinement peut être réalisé par tronçons, en spirale ou peut couvrir toute la surface du support selon les résultats attendus. L'utilisation de FRP préfabriqués est relativement répandue dans cette technique. [23]

➤ Méthodes d'application

Plusieurs techniques ont été développées pour renforcer ou réhabiliter des colonnes existantes en béton armé en utilisant des composites CFRP. Les méthodes de renforcement peuvent être classées en trois catégories en fonction de la méthode adoptée pour construire le composite CFRP à savoir : la stratification au contact, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coquille préfabriquée en CFRP (figure I- 36).



Figure I- 36: Enchemisement avec CFRP préfabriqué (gauche) et in-situ (droite). [23]

Une colonne peut être enveloppée complètement par des tissus de composites avec une ou plusieurs couches (figure I-37).



Figure I-37 : Enveloppement total de la pile. [24]

Elle peut être aussi partiellement enveloppée en utilisant des bandes CFRP sous forme d'une spirale continue ou des anneaux discrets (figure I-38).



Figure I- 38: Colonne partiellement enveloppée par CFRP. [24]

Dans le cas des colonnes en béton armé renforcées par composites, les CFRP développent une résistance aux déformations dues aux charges axiales, qui résulte d'un confinement des contraintes développées dans le béton, ce qui améliora à la fois l'effort et la contrainte de compression ultime du béton. [24]

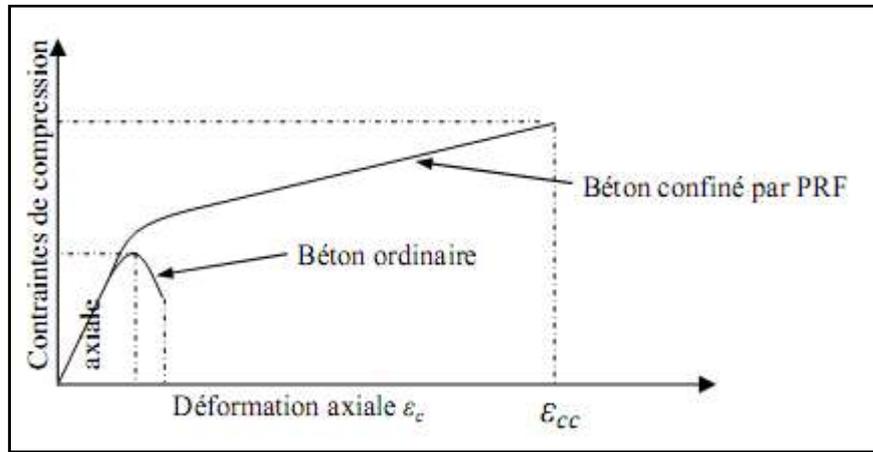


Figure I-39 : Courbe (contrainte- déformation) idéalisée pour un béton confiné par CFRP. [24]

➤ Recherches déjà établies

Un projet de recherche portait sur le confinement de colonnes au moyen de tissus en matériaux composites [25]. Dans le cadre de ce projet, le comportement de plus de 90 éléments d'essai en béton, de section ronde et carrée, fut étudié (figures I-40 et I-41) [26].



Figure I-40: Essais de compression sur des colonnes confinées. [26]

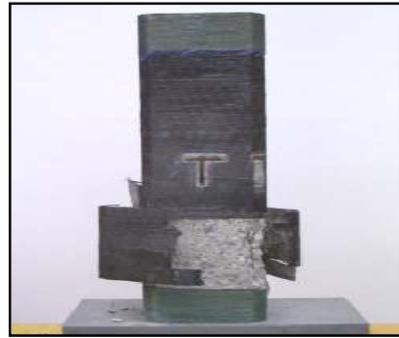


Figure I-41 : Rupture d'une colonne carrée avec confinement en carbone. [26]

Les colonnes sont confinées avec une ou plusieurs couches de tissu en aramide, en fibre de carbone et en fibre de verre. Les recherches montrent une forte augmentation de la charge de ruine et de la ductilité des éléments d'essai (figure I-42).



Figure I-42 : Rupture de colonnes renforcées par des confinements en fibres d'aramide et de carbone. [26]

Un autre projet de recherche traitait du problème du choc de véhicules lourds contre des colonnes élancées de ponts [27]. Cette étude fut entreprise suite à l'effondrement accidentel de plusieurs piles de ponts en bordure d'autoroutes. Une analyse générale de la résistance aux chocs de piles dans différents pays a montré que plusieurs centaines de piles doivent être renforcées pour prévenir de futurs accidents.

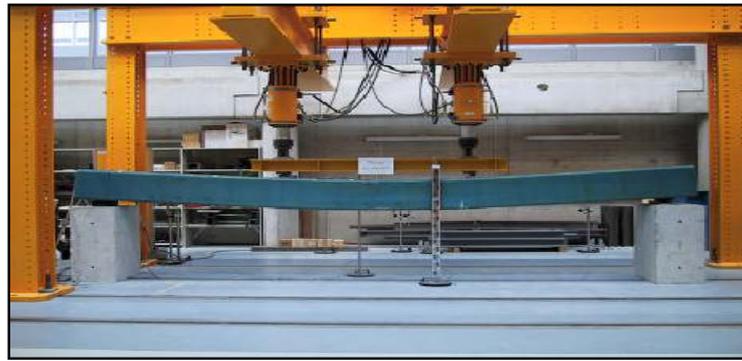


Figure I-43 : Essais de flexion sur des colonnes renforcées par des tissus de CFRP. [26]

Un renforcement au moyen de tissus collés en aramide fut proposé comme alternative aux méthodes de renforcement traditionnelles. Pour prouver la faisabilité et l'efficacité de cette nouvelle méthode, il fut décidé d'effectuer une campagne expérimentale en laboratoire (figure I-43).



Figure I-44 : Essais d'effort tranchant sur des colonnes en béton avec ou sans renforcements par des tissus en CFRP. [26]

L'étude expérimentale était menée sur quatre colonnes de 5,20 m de long et d'une section de 400 x 400 mm. Ces colonnes étaient soumises à des moments de flexion (figure I-44), des efforts tranchants et des efforts normaux. Les essais ont mis en évidence une forte augmentation de la résistance et de la déformabilité des colonnes renforcées. Le renforcement de colonnes au moyen de tissus en CFRP constitue donc une technique très efficace contre le choc de véhicules lourds. [26]

I-7 Exemples d'application des matériaux composites dans le renforcement des ponts

- **Au Japon**

La résistance globale des structures renforcées permettrait, d'après les résultats des études faites dans les universités japonaises spécialisées, de supporter un séisme de 6 à 7 sur l'échelle de Richter. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, le renforcement des piles (de plus de 7 m de diamètre) d'un pont autoroutier (Sakawa River Bridge – Tomei Highway), dont certaines dépassaient 60 m de hauteur. Ce chantier se termina en mars 1998, après un an de travail. Plus de 2 tonnes de fibres de carbone furent posées [21] (figures I-45 et I-46).



Figure I- 45: Renforcement des piles de pont (Sakawa River au Japon). [21]

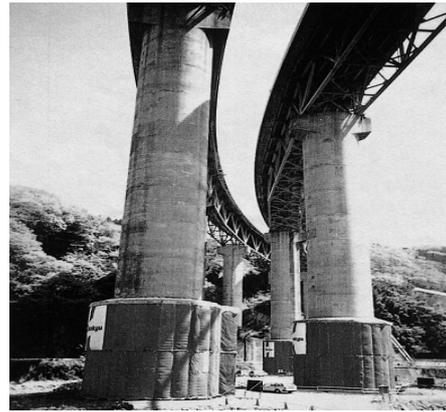


Figure I- 46: Enceinte d'isolation pour Polymérisation de la matrice. [21]

- Au Canada

Au Canada, des études ont été menées pour renforcer extérieurement des ponts anciens corrodés ou ne pouvant supporter l'augmentation des surcharges d'exploitation. A partir du début des années 1990, de nombreuses universités (Alberta, Laval, Manitoba, Royal Military College, Sherbrooke, Queen's, Waterloo.) commencèrent à travailler sur les renforcements et les frettages des piles de ponts et des colonnes de bâtiments [28]. L'utilisation des fibres de carbone en génie civil a été d'environ 50 tonnes en 1997 au Canada et aux Etats-Unis. Parmi les chantiers expérimentaux on peut citer :

- Le renforcement du pont de Calgary (Alberta) par des câbles de 6 m de long. en 1993.
- La réhabilitation du pont Clearwater Creek (Alberta) à partir de bandes de tissus de fibres de carbone préimprégnées en 1996.
- Le renforcement des bases de ponts Jaques Cartier et Champlain qui enjambent le Saint-Laurent à Montréal en 1996.
- Le renforcement d'un pont autoroutier, traversant l'Assiniboine River à Headingley (Manitoba) à l'aide de tissus et de câbles en fibres de carbone en 1997.
- Le renforcement par frettage à l'aide de tissus préimprégnés de plusieurs colonnes de bâtiments dans l'enceinte de l'université Sherbrooke en 1995.
- Le renforcement d'un garage en sous-sols d'un parking, en utilisant des produits putrides en 1996.
- Le renforcement d'une structure de toiture dans le centre de Winnipeg (Manitoba) en 1997.

- En Australie :

Durant les douze dernières années, les chercheurs Australiens ont poursuivi activement le développement industriel des nouvelles fibres à base de polymères (FRP) et leur utilisation dans la réalisation de nouvelles infrastructures et la réhabilitation des ouvrages détériorés ou présentant des anomalies, tels que les ponts, bâtiments ou constructions industrielles [29].

L'Australie compte quelque 40.000 ponts routiers dont la longueur est supérieure à 7 m. Leurs pouvoirs publics ont alloué un montant avoisinant les dix billions de dollars U.S (\$10 billion) pour la réhabilitation de ouvrages les plus détériorés et stratégiques et qui dépassent les 60ans (Figure I-47).



Figure I-47: Installation des premiers composites FRP ‘Australiens’ pour test sur un pont [29]

La première application dans le domaine de réhabilitation des ouvrages d’art fut effectuée en 2001 sur un pont réalisé en 1960, avec une longueur de 650 m de longueur et 8 voies de circulation, se trouvant à Melbourne (Victoria). Il s’agit de la plus grande application à cette époque (Figure I-48).



Figure I-48: Inspection du comportement du tablier du pont renforcé [29]

- En Europe

En Europe, de nombreuses universités ont travaillé sur les renforcements à base de matériaux composites. Un projet appelé projet « Brite » a réuni plusieurs pays sur ce sujet. Parmi les cas d’utilisation des fibres de carbone en génie civil on cite [20] :

- La construction d’un pont, au début des années 1990, avec des câbles de précontraint à base de composite en fibres de carbone, où passent toujours des dizaines de camions de livraison par jour dans l’usine de BASF à Ludwigshafen en Allemagne.

- Le remplacement de deux haubans en acier par deux câbles de fibres de carbone sur le pont de Winterthur (Suisse) en 1996. Chaque câble est constitué de 241 joncs de 5 mm de diamètre. La charge de rupture de chaque câble installé est supérieure à 1300 t.

- La construction d’une passerelle (longueur 80 m, largeur 3,5m) munie de haubans et de torons de précontrainte, le tout en composite époxyde-fibres de carbone en 1998 au Danemark.

- Fin 1997, plus d’une centaine de ponts ont été renforcés en utilisant le principe de renforcement par plats pultrudés et de tissus, dont le premier pont anglais, à Dales town of Skipton, au nord du Yorkshire, en octobre 1997.

- Fin 1996, le marché des BTP représentait en Europe un peu plus de 25 t de fibres de carbone et 50 t en 1997 avec un taux de croissance estimé à 30% par an.

En France, mis à part la fourniture de renforcement des structures en béton, les composites ont relativement peu pénétré le secteur du BTP, notamment du fait d'un prix élevé comparé aux matériaux traditionnels (1,9 fois le prix de l'acier et presque 6 fois le prix du bois) ; d'une relative méconnaissance des ingénieurs et concepteurs (BET) vis-à-vis des composites et d'un manque d'information sur le cycle de vie (recyclabilité, durabilité).

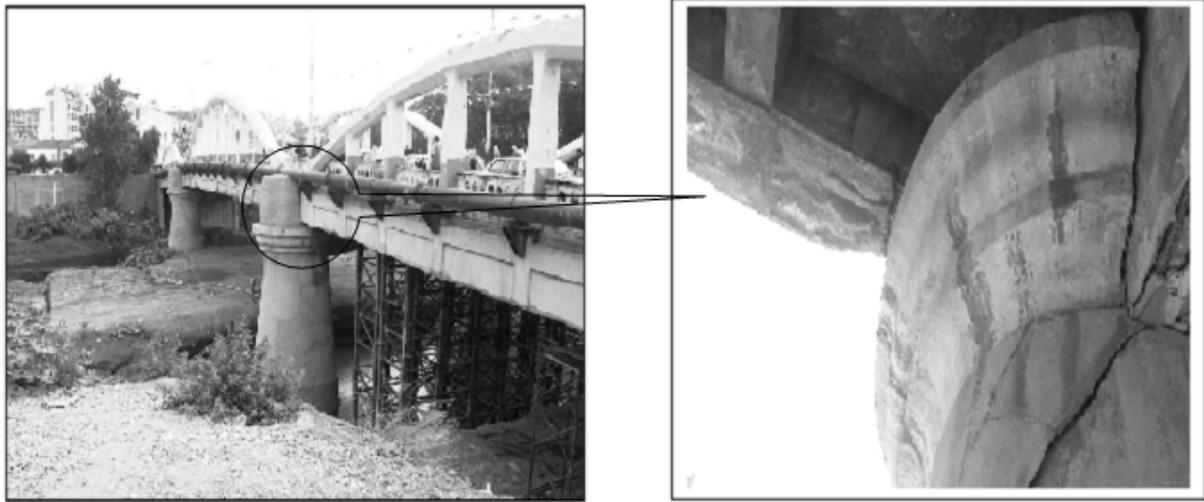
Sous l'impulsion de la société Soficar et du LCPC, une étude démarra fin 1994, soutenue par le 'Plan génie civil 1995' du Ministère de l'Équipement, du Tourisme et du Transport (METT) et la DRAST (Direction de la recherche et des affaires scientifiques et techniques), d'un système de renforcement à base de tissus secs imprégnés in situ. Les résultats de cette collaboration ont donné naissance d'un produit appelé TFC (tissus de fibres de carbone), marque déposée par Freyssinet International. En 1996, Freyssinet renforçait, avec succès, le premier pont autoroutier français en remplacement les plats collés métalliques classiques par des tissus secs et imprégnés sur place par un adhésif spécifique à base de résine époxydique (TFC). Après ce premier succès et dès l'année 1997, l'application devenait industrielle, avec l'application de centaine de ponts et de bâtiments avec le procédé TFC [21].

- En Afrique

La littérature montre que l'Afrique du sud a été le premier pays à avoir appliqué le renforcement des éléments structuraux par le principe de collage extérieur de plaques métalliques (procédé de l'Hermitte) en 1960 sur un pont dégradé. Les recherches se sont, dans un très peu de temps, accentuées notamment dans le domaine de renforcement et/ou réparation des poutres et dalles, ou confinement des poteaux. Parmi les autres pays qui ont lancés des recherches, l'Algérie, la Tunisie, l'Égypte, le Maroc, le Sénégal, etc.

En Algérie, pays considérée parmi les premiers, en Afrique, avoir appliqué ce type de renforcement, après l'Afrique du Sud. Les composites CFRP ont fait leur apparition sur le marché en 1997. La première application fut en 1998 sur l'ancien pont voûté de Sidi Rached à Constantine, où des bandes du TFC furent posées sur la poutraison du tablier de ce pont [15]. Un grand nombre d'ouvrages d'art et éléments structuraux de bâtiments ont été renforcés, par la suite, par des composites de fibres de carbone (lamelles et tissus de fibre de carbone). En effet, après la première expérience en 1998, un deuxième pont fut réparé, il s'agit de l'ouvrage rail PK 459 sur oued Bill Braguettz dans la même ville, avec le partenariat SAPTA- Freyssinet-France (fourniture et pose de TFC) d'une part, et la sous-traitance avec SIKA- Outre-mer d'autre part avec l'application des produits de colmatage et d'injection des fissures sur la maçonnerie et le béton d'autre part [30].

En 2000, le Pont Blanc d'EL Harrach, fut aussi réparé et renforcé par le procédé (TFC). L'ouvrage, en question, permet le franchissement au niveau du centre ville, de l'oued El Harrach, construit au début des années 1900 (figure I-49). Des dégradations ont été observées sur les différentes parties de l'ouvrage. L'analyse des désordres a montré que les causes sont d'origine atmosphérique, de vétusté de la structure, d'attaque de l'eau due au défaut de l'étanchéité du tablier et la perte d'importantes sections d'acier.



Cette technique s'est propagée, après, pour la réhabilitation de plusieurs ouvrages d'art sur le territoire Algérien, avec d'autres sociétés de pose et de fourniture (Sika, Travomed, Enros, etc...). Comme exemple d'application on peut citer : le pont sur oued Messaad à Laghouat en 2005, qui se situe sur l'axe de la route reliant Laghouat à Aflou. Cet ouvrage est constitué de trois travées identiques de 15.5 m chacune, avec un tablier composé de poutres en béton armé (quatre à chaque travée), et d'une dalle en béton armé de 20 cm d'épaisseur [10].

Cet axe routier devenu stratégique est très fréquenté par les poids lourds et les convois exceptionnels à causes des nouvelles installations pétrolières réalisées dans cette zone. Cette nouvelle sur-exploitation et l'étanchéité défectueuse de l'ouvrage ont engendré des désordres sur toute la structure parmi lesquelles: la fissuration au niveau de la dalle, la fissuration des poutres, la corrosion avancée des armatures et l'éclatement des bétons. Des réparations ont été effectuées avec un phasage dont le mode opératoire est le suivant [31] :

- Dépose de toutes les parties non adhérentes des bétons et des enduits ;
- Sablage de toute la structure (poteaux, poutres, dalle) et de toutes les armatures corrodées ;
- Injection des fissures par une résine époxydique (Sikadur 52 Injection) afin de reconstituer le monolithisme des éléments ;
- Protection des armatures sablées par un inhibiteur (Sika Monotop 61P AC) de corrosion ;
- Réparation et profilage des bétons par un mortier (Sikatop SF 126) de réparation à haute performance et avec fumée de silice ;
- Renforcement des poutres soumises aux efforts de la flexion par les lamelles "Sika Carbodur 540 ml" ;
- Renforcement des poutres soumises aux efforts tranchants par les tissus Sika Wrap HEX 230C® :120 m2 (Figure I-50);
- Protection des bétons par un revêtement (SikaGard 680S) méthacrylates contre les agressions atmosphériques.



Figure I-50 : Pose de tissu en fibres de carbone sur les poutres du tablier [31]

D'autres applications pour renforcements de ponts par le tissu en fibres de carbone (TFC) ont été effectuées, suite aux conséquences du séisme de Boumerdes, de Mai 2003.

Durant les cinq dernières années, la technique de renforcement par CFRP (TFC) devenait de plus en plus maîtrisable par les techniciens et personnels de terrain des entreprises Algériennes. La réhabilitation des ponts comme celui d'Oued Oumazer à Cherchell (Tipaza) en 2006 fait preuve, et la pose parfaite du composite sur les parties détériorées du tablier de l'ouvrage a permis de constater l'effet du renforcement par ce type de composite sur le comportement global du pont [10].

Les détériorations sont visibles sur les éléments du tablier, avec des éclatements du béton d'enrobage, corrosion des armatures et des fissures plus ou moins profondes sur les éléments structuraux du tablier. Au niveaux de l'infrastructure (Figure I-51), les piles présentent des anomalies qui se résument en la dégradation totale des bétons et apparition des aciers complètement corrodés avec diminution de leur section). Cela est dû probablement aux attaques des eaux salées du milieu marin entraînant des éclatements du béton et une perte de masse et exposant ainsi les aciers à des corrosions et une perte alarmante de la section résistante. Le diagnostic révèle aussi des fissures inclinées à 45° au niveau des abouts des poutres maîtresses qui traduisent l'accroissement des contraintes de cisaillement dues essentiellement à l'augmentation du trafic routier. On retient également que cette zone a été frappée par un séisme de magnitude 6.1 à l'échelle de Richter en 1989 [32].



Figure I-51 : Vue des dégradations apparentes sur la pile. [32]

En outre, l'analyse des désordres (Figure I-52) a permis de dégager des solutions d'intervention qui convergent vers la réhabilitation et/ou le renforcement des éléments détériorés, afin de redonner à ces éléments leur portance initiale et rendre à la structure de l'ouvrage son état d'avant. La méthodologie choisie pour réparer et renforcer le pont repose sur les phases d'interventions suivantes [10] :

- Chemisage armé des piles ;



Figure I-52 : Echafaudage des appuis du pont. [10]

- Réparation des bétons dénués



Figure I- 53: Eléments en béton très détériorés avec aciers corrodés. [10]

- Injection des fissures par la résine époxydique ;

- Réparation des poutres par collage de tissus de fibres de carbone CFRP :

Afin de redonner aux éléments détériorés leur rigidité de l'état initial, il est impératif de choisir de bons matériaux d'ajout en performance et efficacité pour que l'élément renforcé puisse supporter les charges et surcharges du trafic. Le tissu unidirectionnel Sika wrap est appliqué sur les faces latérales des poutres principales pour reprendre l'effort de cisaillement, tandis que le stratifié de fibres de carbone Sika carbodur est appliqué sur les faces inférieures de ces mêmes poutres pour reprendre l'effet de traction (Figure I-54) [10].

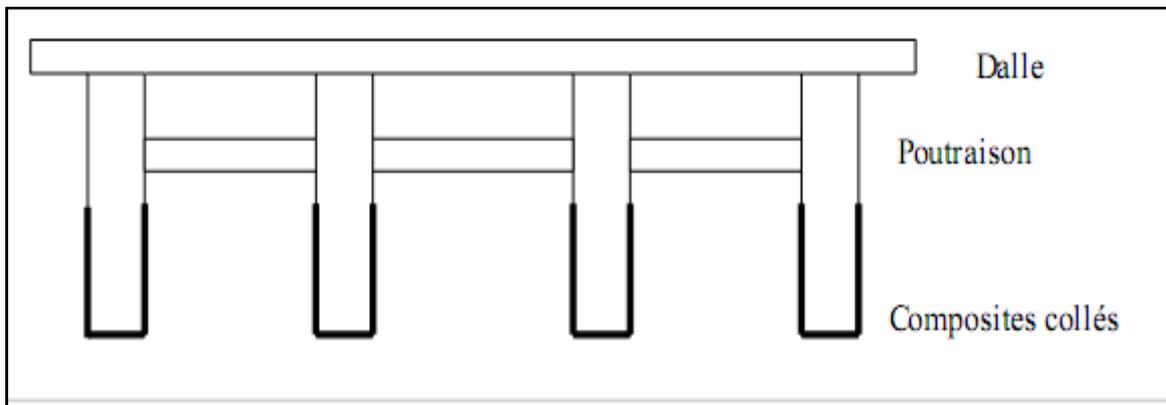


Figure I- 54: Applications des fibres de carbone CFRP sur les poutres du pont. [10]

La réparation de toute la structure a duré dix mois, ce temps a été suffisant pour nous permettre de prendre toutes les précautions nécessaires pour effectuer des essais d'évaluation de la structure. [11]



Figure I-55: Pile du pont après sa réparation. [10]



Figure I-56 : Application des CFRP sur le pont. [10]

Afin de suivre le comportement de l'ouvrage, avant et après application du renforcement par composites CFRP, plusieurs tests statiques et dynamiques furent réalisés, les résultats de ces derniers montrent que les matériaux composites absorbent bien les chocs et les vibrations dont il est soumis le pont et par conséquent peuvent se comporter convenablement en cas de séisme, ou d'autres vibrations, de là on distingue le rôle très important que les matériaux composites à base de fibres de carbone le joue.

I-8 Conclusion :

L'application de nouvelles techniques, tels que le renforcement par collage externe de matériaux composites, sur les éléments structuraux, est une solution alternative plus appropriée. Les fibres généralement utilisées dans ces matériaux composites sont en verre, en carbone ou en aramide, sous forme de tissus unidirectionnels ou bidirectionnels, de lamelles ou de barres. Dans les structures en génie civil, les matériaux à base de fibres de carbone offrent l'avantage de rapidité d'exécution, résistance élevée à la traction, un module d'élasticité élevé, une bonne résistance à la corrosion, en plus de leur efficacité dans le renforcement des structures.

Chapitre II

Les Réseaux De Neurones

Chapitre II

Les réseaux de neurones en génie civil

II-1 Préambule

Les réseaux de neurones connaissent depuis quelques années un succès croissant dans divers domaines des sciences de l'ingénieur, celui du génie civil n'échappe pas à cette règle. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'application des réseaux de neurones en génie civil.

Dans un premier temps, nous présenterons les définitions et notations de base relatives aux réseaux de neurones. Nous poursuivrons en exposant les types et la méthodologie d'apprentissage.

Nous présenterons aussi, d'une manière générale, les étapes de conception d'un réseau de neurones : le choix des entrées et sorties, l'élaboration de la base de données, de la structure du réseau etc.....

Nous terminerons ce chapitre par la présentation de diverses applications qui sont destinées à montrer que dans le domaine de génie civil, les réseaux de neurones sont susceptibles d'apporter des solutions efficaces et élégantes notamment dans la modélisation et simulation du comportement des ponts d'une manière globale, et d'une manière particulière les récentes recherches lancée dans la prédiction des éléments structuraux d'ouvrages d'art .

II-2 Principe de la méthode

Les réseaux de neurones sont composés d'éléments simples (ou neurones) fonctionnant en parallèle. Ces éléments ont été fortement inspirés par le système nerveux biologique. Comme dans la nature, le fonctionnement du réseau de neurone est fortement influencé par la connections des éléments entre eux. On peut entraîner un réseau de neurones pour une tâche spécifique (reconnaissance de caractères par exemple) en ajustant les valeurs des connections (ou poids) entre les éléments (neurone).

En général, l'apprentissage des réseaux de neurones est effectué de sorte que pour une entrée particulière présentée au réseau corresponde une cible spécifique. L'ajustement des poids se fait par comparaison entre la réponse du réseau (ou sortie) et la cible, jusqu'à ce que la sortie corresponde au mieux à la cible. On utilise pour type d'apprentissage dit superviser un nombre conséquent de pair entrée/sortie.

L'apprentissage permet aux réseaux de neurones de réaliser des tâches complexes dans différents types d'application. Ces réseaux de neurones peuvent souvent apporter une solution simple à des problèmes encore trop complexes ne pouvant être résolus rapidement par les ordinateurs actuels (puissance de calcul insuffisante) ou par notre manque de connaissances. [33]

II-2-1 Le neurone biologique

Il nous semble utile de donner quelques définitions des termes techniques utilisés [34]:

- Le corps cellulaire : appelé également 'soma'. Il contient un noyau entouré des structures et des corpuscules nécessaires à son métabolisme.
- L'axone : l'axone est le prolongement cellulaire principal. C'est grâce à lui que le neurone va transmettre les informations. A son extrémité se trouve l'arborisation terminale (pole émetteur de la cellule) au bout duquel il y a un nombre plus ou moins important de terminaisons synaptiques.
- Les dendrites : Les dendrites représentent le deuxième type de prolongement cellulaire et se trouvent en grande quantité autour du soma, c'est pourquoi on parle souvent d'arborisation dendritique. Les dendrites constituent le pole récepteur de la cellule et c'est à cet endroit que vont se faire les connexions avec les autres neurones.
- La synapse : C'est une jonction entre deux neurones généralement (car il existe des synapses axo-axonales par exemple) entre l'axone d'un neurone et une dendrite d'un autre neurone.

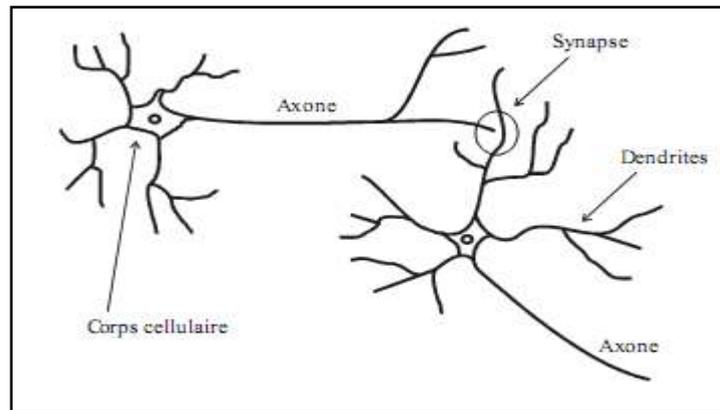


Figure II-1 : Neurone biologique. [35]

II-2-2 Neurone formel

La figure suivante montre comment on passe d'un neurone biologique à un neurone formel. Chaque élément du neurone biologique est assimilé un élément dans le neurone formel.

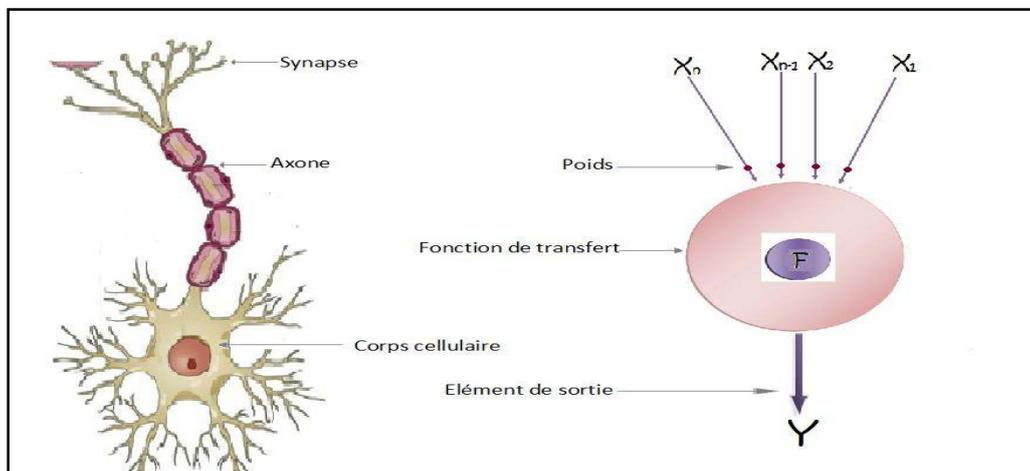


Figure II-2 : Passage du neurone biologique au neurone formel.

Un neurone formel est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres suivants [34]:

- Entrées (X_i) : directement les entrées du système ou peuvent provenir d'autres neurones.
- Biais (b) : entrée toujours à 1, qui permet d'ajouter de la flexibilité au réseau en permettant de varier le seuil de déclenchement du neurone par l'ajustement du poids du biais lors de l'apprentissage.
- Poids (W_i) : facteurs multiplicateurs qui affectent l'influence de chaque entrée sur la sortie du neurone. Le poids W_i est un coefficient qui caractérise la liaison entre un neurone et un autre.
- Fonction d'activation (f) : La fonction d'activation (ou fonction de seuillage, ou encore fonction de transfert) sert à introduire une non-linéarité dans le fonctionnement du neurone. Les fonctions de seuillage présentent généralement trois intervalles :
 - En dessous du seuil, le neurone est souvent non-actif dans ce cas, sa sortie vaut 0 ou -1.
 - Aux alentours du seuil, une phase de transition.
 - Au dessus du seuil, le neurone est souvent actif dans ce cas, sa sortie vaut 1.
- Sortie (Y) : Directement une des sorties du système où peut être distribuée vers d'autres neurones.

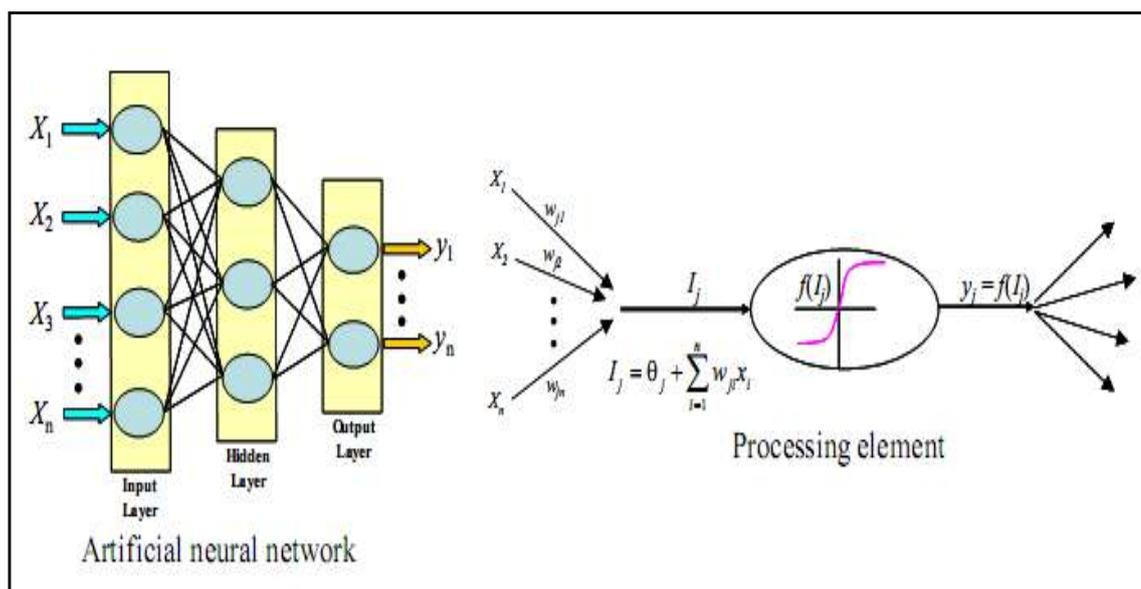


Figure II-3 : structure typique du réseau de neurones. [36]

II-3 Architecture des réseaux de neurones

On distingue deux structures de réseau, en fonction du graphe de leurs connexions, c'est-à-dire du graphe dont les nœuds sont les neurones et les arêtes les «connexions» entre ceux-ci [37] :

- Les réseaux de neurones statiques (ou acycliques, ou non bouclés).
- Les réseaux de neurones dynamiques (ou récurrents, ou bouclés).

II-3-1 Les réseaux de neurones non bouclés

Un réseau de neurones non bouclé réalise une (ou plusieurs) fonction algébrique de ses entrées par composition des fonctions réalisées par chacun de ses neurones. Dans un tel réseau (figure II-4), le flux d'information circule des entrées vers les sorties sans retour en arrière. Si l'on représente le réseau comme un graphe dont les nœuds sont les neurones et les arêtes les «connexions» entre ceux-ci, le graphe d'un réseau non bouclé est acyclique. Tout neurone dont la sortie est une sortie du réseau est appelé «neurone de sortie». Les autres, qui effectuent des calculs intermédiaires, sont des «neurones cachés».

Dans un réseau de neurones non bouclé, le temps ne joue aucun rôle fonctionnel : si les entrées sont constantes, les sorties le sont également. Le temps nécessaire pour le calcul de la fonction réalisée par chaque neurone est négligeable et on peut considérer ce calcul comme instantané.

Pour cette raison, les réseaux non bouclés sont souvent appelés «réseaux statiques», par opposition aux réseaux bouclés ou «dynamiques». Ils sont utilisés en classification, reconnaissance des formes (caractères, parole, ...), en prédiction.

Il existe deux types de réseaux de neurones : les réseaux complètement connectés et les réseaux à couche. Le réseau de neurones à une couche cachée et une sortie linéaire est un cas particulier de ce dernier type [40].

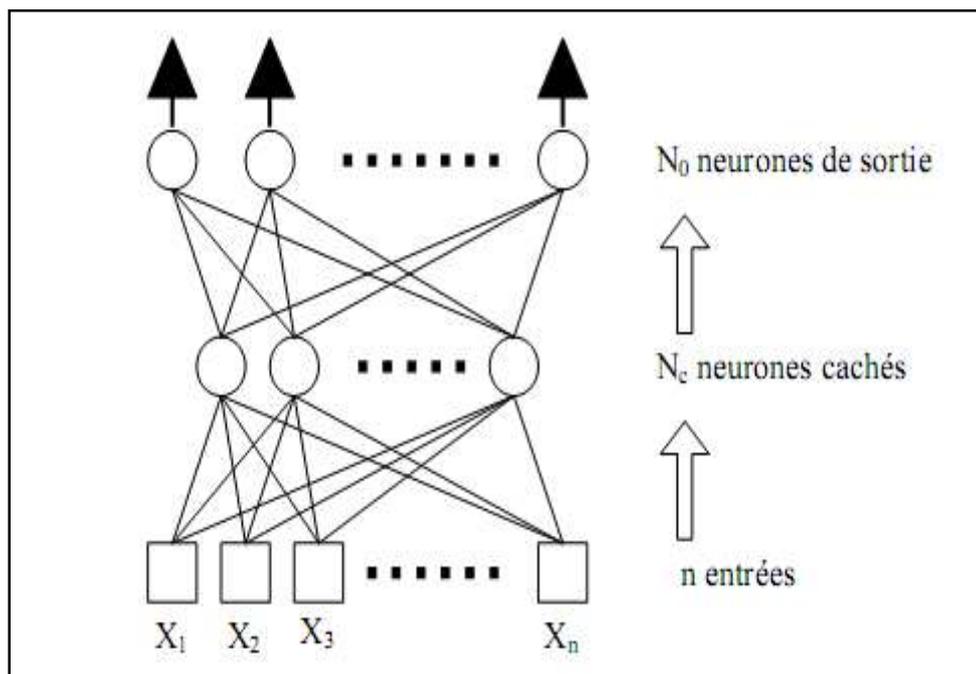


Figure II-4 : Réseau de neurones à n entrées, une couche de N_c neurones cachés et N_0 neurones de sortie. [37]

II-3-1-1 Les réseaux de neurones complètement connectés

Dans un réseau complètement connecté, les entrées puis les neurones (cachés et de sortie) sont numérotés, et, pour chaque neurone [37]:

Ses entrées sont toutes les entrées du réseau ainsi que les sorties des neurones de numéro inférieur. Sa sortie est connectée aux entrées de tous les neurones de numéro supérieur.

II-3-1-2 Les réseaux de neurones à couches

Dans une architecture de réseaux à couches, les neurones cachés sont organisés en couches, les neurones d'une même couche n'étant pas connectés entre eux. De plus les connexions entre deux couches de neurones non consécutives sont éliminées. Une telle architecture est historiquement très utilisée, surtout en raison de sa pertinence en classification [37].

II-3-2 Les réseaux de neurones bouclés

L'architecture la plus générale pour un réseau de neurones est le « réseau bouclé », dont le graphe des connexions est cyclique : lorsqu'on se déplace dans le réseau en suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ (un tel chemin est désigné sous le terme de cycle). La sortie d'un neurone du réseau peut donc être fonction d'elle-même; cela n'est évidemment concevable que si la notion de temps est explicitement prise en considération.

Ainsi, à chaque connexion d'un réseau de neurones bouclé (ou à chaque arête de son graphe) est attaché, outre un poids comme pour les réseaux non bouclés, un retard, multiple entier (éventuellement nul) de l'unité de temps choisie. Une grandeur, à un instant donné, ne pouvant pas être fonction de sa propre valeur au même instant, tout cycle du graphe du réseau doit avoir un retard non nul. Les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Ces connexions sont le plus souvent locales.

Pour éliminer le problème de la détermination de l'état du réseau par bouclage, on introduit sur chaque connexion « en retour » un retard qui permet de conserver le mode de fonctionnement séquentiel du réseau (figure II-5) [37].

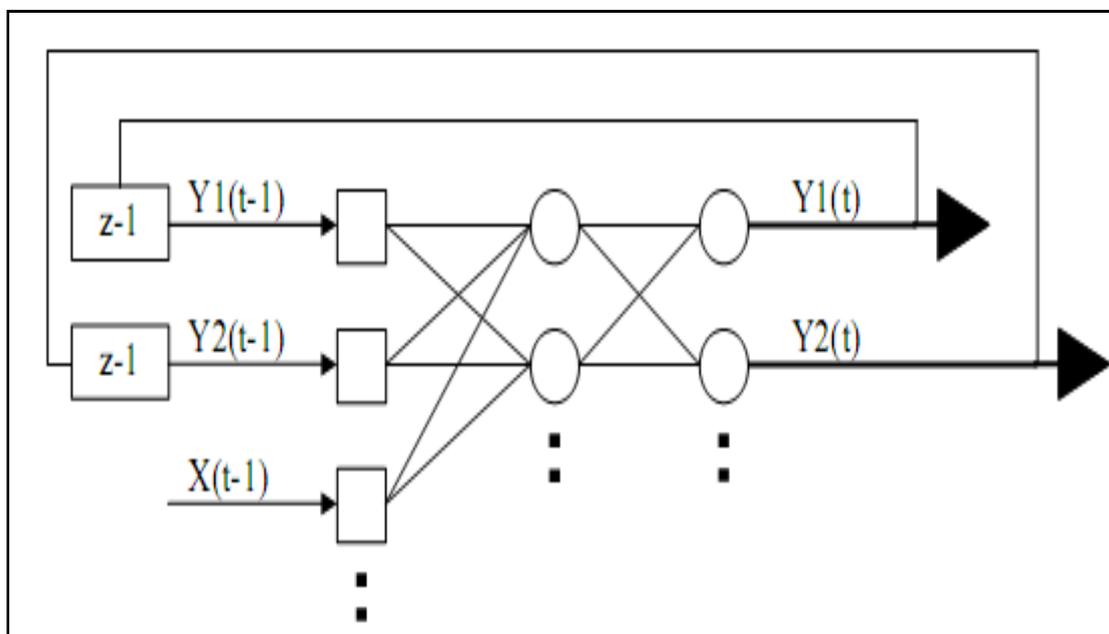


Figure II-5 : Réseau de neurone bouclé. [37]

Le graphe des connexions de réseaux récurrents est cyclique. Ces réseaux sont décrits par un système d'équations aux différences.

II-4 Apprentissage des réseaux de neurones

Le point crucial du développement d'un réseau de neurones est son apprentissage. Il s'agit d'une procédure adaptative par laquelle les connexions des neurones sont ajustées face à une source d'information [38]. Dans le cas des réseaux de neurones artificiels, on ajoute souvent à la description du modèle l'algorithme d'apprentissage. Le modèle sans apprentissage présente en effet peu d'intérêt.

Dans la majorité des algorithmes actuels, les variables modifiées pendant l'apprentissage sont les poids des connexions. L'apprentissage est la modification des poids du réseau dans l'optique d'accorder la réponse du réseau aux exemples et à l'expérience. Les poids sont initialisés avec des valeurs aléatoires. Puis des exemples expérimentaux représentatifs du fonctionnement du procédé dans un domaine donné, sont présentés au réseau de neurones. Ces exemples sont constitués de couples expérimentaux de vecteurs d'entrée et de sortie. Une méthode d'optimisation modifie les poids au fur et à mesure des itérations pendant lesquelles on présente la totalité des exemples, afin de minimiser l'écart entre les sorties calculées et les sorties expérimentales. Afin d'éviter les problèmes de sur-apprentissage, la base d'exemples est divisée en deux parties : la base d'apprentissage et la base de test. L'optimisation des poids se fait sur la base d'apprentissage, mais les poids retenus sont ceux pour lesquels l'erreur obtenue sur la base de test est la plus faible. En effet, si les poids sont optimisés sur tous les exemples de l'apprentissage, on obtient une précision très satisfaisante sur ces exemples mais on risque de ne pas pouvoir généraliser le modèle à des données nouvelles. A partir d'un certain nombre d'itérations, le réseau ne cherche plus l'allure générale de la relation entre les entrées et les sorties du système, mais s'approche trop près des points et « apprend » le bruit [37]. Sur la figure II-6 ci-dessous, on peut observer qu'au début de l'apprentissage, pour les premières itérations, l'erreur sur la base d'apprentissage est grande et peut légèrement augmenter étant donné que les poids initiaux sont choisis aléatoirement. Ensuite, cette erreur diminue avec le nombre d'itérations. L'erreur sur la base de test diminue puis augmente à partir d'un certain nombre d'itérations. Les poids retenus sont ceux qui minimisent l'erreur sur la base de test [37].

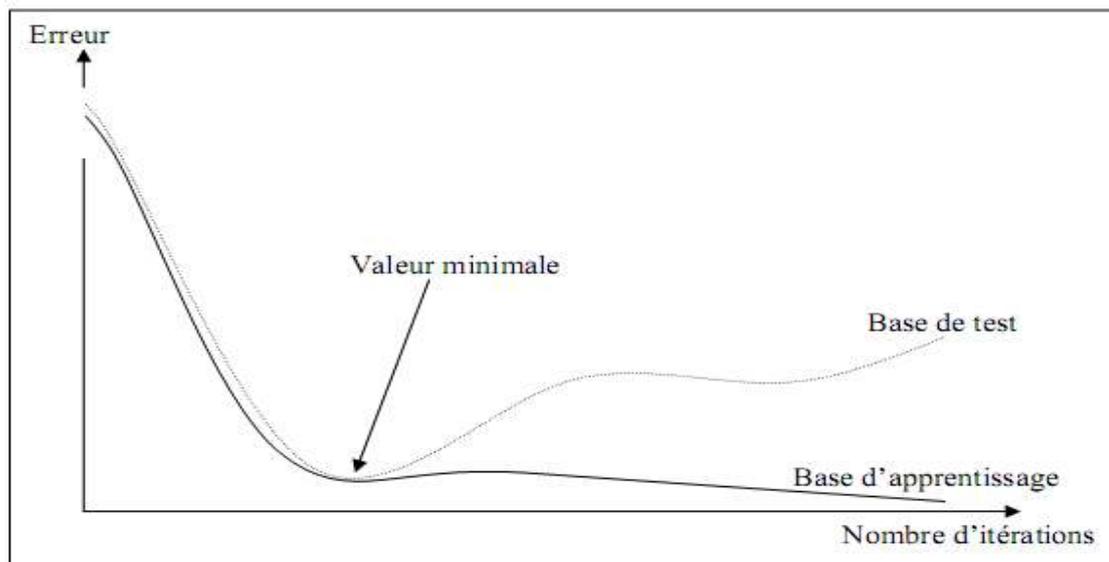


Figure II-6 : Erreur moyenne sur la base d'apprentissage en fonction du nombre d'itérations. [37]

- Sur apprentissage

Il arrive qu'à faire apprendre un réseau de neurones toujours sur le même échantillon, celui-ci devient inapte à reconnaître autre chose que les éléments présents dans l'échantillon. Le réseau ne cherche plus l'allure générale de la relation entre les entrées et les sorties du système, mais cherche à reproduire les allures de l'échantillon. On parle alors de sur apprentissage : le réseau est devenu trop spécialisé et ne généralise plus correctement.

Ce phénomène apparaît aussi lorsqu'on utilise trop d'unités cachées (de connexions), la phase d'apprentissage devient alors trop longue (trop de paramètres réglables dans le système) et les performances du réseau en généralisation deviennent médiocres.

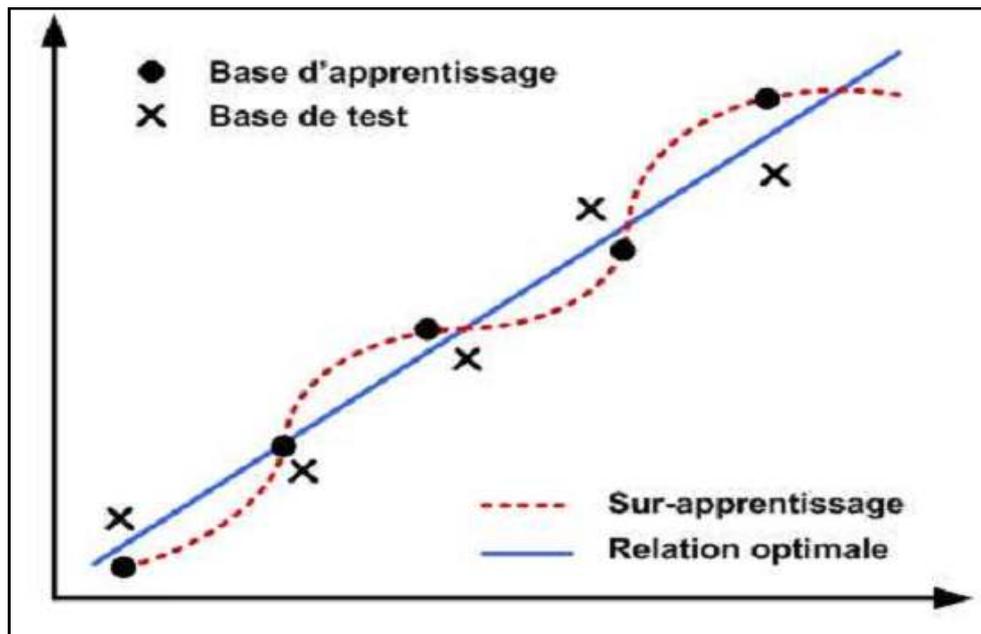


Figure II-7 : Phénomène de sur-apprentissage. [39]

II-4-1 Type d'apprentissage

Il existe de nombreux types de règles d'apprentissage qui peuvent être regroupées en trois catégories: les règles d'apprentissage supervisé, non supervisé, et renforcé. Mais l'objectif fondamental de l'apprentissage reste le même : soit la classification, l'approximation de fonction ou encore la prévision. Dans l'optique de la prévision, l'apprentissage consiste à extraire des régularités (à partir des exemples) qui peuvent être transférées à de nouveaux exemples [37].

II-4-1-1 Apprentissage supervisé

Un apprentissage est dit supervisé lorsque l'on force le réseau à converger vers un état final précis, en même temps qu'on lui présente un motif. Ce genre d'apprentissage est réalisé à l'aide d'une base d'apprentissage, constituée de plusieurs exemples de type entrées-sorties (les entrées du réseau et les sorties désirées ou encore les solutions souhaitées pour l'ensemble des sorties du réseau).

La procédure usuelle dans le cadre de la prévision est l'apprentissage supervisé (ou à partir d'exemples) qui consiste à associer une réponse spécifique désirée à chaque signal d'entrée. La modification des poids s'effectue progressivement jusqu'à ce que l'erreur (ou l'écart) entre les sorties du réseau (ou résultats calculés) et les résultats désirés soient minimisés.

Cet apprentissage n'est possible que si un large jeu de données est disponible et si les solutions sont connues pour les exemples de la base d'apprentissage. [37]

II-4-1-2 Apprentissage renforcé

L'apprentissage renforcé est une technique similaire à l'apprentissage supervisé à la différence qu'au lieu de fournir des résultats désirés au réseau, on lui accorde plutôt un grade (ou score) qui est une mesure du degré de performance du réseau après quelques itérations. Les algorithmes utilisant la procédure d'apprentissage renforcé sont surtout utilisés dans le domaine des systèmes de contrôle [37].

II-4-1-3 Apprentissage non supervisé

L'apprentissage non supervisé consiste à ajuster les poids à partir d'un seul ensemble d'apprentissage formé uniquement de données. Aucun résultat désiré n'est fourni au réseau. Qu'est-ce que le réseau apprend exactement dans ce cas ? L'apprentissage consiste à détecter les similarités et les différences dans l'ensemble d'apprentissage. Les poids et les sorties du réseau convergent, en théorie, vers les représentations qui capturent les régularités statistiques des données. Ce type d'apprentissage est également dit compétitif et (ou) coopératif. L'avantage de ce type d'apprentissage réside dans sa grande capacité d'adaptation reconnue comme une auto organisation. L'apprentissage non supervisé est surtout utilisé pour le traitement du signal et l'analyse factorielle [37].

II-4-2 Algorithme d'apprentissage

L'algorithme d'apprentissage est la méthode mathématique qui va modifier les poids de connexions afin de converger vers une solution qui permettra au réseau d'accomplir la tâche désirée. L'apprentissage est une méthode d'identification paramétrique qui permet d'optimiser les valeurs des poids du réseau.

Plusieurs algorithmes itératifs peuvent être mis en œuvre, parmi lesquels on note : l'algorithme de rétropropagation, la Méthode Quasi-Newton, Algorithme de BFGS etc.

L'algorithme de rétro propagation (ARP) ou de propagation arrière « backpropagation » est l'exemple d'apprentissage supervisé le plus utilisé à cause de l'écho médiatique de certaines applications spectaculaires telles que la démonstration de Sejnowski et Rosenberg dans laquelle l'ARP est utilisé dans un système qui apprend à lire un texte. Un autre succès fut la prédiction des cours du marché boursier et plus récemment la détection de la fraude dans les opérations par cartes de crédit.

La technique de rétropropagation du gradient (Backpropagation en anglais) est une méthode qui permet de calculer le gradient de l'erreur pour chaque neurone du réseau, de la dernière couche vers la première. L'historique des publications montre que l'ARP a été découvert indépendamment par différents auteurs mais sous différentes appellations. Le principe de la rétropropagation peut être décrit en trois étapes fondamentales : acheminement de l'information à travers le réseau; rétropropagation des sensibilités et calcul du gradient; ajustement des paramètres par la règle du gradient approximé. Il est important de noter que l'ARP souffre des limitations inhérentes à la technique du gradient à cause du risque d'être piégé dans un minimum local. Il suffit que les gradients ou leurs dérivées soient nuls pour que le réseau se retrouve bloqué dans un minimum local.

Ajoutons à cela la lenteur de convergence surtout lorsqu'on traite des réseaux de grande taille (c'est à dire pour lesquels le nombre de poids de connexion à déterminer est important) [37].

II-5 Conception d'un réseau de neurones

Les réseaux de neurones réalisent des fonctions non linéaires paramétrées. Leurs mises en œuvre nécessitent [37]:

- La détermination des entrées et des sorties pertinentes, c'est à dire les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser.
- La collecte des données nécessaires à l'apprentissage et à l'évaluation des performances du réseau de neurones.
- La détermination du nombre de neurones cachés nécessaires pour obtenir une approximation satisfaisante.
- La réalisation de l'apprentissage
- L'évaluation des performances du réseau de neurones à l'issue de l'apprentissage.

II-5-1 Détermination des entrées/sorties du réseau de neurones

Pour toute conception de modèle, la sélection des entrées doit prendre en compte deux points essentiels :

- Premièrement, la dimension intrinsèque du vecteur des entrées doit être aussi petite que possible, en d'autre terme, la représentation des entrées doit être la plus compacte possible, tout en conservant pour l'essentiel la même quantité d'information, et en gardant à l'esprit que les différentes entrées doivent être indépendantes.
- En second lieu, toutes les informations présentées dans les entrées doivent être pertinentes pour la grandeur que l'on cherche à modéliser : elles doivent donc avoir une influence réelle sur la valeur de la sortie [37].

II-5-2 Choix et préparation des échantillons

Le processus d'élaboration d'un réseau de neurones commence toujours par le choix et la préparation des échantillons de données. La façon dont se présente l'échantillon conditionne le type de réseau, le nombre de cellules d'entrée, le nombre de cellules de sortie et la façon dont il faudra mener l'apprentissage, les tests et la validation (Bishop, 1995). Il faut donc déterminer les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser. Lorsque la grandeur que l'on veut modéliser dépend de nombreux facteurs, c'est-à-dire lorsque le modèle possède de nombreuses entrées, il n'est pas possible de réaliser un « pavage » régulier dans tout le domaine de variation des entrées : il faut donc trouver une méthode permettant de réaliser uniquement des expériences qui apportent une information significative pour l'apprentissage du modèle. Cet objectif peut être obtenu en mettant en œuvre un plan d'expériences. Pour les modèles linéaires, l'élaboration de plans d'expériences [37].

II-5-3 Elaboration de la structure du réseau

La structure du réseau dépend étroitement du type des échantillons. Il faut d'abord choisir le type de réseau : un perceptron standard, un réseau de Hopfield, un réseau à décalage temporel (TDNN), un réseau de Kohonen, un ARTMAP etc... Par exemple, dans le cas du perceptron

multicouches, il faudra aussi bien choisir le nombre de couches cachées que le nombre de neurones dans cette couche [37].

II-5-3-1 Nombre de couches cachées :

Mis à part les couches d'entrée et de sortie, il faut décider du nombre de couches intermédiaires ou cachées. Sans couche cachée, le réseau n'offre que de faibles possibilités d'adaptation. Néanmoins, il a été démontré qu'un Perceptron Multicouches avec une seule couche cachée pourvue d'un nombre suffisant de neurones, peut approximer n'importe quelle fonction avec la précision souhaitée est bien maîtrisée, par ailleurs, ce n'est pas le cas pour les modèles non linéaires.

Afin de développer une application à base de réseaux de neurones, il est nécessaire de disposer de deux bases de données, une pour effectuer l'apprentissage et l'autre pour tester le réseau obtenu et déterminer ses performances. Notons qu'il n'y a pas de règle pour déterminer ce partage d'une manière quantitative, néanmoins chaque base doit satisfaire aux contraintes de représentativité de chaque classe de données et doit généralement refléter la distribution réelle, c'est à dire la probabilité d'occurrence des diverses classes [37].

II-5-3-2 Nombre de neurones cachés :

Chaque neurone peut prendre en compte des profils spécifiques de neurones d'entrée. Un nombre plus important permet donc de mieux "coller" aux données présentées mais diminue la capacité de généralisation du réseau. Il faut alors trouver le nombre adéquat de neurones cachés nécessaire pour obtenir une approximation satisfaisante. Il n'existe pas, à ce jour, de résultat théorique permettant de prévoir le nombre de neurones cachés nécessaires pour obtenir une performance spécifique du modèle, compte tenu des modèles disponibles. Il faut donc nécessairement mettre en œuvre une procédure numérique de conception de modèle [37].

II-5-4 Elaboration de la structure du réseau

La structure du réseau dépend étroitement du type des échantillons. Il faut d'abord choisir le type de réseau : un perceptron standard, un réseau de Hopfield, un réseau à décalage temporel (TDNN), un réseau de Kohonen, un ARTMAP etc... Par exemple, dans le cas du perceptron multicouches, il faudra aussi bien choisir le nombre de couches cachées que le nombre de neurones dans cette couche [37].

II-5-4-1 Nombre de couches cachées :

Mis à part les couches d'entrée et de sortie, il faut décider du nombre de couches intermédiaires ou cachées. Sans couche cachée, le réseau n'offre que de faibles possibilités d'adaptation. Néanmoins, il a été démontré qu'un Perceptron Multicouches avec une seule couche cachée pourvue d'un nombre suffisant de neurones, peut approximer n'importe quelle fonction avec la précision souhaitée [37].

II-5-4-2 Nombre de neurones cachés :

Chaque neurone peut prendre en compte des profils spécifiques de neurones d'entrée. Un nombre plus important permet donc de mieux "coller" aux données présentées mais diminue la capacité de généralisation du réseau. Il faut alors trouver le nombre adéquat de neurones cachés nécessaire pour obtenir une approximation satisfaisante. Il n'existe pas, à ce jour, de résultat théorique permettant de prévoir le nombre de neurones cachés nécessaires pour obtenir une performance spécifique du modèle, compte tenu des modèles disponibles. Il faut donc nécessairement mettre en œuvre une procédure numérique de conception de modèle [37].

II-5-5 Apprentissage

L'apprentissage est un problème numérique d'optimisation. Il consiste à calculer les pondérations optimales des différentes liaisons, en utilisant un échantillon. La méthode la plus utilisée est la rétropropagation, qui est généralement plus économe que les autres en termes de nombres d'opérations arithmétiques à effectuer pour évaluer le gradient.

Pour rendre l'optimisation plus performante, on peut utiliser des méthodes de second ordre. Le calcul est très efficace, mais lourd. Elles ont de nombreuses limitations, quant aux conditions de convergence, sur les dérivées secondes. Des corrections sont proposées pour éviter ce problème, et sont prises en compte par les méthodes dites de Quasi-Newton ou de Newton modifiée.

Il a été observé que les poids calculés par la méthode de rétropropagation sont plus faibles que ceux obtenus par la technique de Quasi-Newton, ce qui semblerait montrer que la recherche d'un minimum par rétropropagation est restreinte à un voisinage immédiat des poids initiaux, d'où une dépendance plus forte de cette méthode par rapport à l'initialisation. C'est pour ces raisons que l'optimisation par une méthode Quasi-Newton a été largement utilisée dans certains travaux récents de modélisation de procédés de génie chimique, et a été choisie également dans la suite de nos travaux [37].

II-5-6 Validation et Tests

Alors que les tests concernent la vérification des performances d'un réseau de neurones hors échantillon et sa capacité de généralisation, la validation est parfois utilisée lors de l'apprentissage. Une fois le réseau de neurones développé, des tests s'imposent afin de vérifier la qualité des prévisions du modèle neuronal. Cette dernière étape doit permettre d'estimer la qualité du réseau obtenu en lui présentant des exemples qui ne font pas partie de l'ensemble d'apprentissage. Une validation rigoureuse du modèle développé se traduit par une proportion importante de prédictions exactes sur l'ensemble de la validation. Si les performances du réseau ne sont pas satisfaisantes, il faudra, soit modifier l'architecture du réseau, soit modifier la base d'apprentissage [37].

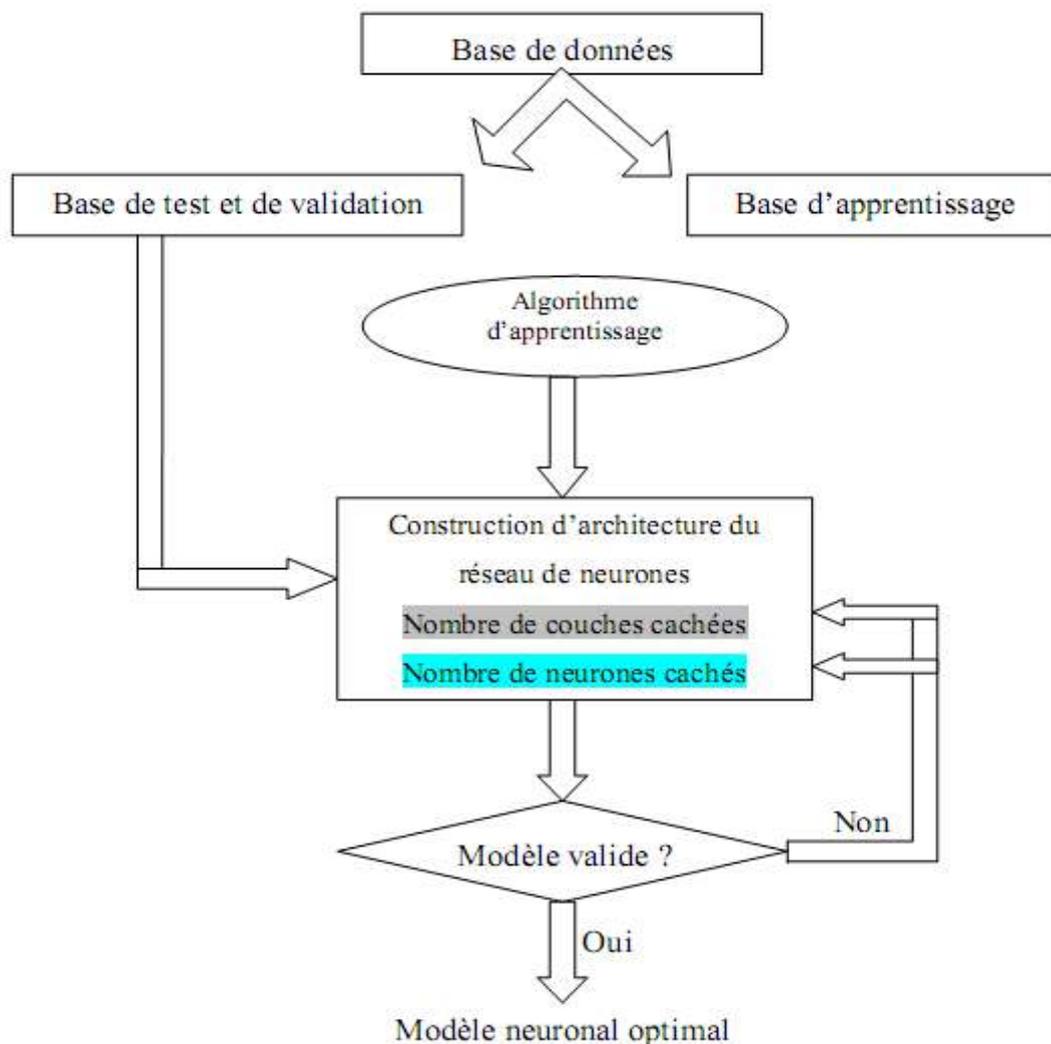


Figure II-8 : Organigramme de conception d'un réseau de neurones [37].

II- 6 Application des réseaux de neurones en génie civil

Les applications des réseaux de neurones en génie civil ont connu une large utilisation dans les années 1990. Récemment les réseaux de neurones sont appliqués pour concevoir des solutions dans plusieurs domaines tels que structures, géotechnique, et matériaux. Certaines de ces applications développées ont utilisé le type de réseaux de neurones Hopfield tandis que la majorité a utilisé le réseau multicouche.

II-6-1 Application des réseaux de neurones en géotechnique

Pour des applications en géotechnique, un nombre significatif de systèmes ont été développés pour la caractérisation des sites, la classification des sols et des roches, les fondations, les structures retenues sur terre et pentes, les tunnels et les ouvertures souterraines, la liquéfaction, les améliorations au sol et pour les barrages [41].

Teh et al [42] proposent trois modèles de RPG des réseaux de neurones pour estimer la capacité statique des pieux. Nawari et al. [43] ont développé les modèles optimaux de réseaux de neurones en utilisant seulement des données incluant des valeurs de l'essai de pénétromètre dynamique et les propriétés géométriques pour simuler le comportement des pieux axialement et latéralement chargés.

Les problèmes de la liquéfaction sont également résolus en utilisant la technique des réseaux de neurones. Ural et Saka [44] prouvent que les réseaux de neurones sont des outils informatiques puissants pour analyser le rapport complexe entre le sol et les paramètres sismiques dans l'analyse de liquéfaction.

II- 6-2 Application des réseaux de neurones en technologie des bétons et matériaux

Dans ce domaine, plusieurs recherches et études concernant l'utilisation des systèmes de réseaux de neurones notamment pour la prédiction de la résistance en compression des bétons ordinaires et à hautes performances. Par exemple, Kasperkiewicz et al en 1995 [45] ont utilisé les réseaux de neurones artificiels pour déterminer la composition d'un béton à haute performance en utilisant la technique de Carpenter et al des réseaux de neurones à résonance adaptative. Plusieurs chercheurs [46,47,48,49,50] ont publié peu de temps après des articles sur l'utilisation des réseaux de neurones pour la prédiction de la résistance d'une composition de béton. Par exemple, Yeh [51] a utilisé un perceptron multi couches (PMC) pour estimer l'évolution des résistances en compression de bétons à hautes performances (BHP). Le PMC développé est constitué de 8 paramètres d'entrée (quantités de ciment, de granulats, d'eau, de cendres volantes, d'adjuvants...), une couche cachée de 8 neurones et une sortie (la résistance en compression du BHP). L'apprentissage du PMC a été réalisé sur 727 données. Dans le même contexte, Guang et Zong utilisent le même type de RNA pour prédire la résistance en compression des bétons. En 2001, Dias et Pooliyadda [52] ont aussi confirmé la capacité des RNA et en particulier du PMC à prédire la résistance en compression et l'affaissement des bétons. Sbartaï [53] a développé deux PMC dédiés à l'évaluation des teneurs en eau et en chlorures de dalles de bétons de laboratoire. Le PMC développé pour prédire la teneur en eau est constitué de 3 entrées (atténuation du signal direct, atténuation du signal réfléchi par la face opposée de la dalle et délai du signal réfléchi), une couche cachée de 5 neurones et un neurone de sortie. Le second PMC utilise en entrée la teneur en eau prédite par le premier PMC en plus des informations citées ci-dessus. Les performances de ces 2 modèles sont globalement satisfaisantes, cependant leur validité est limitée à la géométrie des dalles de laboratoire réalisées.

Récemment en 2006, Öztas et al. [54] ont entraîné un PMC pour prédire aussi la résistance en compression et l'affaissement des bétons à hautes performances.

II-6-3 Prédiction du comportement des structures par les réseaux de neurones

Ce domaine démontre le potentiel d'utilisation des réseaux de neurones pour l'analyse des problèmes structuraux simples et complexes. Ces problèmes concernent le calcul, la conception, le dimensionnement etc. Bhokha [55] traite un problème d'analyse simple celui de la détermination du moment de flexion d'une poutre. Khaldoun et al [56] applique les réseaux de neurones pour le calcul de la résistance au cisaillement des poutres en béton armé. Sanad et Saka [57] utilisent les réseaux de neurones pour la conception des structures en béton armé.

D'autres problèmes concernant l'optimisation et l'analyse elasto-plastique des structures ont été résolus par une combinaison des réseaux de neurones avec d'autres méthodes de simulation telle que la méthode des évolutions des stratégies et celle de Monté Carlo [58,59]. Ainsi des problèmes d'analyses dynamiques après un séisme sont résolus par les réseaux de neurone tel que la détermination de la réponse dynamique d'une coque conique en basant sur un contrôle de vibration [60].

D'autres parts, les réseaux de neurones peuvent être appliqués aux problèmes de diagnostic. Yeh et al [61] ont établi un système expert basé sur la connaissance combiné avec un réseau de

neurones pour diagnostiquer des piles de pont. Basma et al [62] ont utilisé les réseaux de neurones pour l'évaluation de l'état des trottoirs. Wong et al [63] utilisent également les réseaux de neurones pour la détection des dommages directement après un séisme. Sdhabhon [64] a appliqué les réseaux de neurones pour la prévision du cout et la durée des structures dans une phase de pré-conception.

Les RNA dans le domaine du contrôle non destructif en génie civil (CND) sont de plus en plus utilisés du fait de leur capacité à résoudre des problèmes d'optimisation, de modélisation, d'aide à la décision, de prédiction et de détection de défauts. Dans ce contexte, plusieurs chercheurs mettent en œuvre les RNA notamment pour le traitement de données de CND [39]. Par exemple, l'utilisation des réseaux de neurones a permis à Liu et al [65] d'identifier et de classifier de la fissuration par une technique ultrasonore. L'apprentissage de leur PMC est réalisé sur la base des résultats de simulations numériques (éléments finis) de propagation d'ultrasons en milieux fissurés. Par ailleurs, Hola et Schabowicz [66] fusionnent trois méthodes non destructives (ultrasons, marteau de Schmidt, impact echo) pour la prédiction de la résistance en compression du béton en laboratoire et in situ. Dans une autre étude [67], la vitesse d'impulsions d'ultrasonores est utilisée en entrée d'un PMC pour prédire la résistance en compression de bétons.

Les réseaux de neurones ont aussi été utilisés pour estimer la capacité portante (moment de flexion, cisaillement, adhérence,...) de structures en béton armé ou précontraint. Par exemple, Mansour et al.[68] ont utilisé un perceptron multicouches (PMC) pour prédire la résistance ultime au cisaillement de poutres en béton armé. Les auteurs ont utilisé 9 entrées (la résistance en compression du béton, les dimensions de la poutre, le rapport entre armatures longitudinales et transversales...), 3 neurones en couche cachée et une sortie (la résistance au cisaillement). Les auteurs ont confirmé la faisabilité de la mise en œuvre des réseaux de neurones pour résoudre les problèmes de prédiction des charges de ruine. En 2005, Sakla et Ashour [69] ont aussi utilisé un PMC pour estimer l'ancrage des armatures dans le béton. Inel [70] a également utilisé un PMC pour estimer la capacité de chargement de poteaux en béton armé.

Nous exposons dans cette partie un exemple de problème de conception des structures traité récemment par les réseaux de neurones.

II-7 Exemple d'application des réseaux de neurones

Une étude a été faite par K. Ramanjaneyulu et V. Srinivas [71] dans le but d'explorer la possibilité d'utiliser les réseaux de neurones artificiels pour obtenir des réponses de conception d'un type particulier des tabliers des ponts (à poutres en T).

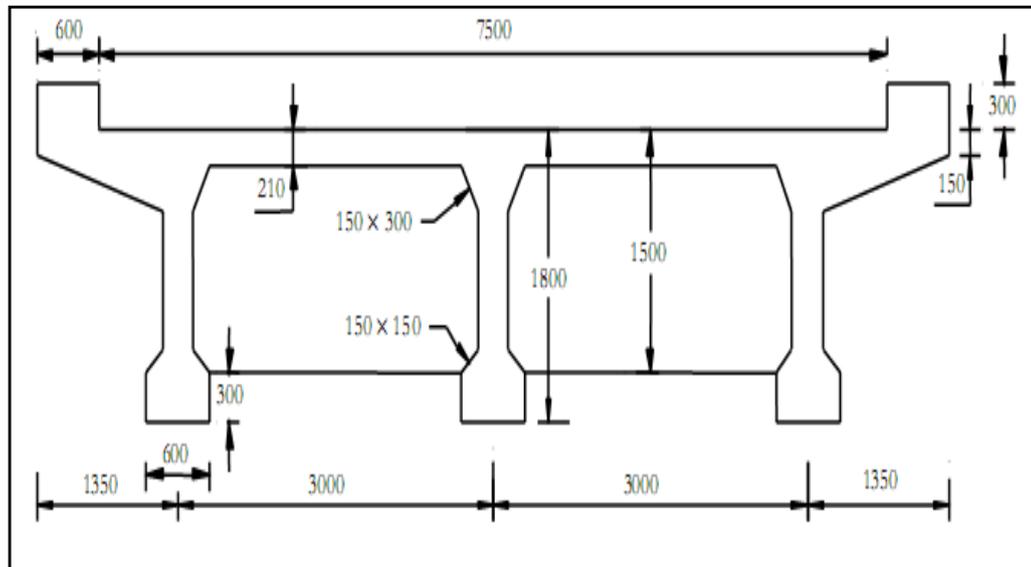


Figure II-9 : sections des poutres en T formant le tablier du pont [71].

Plusieurs modèles de réseaux de neurones ont été développés pour cette étude. Pour la phase d'apprentissage 54 exemples ont été collectés pour former la base de données dont 10 exemples ont été choisis pour l'évaluation des résultats de cette étape.

Le nombre de couches cachées et neurones associés à chaque couche a été choisi après plusieurs essais. La figure ci après illustre la variation de l'erreur en fonction du nombre d'éléments traités dans les couches cachées.

Il a été observé que le réseau de neurone avec une seule couche cachée de 10 neurones donne des réponses de conception avec le plus petit pourcentage d'erreur.

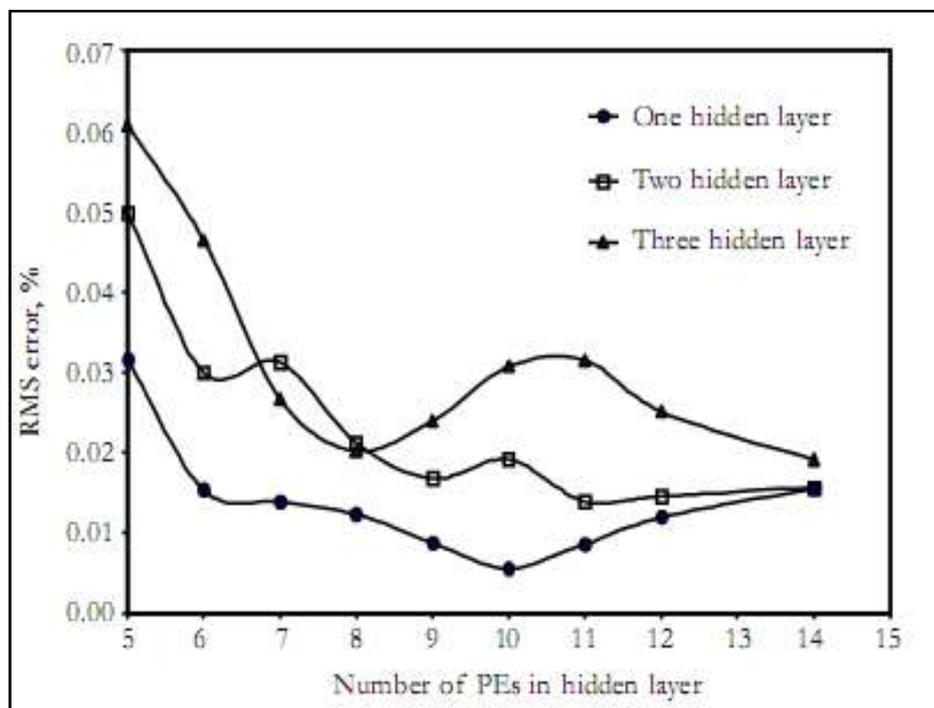


Figure II-10 : Variation de l'erreur en fonction des éléments traités dans chaque couche cachée.[71]

En récapitulatif, le réseau adopté pour cette étude est celui de Feed-Forward à trois couches (03) comme le montre la figure ci après, il a été formé de 12 entrées, une couche cachée de dix (10) neurones et quatre (04) sorties.

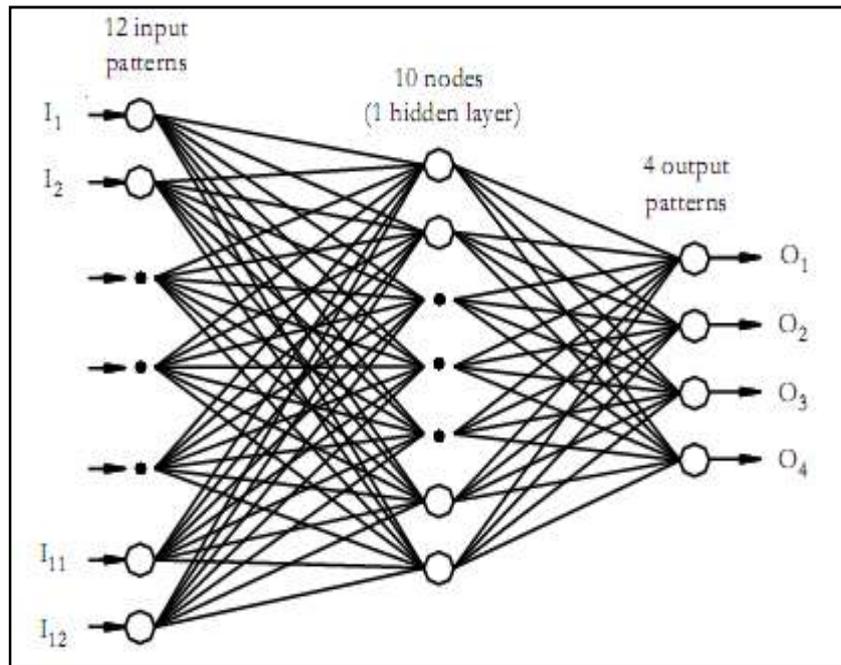


Figure II-11 : Architecture du réseau adoptée. [71]

La variation du taux de l'erreur en fonction du nombre d'itération pour un taux constant et variable d'apprentissage est présentée sur la figure suivante :

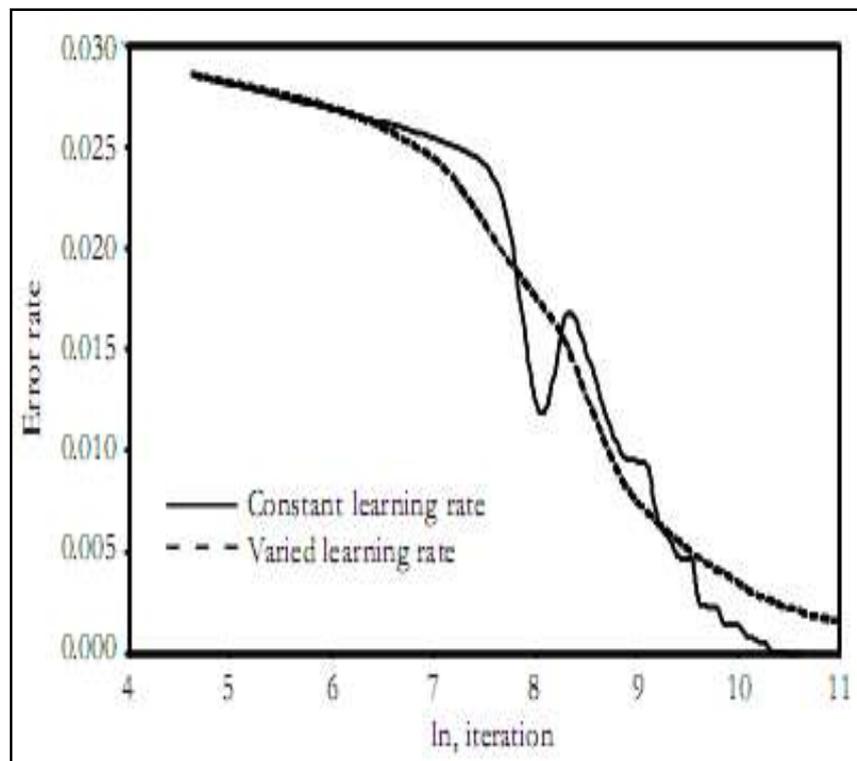


Figure II-12 : Variation de l'erreur en fonction du nombre d'itération. [71]

A partir de cette figure, il a été observé qu'avec un taux d'apprentissage varié les résultats sont plus performants et la convergence de la courbe est plus rapide.

Après avoir tester et valider les résultats d'apprentissage du réseau de neurones, l'erreur constatée entre les sorties désirées et les sorties du modèle est moins de 4%, ce qui confirme la fiabilité de l'architecture choisie ainsi que l'efficacité d'utilisation des réseaux de neurones dans la conception des tabliers des ponts.

II-8 Conclusion

Nous avons tenté de montrer par cette revue bibliographique, en exposant les recherches récentes, que les réseaux de neurones et par leurs capacités d'apprentissage, de généralisation, de traitement parallèle et d'approximation peuvent rendre des services considérables dans des domaines très variés du génie civil (structures, géotechnique, béton etc.), dont la majorité des modèles de réseaux de neurones utilisés par les chercheurs sont les plus connus dans l'intelligence artificielle ceux du réseaux multicouches à rétro propagation. Les résultats de ces recherches prouvent que les réseaux de neurones surpassent les techniques empiriques et statiques et les approches conventionnelles qui sont actuellement utilisées. Ceux-ci se conforment aux besoins de développer un réseau de neurones pour prédire le comportement des ponts réparés par collage des fibres de carbone en cas de séisme en espérant que ce dernier puisse être utilisé pour palier aux insuffisances des modèles numériques.

Chapitre III

Prédiction Du Comportement Des Ponts Par Les Réseaux De Neurones

Chapitre III

Prévision du comportement des ponts par les réseaux de neurones

III-1 Préambule

Ce chapitre décrit la méthodologie, la description et l'application des modèles des réseaux de neurones choisis pour l'évaluation du comportement dynamique d'un ensemble de ponts se trouvant à la wilaya d'Alger qui est connue par une forte sismicité (zone III), par le calcul des périodes propres de vibrations, avant et après, renforcement par matériaux composites.

Cette partie de la thèse est organisée de la façon suivante : un premier paragraphe décrit l'élaboration des bases d'apprentissage et de test, un deuxième volet développe le réseau de neurones utilisé dans cette étude et une troisième partie présente les résultats obtenus, puis certains commentaires et confrontations sont développées.

III-2 Problématique

Comme il a été traité dans la partie bibliographique, un pont est toujours en mode de vibration sous l'effet de plusieurs facteurs dont on cite le séisme.

L'objectif de ce travail est de prédire le comportement dynamique des ponts se situant dans une zone de forte ou moyenne sismicité avant et après leur renforcement par les fibres de carbone. Pour cela, on veut estimer les périodes propres de vibrations pour le premier mode prépondérant des ponts choisis pour cette étude.

L'application des réseaux de neurones artificiels (RNA) pour ce type de recherche, nécessite tout d'abord une base de données consistante afin de suivre les différentes étapes de programmation. Il semble que les RNA sont les plus performants pour atteindre l'objectif voulu comparativement aux autres méthodes, telles que la méthode des éléments finis. Les études récentes [10], montre que plusieurs paramètres peuvent influencés pour la détermination des périodes de vibration d'un pont. Aussi, le règlement parasismique algérien propre aux ouvrages d'art (RPOA 2008) [3] et le calcul sismique des ponts estime aussi l'introduction de paramètres du tablier et des appuis pour la détermination de la période sismique de l'ouvrage [72].

Le choix des paramètres les plus significatifs, qui ont une très grande influence sur le comportement dynamique des ponts, pour la période propre T de vibration, n'est pas une tâche aisée vu la complexité de la structure du pont, d'une part et la diversité des méthodes d'application d'autre part. D'ailleurs, le calcul de la période T d'oscillations des structures dépend de la masse totale M de la structure et de sa raideur K [3] selon l'équation dynamique différentielle posée et les conditions d'application (forcée, libre, amortie, couplée, etc).

Le choix du nombre de paramètres d'entrée dans l'application des RNA dépendra de la complexité du problème et de la vitesse de rapidité de la compilation. Comme, le nombre d'éléments structuraux composant le pont est très important (poutres, dalle, trottoirs, corniches, goussets, futs, chevêtre, dés d'appuis,...) et leurs dimensions est très vaste, on a vu utile de condenser (résumer) tout ça dans deux paramètres, la masse du tablier (M) et la rigidité de l'appui (K). Pour cela, on a cherché à calculer ces deux paramètres (M et K) pour les utiliser comme entrées dans notre réseau de neurone afin d'arriver au calcul de sortie qui est la période T .

L'avantage principal des réseaux de neurones est leur capacité d'apprentissage à partir d'un nombre consistant d'exemples, de plus la base de données est consistante de plus les résultats sont proches de la réalité.

Pour cette raison, on a exploité les données des fiches techniques (annexe 1) que le laboratoire de contrôle technique des travaux publics (CTTP) nous a confié, avec les 73 cas de ponts en béton armé servant à notre étude situant à la wilaya d'Alger. Les fiches donnent les paramètres géométriques des ponts sur les quels on s'est basé pour le calcul de la masse totale M et la raideur K de la structure, qui vont nous guider pour le calcul de la période T de vibration de chaque pont qui doit faire l'objet d'une sortie de notre modèle de réseau de neurones. Soit, donc deux paramètres d'entrée et 1 paramètre de sortie pour les 73 cas d'étude. La structure du réseau retenue (finale) est celle qui donne un petit écart entre les valeurs de T désirées et celles données ou calculées par le réseau de neurones.

III-4 Elaboration de la base des données

Pour adapter notre réseau à la tâche qu'il doit effectuer, nous avons étudié qu'est ce qu'il doit avoir comme entrée et qu'est ce qu'il doit fournir à la sortie. Les entrées correspondent aux paramètres qui influent sur le comportement du système, à savoir la période T de vibration des ponts.

Pour avoir une base de données consistante on s'est servi des fiches techniques de 194 ponts situant à la wilaya d'Alger (Bab El Oued, Baraki, Bir Mourad Rais, Bir Touta, Bouzareah, Cheraga, Dar El Beida, El Harrach, Hussein Dey, Rouiba, Sidi M'hamed, Zeralda). Le nombre totale des fiches techniques était de 194 fiches, parmi ces dernières seulement 73 avaient des paramètres en commun (ponts à poutres sous chaussés en béton). Après avoir étudié la totalité, la fiche technique est présentée comme l'indique le tableau ci-après (Tableau III-1):

Tableau III-1 : Exemple de fiche technique. [73]

Nom du pont	Pont au pk 6+398
Nom de Commune	Zeralda
Nom de la route	Route de Souidania
Nombre de voies (Total)	2
Largeur du pont (m)	14
Longueur du pont (m)	50
Année de construction	1987
Nombre de travées	2
Hauteur maximale des pile (m)	5,25
Epaisseur de la dalle (cm)	120

A partir des données présentées sur les fiches techniques, on a pu arriver au calcul de la masse totale (M) de la structure et aussi au calcul de la raideur (K).

III-4-1 Avant renforcement

III-4-1-1 Calcul de la masse totale de la structure (M)

Les ponts choisis pour cette étude sont des ponts à poutres sous chaussées, leurs caractéristiques géométriques sont illustrées sur la figure ci après.

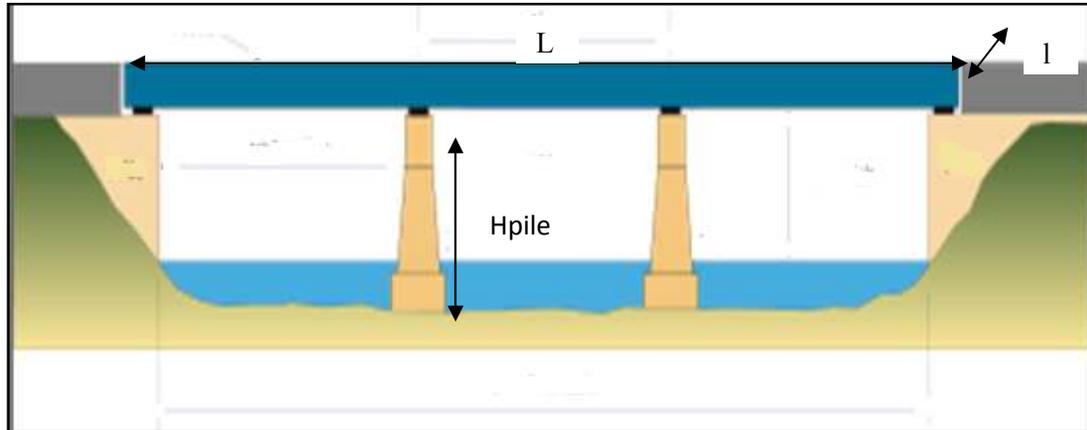


Figure III-1 : Coupe longitudinale d'un pont.

Tel que :

L : Longueur totale du pont.

l : Largeur totale du pont.

H pile : Hauteur Maximale des piles.

Afin d'arriver au calcul de la masse totale de la structure, il faut d'abord calculer M tablier et M piles.

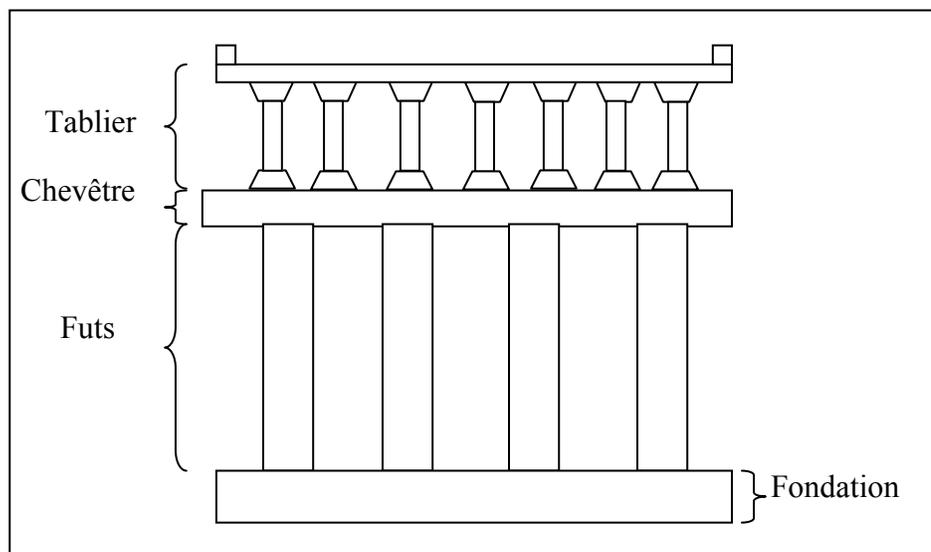


Figure III-2 : Coupe transversale d'un pont.

a- Calcul du poids propre du tablier

Calcul des charges permanentes (C_p) [3]:

$$C_p = q_{\text{dalle}} + q_{\text{poutre}} + q_{\text{coffrage}}$$

- $q_{\text{dalle}} = l_{\text{pont}} * e_{\text{dalle}} * \gamma_{\text{bét}}$;
avec : l_{pont} : largeur du pont ;
 e_{dalle} : épaisseur de la dalle ;
 $\gamma_{\text{bét}}$: poids volumique du béton.
- $q_{\text{poutre}} = n * S * \gamma_{\text{bét}}$;
avec : n : nombre de poutre pour chaque pont.
 S : section de la poutre.

Le nombre de poutre est calculé par la formule suivante :

$$n = l_{\text{pont}} / 1.5$$

- $q_{\text{coffrage}} = 1.5 \text{ t/ml}$.

De là on peut calculer le complément des charges permanentes (CCP) :

- CCP = 35 à 40% CP

D'où la masse du tablier $M_{\text{tablier}} = (C_p + \text{CCP}) * L_{\text{pont}}$.

b- Calcul de la masse totale des piles :

La pile est constituée comme le montre la figure suivante, d'un chevêtre et d'un fut.

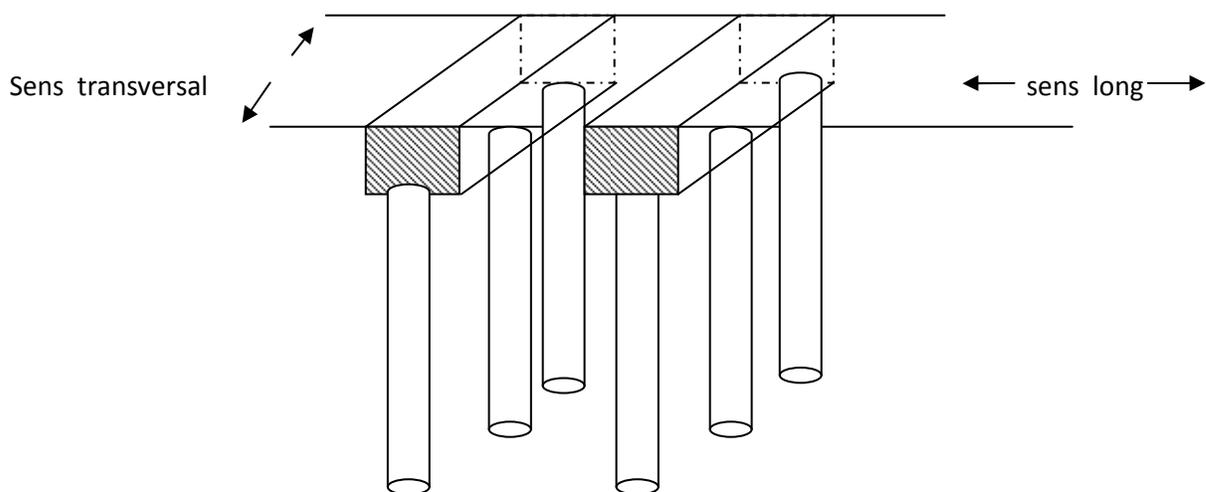


Figure III-3 : Vue en plan d'une structure de pont.

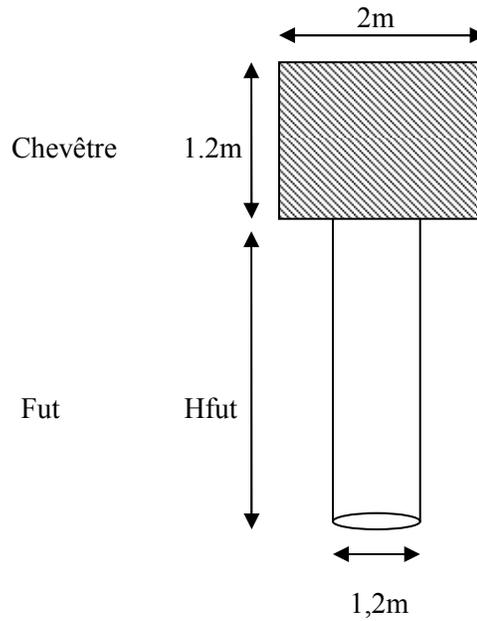


Figure III-4 : Dimensions du fût et du chevêtre.

$M_{pile} = M_{chevêtre} + M_{fût}$

$-M_{chevêtre} = L * e * l * \gamma_{bét.}$

Avec :

L : longueur du chevêtre ($l_{pont} - 2m$) ;

e : épaisseur du chevêtre ($e = 1.2m$) ;

l : largeur du chevêtre ($l = 2m$).

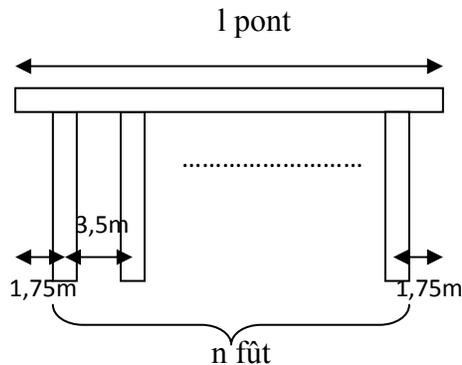
$-M_{fûts} = (fûts * \frac{\pi D^2}{4} * \gamma_{bét.}) * n_{appui.}$

Avec :

$$D_{fût} = \begin{cases} 1,2m & \text{pour les ponts courts ;} \\ 1,5m & \text{pour les ponts longs.} \end{cases}$$

$n_{appui} = n_{travée} - 1.$

$n_{fût} = l_{pont} / 3,5$



III-4-1-2 Calcul de la raideur totale de la structure

a- Calcul de la raideur de la pile

La raideur de la pile est calculée à partir de la formule suivante [3]:

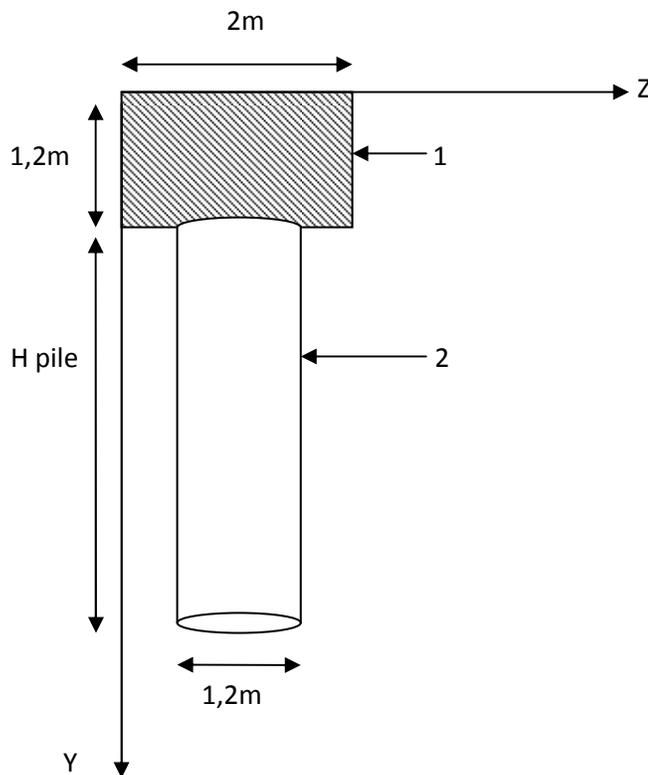
$$K_{pile} = n \text{ fût } \frac{3 \cdot E \cdot I}{l^2}$$

Avec :

E : Module de déformation instantanée du béton, il prend les valeurs suivantes selon l'âge de la structure [13]:

- Pour âge de pont > 30ans, E= 24000 mPa.
- Pour 10 < âge de pont < 30ans, E= 28000 mPa.
- Pour âge de pont < 10ans, E= 32000mPa.

I : Moment d'inertie longitudinal de la pile. La section de la pile est illustrée dans la figure suivante ;



$$I_z = I_{z_1} + I_{z_2}$$

$$I_z = (b_1 h_1^3 / 12) + (Z_G - Z_1)^2 S_1 + (\pi D^2 / 64) + (Z_G - Z_2)^2 S_2$$

$$\text{Avec: } Z_G = \frac{\sum Z_i S_i}{\sum S_i}$$

b- Calcul de la raideur des appareils d'appui :

L'appareil d'appui retenu à les dimensions suivantes ; 400*600*5 (12*3) après dimensionnement statique [3];

$$K_{\text{appareils}} = n \frac{G \cdot a \cdot b}{e}$$

Avec :

G : le module de cisaillement de l'appareil ;

a, b : les dimensions en plan de l'appareil ;

e : l'épaisseur totale de caoutchouc de l'appareil ;

n : le nombre d'appareils d'appuis par élément porteur.

$$K_{\text{appareils pile}} = 4 \cdot 1200 \cdot 0,400 \cdot 0,600 / (5 \cdot 0,012)$$

$$K_{\text{appareils pile}} = 19200 \text{ kN/m}$$

c- Calcul de la raideur totale par appui [3]

$$K_{\text{appui}} = \frac{1}{1/K_{\text{appareils}} + 1/K_{\text{pile}}}$$

d- Calcul de la raideur du système [3]

$$K = n_{\text{pile}} \cdot K_{\text{appui}}$$

avec : n pile le nombre de piles.

III-4-1-3 Calcul de la période propre T [3]:

$$T = 2\pi \sqrt{(M/K)}$$

III-4-2 Après renforcement

III-4-2-1 Calcul de la masse totale de la structure :

Le confinement du béton améliore sensiblement ses propriétés mécaniques. L'enroulement de CFRP autour d'une colonne, en hélice ou sous forme de cerces fermées, permet d'augmenter de manière

conséquence sa capacité portante ultime, et comme la masse du tablier est concentrée à la tête de la structure (pont), il y a lieu de prendre dans notre cas le renforcement des piles par les CFRP.

Le composite influe peu (négligeable) sur la masse de la structure qui reste presque la même ($M_{\text{avant renforcement}} = M_{\text{après renforcement}}$).

III-4-2-2 Calcul de la raideur totale de la structure:

a- Calcul de la raideur de la pile :

Pour un fut confiné, il y a lieu de calculer le module de déformation E' et le moment d'inertie I' après renforcement selon les formules suivantes :

$$E' = E + n' E_{CFRP} \quad [10]$$

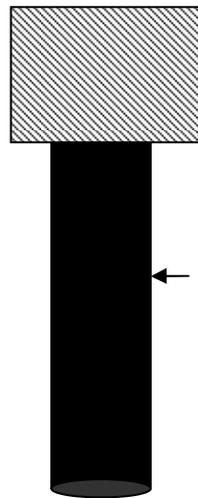
Avec E' : Module de déformation après renforcement.
 E : Module de déformation avant renforcement.
 $n'_{CFRP} = 7,5$ (coefficient d'équivalence).
 E_{CFRP} : Module de déformation de CFRP.

$$I' = I + n' I_{CFRP} \quad [10]$$

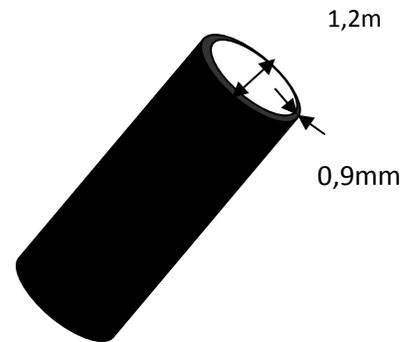
Avec I' : Moment d'inertie après renforcement.
 I : Moment d'inertie avant renforcement.
 n' : coefficient d'équivalence entre CFRP et le béton.
 I_{CFRP} : Moment d'inertie de CFRP.

Ce qui va changer la raideur du fut renforcé.

$$K'_{\text{pile après renforcement}} = n \frac{3 E' I'}{l^2}$$



Le fut (cylindre) est Confiné extérieurement par un tissu de CFRP d'épaisseur 0,9mm.



En utilisant les mêmes formules de calcul de la raideur totale avant renforcement on obtiendra les valeurs de la raideur totale de la structure.

La période propre de vibration de la structure est calculée par la formule suivante :

$$T^2 = 2\pi \sqrt{(M / K')}$$

III-5 Résultats de calcul de M et K

Après avoir calculer les deux paramètres influents sur le calcul de la période T, on obtient les valeurs suivantes de K, M et T avant et après renforcement, voici quelques exemples :

Tableau III- 2: Résultats de calcul de M, K et T avant et après renforcement.

Num	M tablier (t)	M pile (t)	k pile (mN/m)	k appareil (mN/m)	k appui (mN/m)	k systeme (mN/m)	K'pile (mN/m)	K'appui (mN/m)	k' systeme (mN/m)	M systeme (kg)	T avant renf (s)	T après renf (s)
1	2326	133	1017	19,2	18,84	115	6 992	19,15	116,53	2 459 008	0,918	0,913
2	1863	150	512,1	19,2	18,51	113	4 424	19,12	116,34	2 012 814	0,838	0,826
3	1718	131	1003	19,2	18,84	113	6 893	19,15	114,88	1 849 310	0,803	0,797
4	1355	71	501,6	19,2	18,49	55	3 447	19,09	57,28	1 425 975	1,010	0,991
5	2307	110	77,39	19,2	15,38	64	1 104	18,87	78,18	2 417 423	1,220	1,105
6	2164	89	711,7	19,2	18,7	80	4 891	19,12	81,42	2 253 126	1,050	1,045
7	2839	134	1022	19,2	18,85	115	7 025	19,15	117,07	2 972 873	1,010	1,001
8	1681	66	544,5	19,2	18,55	60	3 742	19,10	62,22	1 746 469	1,070	1,053

Commentaire :

On remarque qu'avec l'augmentation du module de déformation E' et le moment d'inertie des futs I', la raideur totale de la structure K' après renforcement par les fibres de carbone augmente donc la période d'oscillation des ponts diminue pour les 73 cas étudiés. Ce qui explique le rôle joué par les fibres de carbone dans l'absorption du choc.

III-6 Application des réseaux de neurones

III-6-1 Choix du réseau

Le réseau de rétropropagation (RPG) a été choisi dans cette étude en raison de sa popularité et de sa capacité de réussite dans le secteur de la classification, prédiction et optimisation des modèles.

Le modèle RPG se compose de trois types de couches : on a la couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées, et une couche produite (de sortie). L'emploi de l'apprentissage supervisé exige la connaissance d'une sortie désirée pour tout élément de l'ensemble de données d'entrée. Dans notre cas, nous cherchons à prédire le comportement des ponts avant et après renforcement par les fibres de carbone pour bien constater la différence entre les deux cas on propose deux modèles de réseaux de neurones dont l'ensemble des données d'entrée est représenté par les valeurs de la masse totale de la structure (M) ainsi que sa raideur totale (K), cela représente les paramètres de la couches d'entrée qui sont transmis à la couche cachée. Enfin, la couche de sortie reçoit son entrée de la couche cachée. Dans notre cas la sortie de cette couche représente les valeurs de la période d'oscillation des ponts (T).

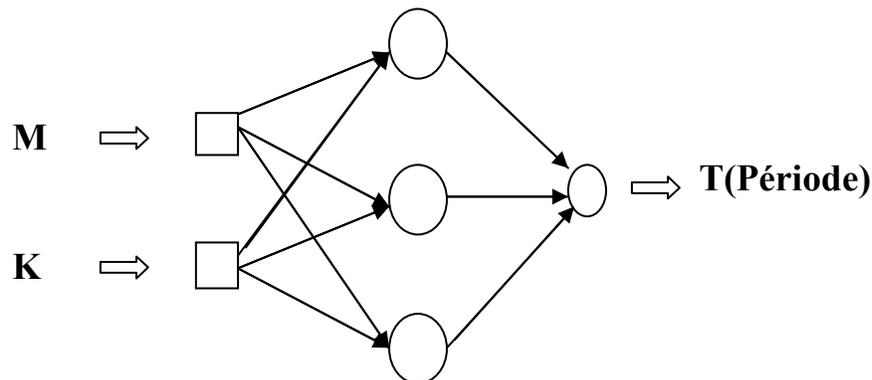


Figure III-5 : Architecture adoptée pour le 1^{er} cas.

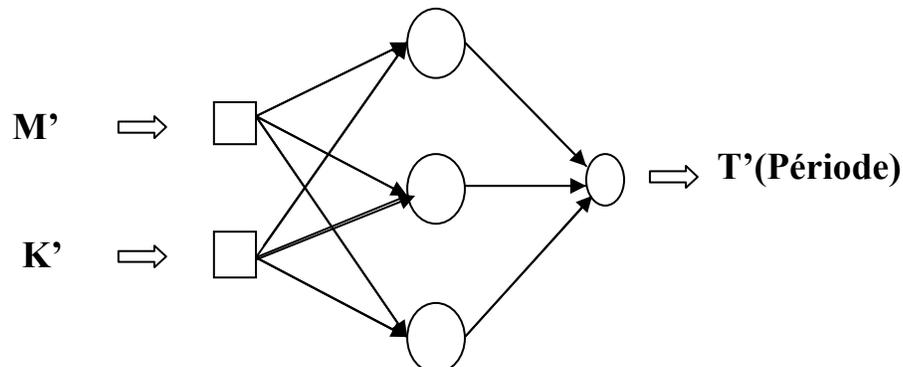


Figure III-6: Architecture adoptée pour le 2eme cas.

III-6-2 Méthodologie

Cette partie décrit les étapes suivies pour appliquer le réseau de neurones à RPG. Comme le montre la figure ci après, la première étape consiste à identifier les paramètres à employer pour des modèles de prédiction. Deux ensembles de données ont été produits, un pour la phase d'apprentissage et l'autre pour la phase test ou validation. En se basant sur le type et la taille de l'ensemble de données d'entrée, les configurations du réseau RPG, comme le nombre de neurones dans l'entrée et les couches cachées, le réseau est entraîné en présentant les données d'entrée au réseau autant de fois que de besoins pour satisfaire l'erreur maximale permise. Une fois que la phase d'apprentissage est complète, le réseau qualifié et testé devrait maintenant prévoir les propriétés. Pour examiner la capacité du réseau de généraliser les exemples d'apprentissage, les données prévues pour le test sont présentées et la sortie réelle du réseau est comparée avec la sortie désirée.

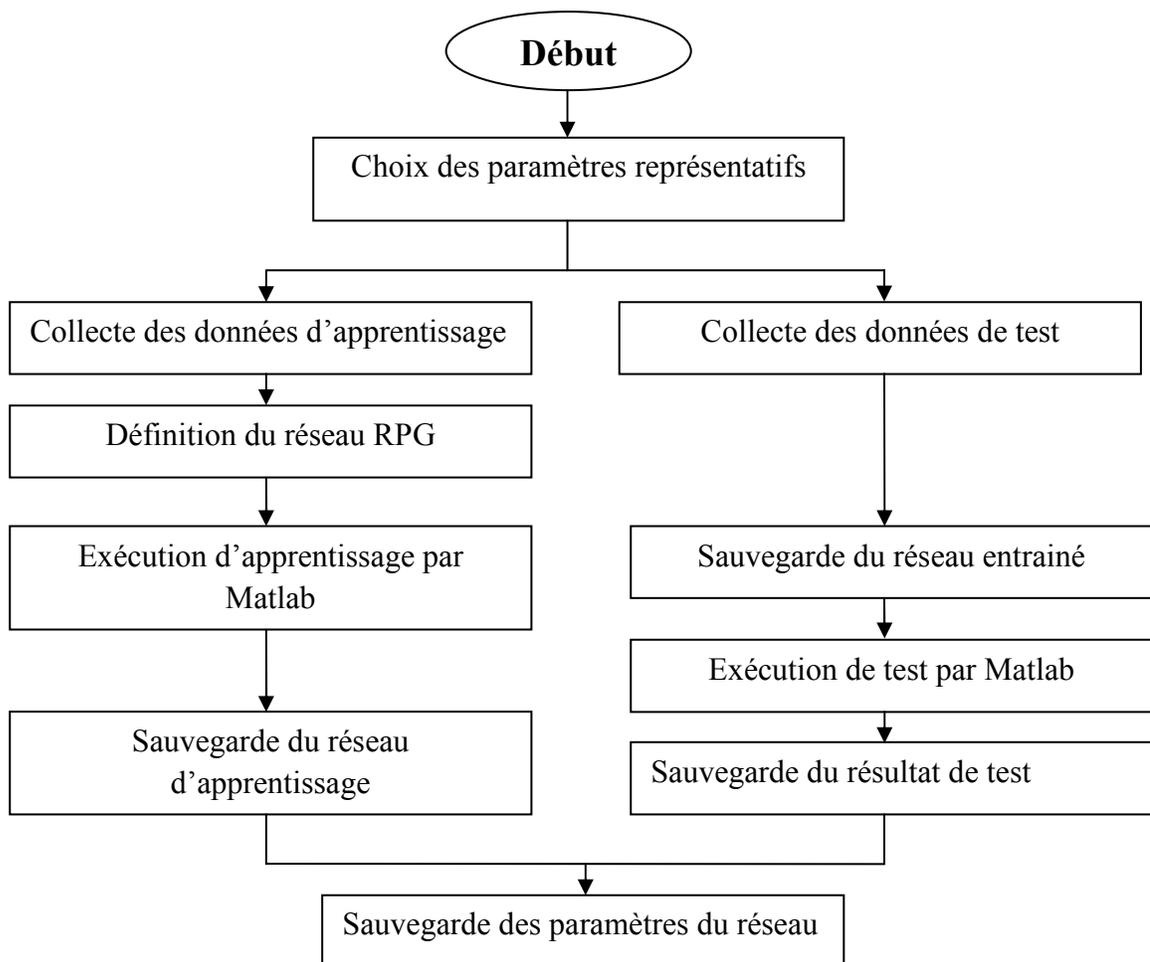


Figure III- 7: Méthodologie de développement du réseau de RPG.

III-6-3 présentation du logiciel Matlab

Plusieurs simulateurs de réseaux de neurones ont été développés ces dernières années. La plupart sont commercialisés par exemple Neural Forcaster, Neuro Maker, Neuro Solutions, Neuro Shell, ect. Des recherches intensives ont été conduites afin d'étudier les avantages et les inconvénients de chaque simulateur, dont le coût, la flexibilité d'utilisation, le type de plate-forme et l'ergonomie de l'interface étaient les critères principaux pour évaluer chaque simulateur [73]. Pour des raisons économiques, les recherches ont abouti sur le choix du logiciel Matlab 7.10 parmi les différents langages de programmation tels que Visuel C++, Visuel Fortran, Visuel Basic, etc. car il a été développé pour être utilisé dans un environnement efficace et flexible de simulation pour la recherche et l'application sur les réseaux de neurones [74].

MatLab est un puissant outil de calcul numérique, de programmation et de visualisation graphique. Son nom signifie *matrix laboratory*, c'est à dire un environnement interactif de travail avec des matrices. La facilité de développement des applications dans son langage fait qu'il est pratiquement devenu le standard dans son domaine. Actuellement, on trouve des nombreuses boîtes à outils (Toolboxes) qui contiennent des fonctions spécialisées permettant d'utiliser l'environnement MatLab pour résoudre des classes spécifiques de problèmes. [75]

Avec ses fonctions spécialisées, MATLAB peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques. MATLAB est un interpréteur : les instructions sont interprétées et exécutées ligne par ligne. MATLAB fonctionne dans plusieurs environnements tels que X-Windows, Windows, Macintosh.

Il existe deux modes de fonctionnement :

Mode interactif: MATLAB exécute les instructions au fur et à mesure qu'elles sont données par l'utilisateur.

Mode exécutif: MATLAB exécute ligne par ligne un "fichier M" (programme en langage MATLAB).

Les blocks de la figure suivante sont présentés ci après :

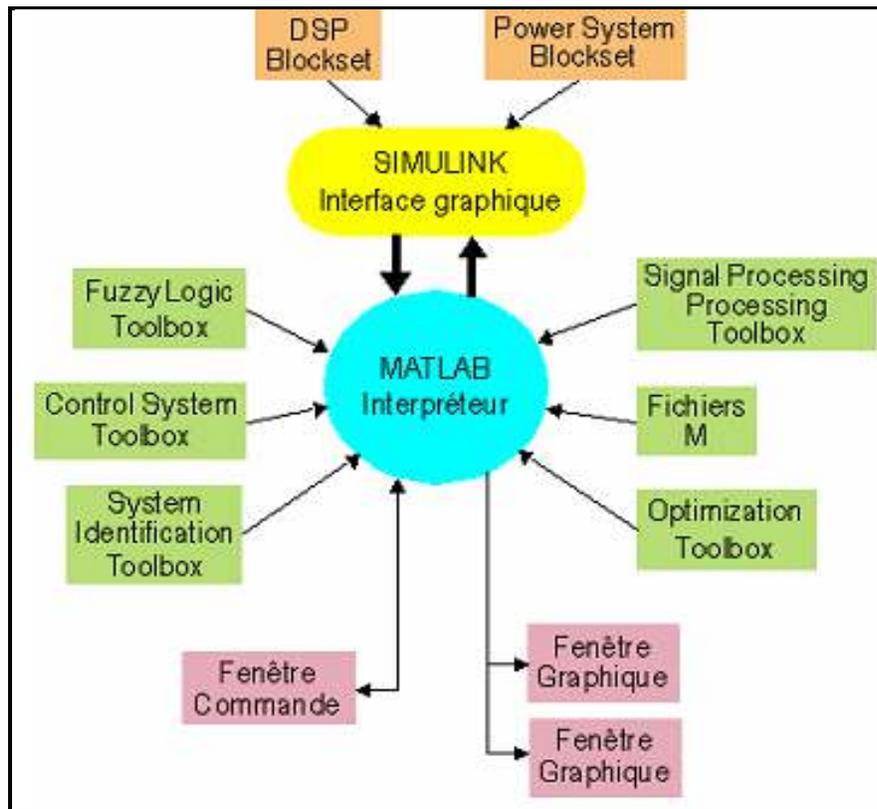


Figure III-8 : Les blocks présentés par MatLab. [75]

Fenêtre Commande: Dans cette fenêtre, l'utilisateur donne les instructions et MATLAB retourne les résultats.

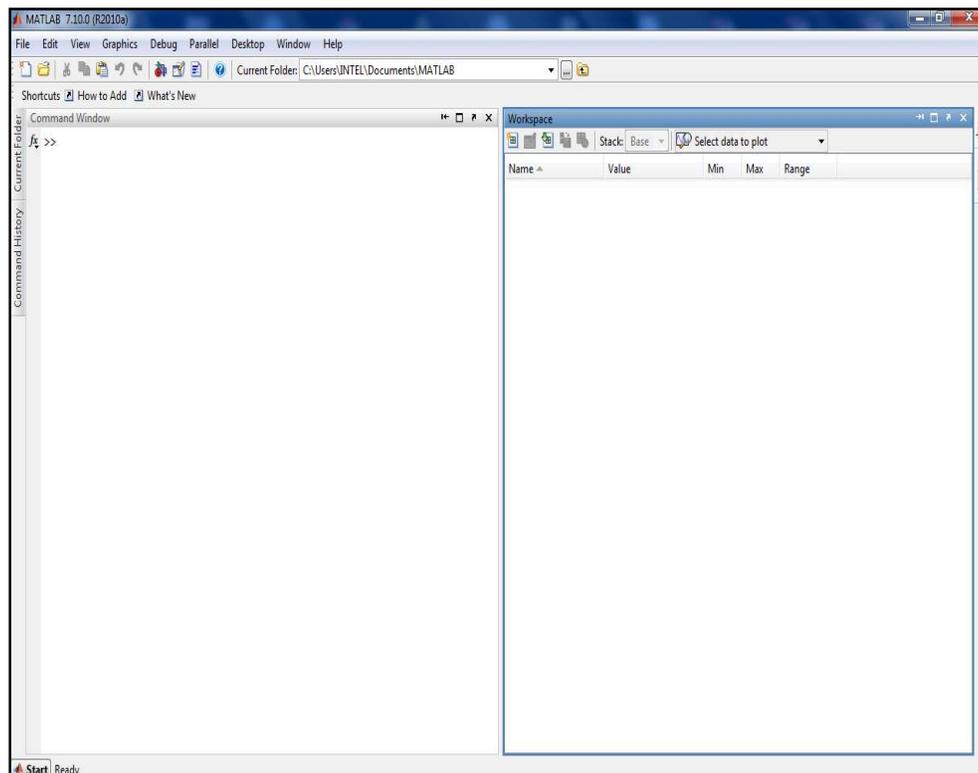


Figure III-9 : Interface du Matlab 7.10.

Fenêtres Graphique: MATLAB trace les graphiques dans ces fenêtres.

Fichiers M: Ce sont des programmes en langage MATLAB (écrits par l'utilisateur).

Toolboxes: Ce sont des collections de fichiers M développés pour des domaines d'application spécifiques (Signal Processing Toolbox, System Identification Toolbox, Control System Toolbox, u-Synthesis and Analysis Toolbox, Robust Control Toolbox, Optimization Toolbox, Neural Network Toolbox, Spline Toolbox, Chemometrics Toolbox, Fuzzy Logic Toolbox, etc.)

Simulink: C'est l'extension graphique de MATLAB permettant de travailler avec des diagrammes en blocs.

Blocksets: Ce sont des collections de blocs Simulink développés pour des domaines d'application spécifiques (DSP Blockset, Power System Blockset, etc.).

III-6-4 Architecture du réseau RPG

L'architecture (topologie) du réseau de RPG utilisé dans cette étude est montrée sur la figure III-5 et III-6. Elle est déterminée en plus du nombre de paramètres d'entrée et de sortie en choisissant le nombre de neurones dans chaque couche, le nombre de couches cachées, et un ensemble de paramètres qui commandent dans le processus d'apprentissage tel que le paramètre d'apprentissage (η), et l'erreur quadratique maximale permise (E^2). Pour réduire la complexité du réseau et éviter le temps prolongé d'apprentissage, une seule couche cachée a été choisie. Cependant, le nombre de neurones dans la couche cachée était proportionnellement varié avec la taille de la couche d'entrée.

Au début du processus d'apprentissage, tous les poids de connexions ont été aléatoirement initialisés entre -1 et 1. Le nombre maximum des cycles ou itérations (N. ITR) a été fixé à 1000.

Le tableau suivant récapitule les différents paramètres d'apprentissage et l'architecture du réseau de neurones adapté de notre application qui est le réseau multicouche à rétropropagation.

Tableau III- 3 : Architecture et paramètres du RN adopté.

Paramètres Modèles	Architecture du RN à RPG				Paramètres du RN à RPG			Ensemble de données	
	N.PE	N.PS	N.CC	N.NCC	N.ITR	η	E ²	Entrées	Sorties
Ponts avant renforcement par les CFRP	2	1	1	2	1000	0.01	0.01	(1) Masse totale de la structure (M) ; (2) Raideur totale de la structure (K).	Période d'oscillation de la structure (T).
Ponts après renforcement par les CFRP	2	1	1	2	1000	0.01	0.01	(1) Masse totale de la structure (M') ; (2) Raideur totale de la structure (K').	Période d'oscillation de la structure (T').

III-6-5 Sélection de l'algorithme d'apprentissage

Basé sur une des études employées dans les démonstrations fournies par Matlab, l'algorithme de Levenberg-Marquardt s'avère le moyen le plus efficace et le plus fiable pour cette étude. Le tableau III-4 montre une comparaison entre les trois algorithmes supervisés les plus populaires [73].

Tableau III-4 : Comparaison entre les algorithmes d'apprentissage.

Fonction	Technique	EC/ED	Itération	Temps
TRAINGD	Descente de gradient	0.203/0.01	1000	26.0
TRAINGDM	Descente de Gradient avec momentum	0.219/0.01	1000	24.0
TRAINLM	Levenberg-Marquardt	0.009/0.01	25	3.0

Note : EC représente l'erreur calculée et ED représente l'erreur désirée.

Dans notre cas L'apprentissage a été basé sur l'algorithme de Levenberg-Marquardt à rétropropagation [76] avec les fonctions de transfert standard Tansigmoide ($a = \frac{2}{(1 + e^{-2n}) - 1}$) correspondant à la couche cachée et celle de sortie, avec un taux d'apprentissage de 0.01.

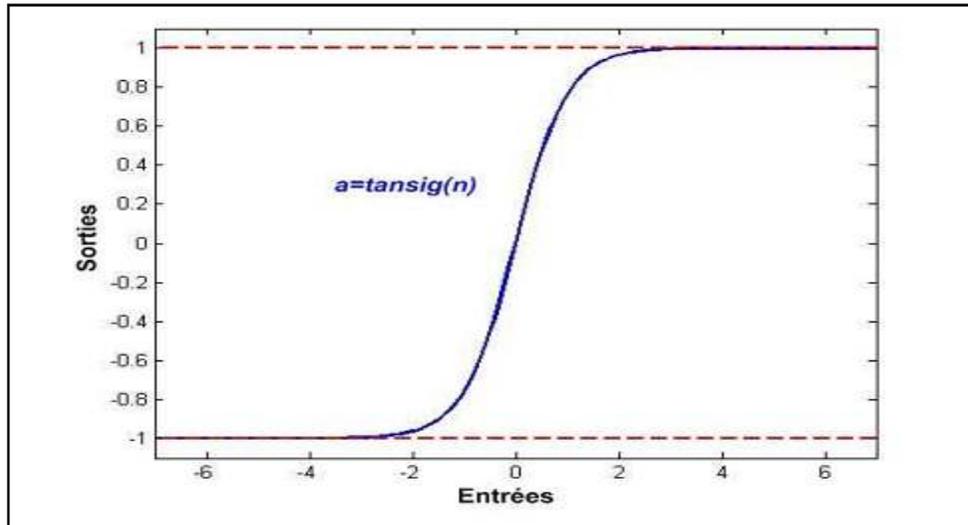


Figure III-10 : Graphe caractéristiques de la fonction tansig.

III-6-6 Apprentissage et test du réseau RPG

Pour la rétropropagation, plus le nombre de données d'apprentissage est grand plus le réseau apprenant mieux. Un grand nombre de cas d'apprentissage permet au réseau de généraliser et d'apprendre des rapports plus efficacement. Après avoir entré le tableau d'entrées (input) et de sorties (output) comme base de données nous avons lancé l'apprentissage du réseau, la figure ci après présente également le panneau qui est employé pour entrainer le réseau neuronal avec le bouton debug.

A partir de ce dernier on peut avoir les courbes de performance du réseau, les courbes de corrélation entre périodes mesurées et prédites par le modèle RNA et les courbes de variation de paramètres durant la formation du réseau par RNA qui sont présentés et commentés dans le chapitre suivant.

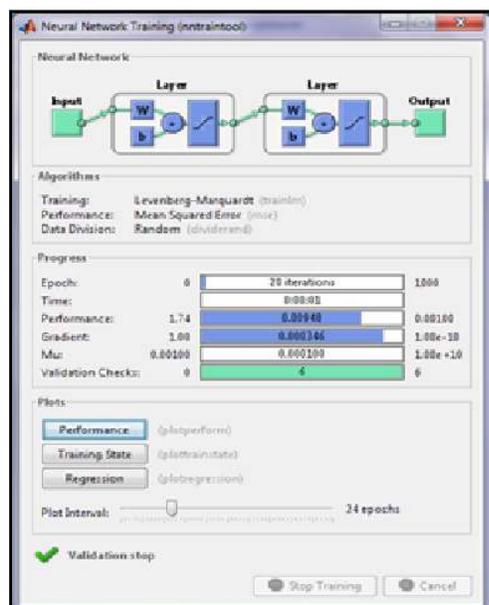


Figure III- 11 : Panneau d'apprentissage du réseau.

Chapitre IV

Résultats et Discussions

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV-1 Présentation des résultats

IV.1-1 Principe

Bien que les réseaux de neurones offrent une approche très différente de la méthode analytique (traditionnelle) du fait de leur capacité d'apprentissage et de la disponibilité des données, ils nécessitent toujours, au point de départ, pour la modélisation des ponts en béton (notre cas), un ensemble de résultats expérimentaux. Pour cela, et afin de valider les résultats trouvés par la programmation par les RNA, on les confrontera à ceux trouvés par la campagne expérimentale in situ, sur un pont en béton armé réparé par composites collés, effectué par Abdessemed M.[10]

IV.2 Mise en œuvre des réseaux de neurones

Les soixante treize (73) cas pris comme base de données pour les ponts choisis (ponts isostatiques à poutres sous chaussée en béton armé) et qui représentent le point de départ (input) par leur entrées M (masse du tablier) et K (rigidité des appuis) donnaient lieu à la prédiction de la période T de l'ouvrage testé, et ce avant et après renforcement (par confinement avec CFRP) des appuis (piles).

Que se soit, avant ou après renforcement, les 73 observations faites dans les expériences de la détermination de la période du pont ont été divisées en deux ensembles: le premier sert pour former le réseau neural; et le deuxième ensemble pour la validation la performance du réseau idéal [76] Pour chaque pont testé, 10% des observations ont été sélectionnés (prise au hasard) pour l'épreuve du test afin de valider les résultats trouvés (Tableau VI.1).

Le modèle de l'architecture adoptée pour le réseau neural formée et qui a utilisé l'ensemble des 66 observations (90% de la base de données) a été progressé jusqu'à ce que le modèle choisi eût développé 20 neurones cachés. La performance du modèle a été dirigée pendant le processus de la formation en prenant l'erreur absolue moyenne sur toute l'observation pour l'ensemble de la formation du réseau. L'erreur a été mesurée pour chaque observation (cas testé) comme la différence entre le réseau neural prédit (valeur prédite) de la période et la valeur réelle de cette période de vibration du pont.

Les RNA mise en œuvre sont constitués d'une couche d'entrée, d'une couche cachée et d'une seule couche sortie. La fonction d'activation utilisée pour l'ensemble des neurones est de type tansigmoïde (Eq.1) :

$$a = \frac{2}{(1 + e^{-2n}) - 1} \dots\dots\dots [Eq.1]$$

Compte tenu des résultats obtenus expérimentalement, les paramètres d'entrée du modèle adoptée sont les observables sensibles aux masse M de la structure (charges permanentes et complément de charges permanentes) et les rigidités des appuis (piles de l'ouvrage). Le même modèle est appliqué pour l'ouvrage testé avant son renforcement et après son renforcement par collage de composites. Enfin, le codage des différents algorithmes a été effectué dans l'environnement Matlab [77].

Tableau VI.1: Valeurs de la masse M et les rigidités K de l'ouvrage et les périodes propres

N°	M structure (kg)	K système (mN/m)	T (s)	K' système (mN/m)	T' (s)
01	2459008	115	0.918	116.53	0.913
02	2012814	113	0.838	116.34	0.826
03	1849310	113	0.803	114.88	0.797
04	1425975	55	1.010	057.28	0.991
05	1425975	55	1.010	057.28	0.991
06	2417423	64	1.220	078.18	1.105
07	2253126	80	1.050	081.42	1.045
08	2253126	80	1.050	081.42	1.045
09	2972873	115	1.010	117.07	1.001
10	1746469	60	1.070	062.22	1.053
11	1527985	56	1.040	058.10	1.019
12	3132697	117	1.030	119.27	1.018
13	5194018	113	1.350	114.88	1.336
14	3155415	55	1.500	057.28	1.475
15	1809286	141	0.712	142.35	0.708
16	3917413	132	1.080	134.12	1.074
17	2583650	113	0.950	114.88	0.942
18	4856794	190	1.000	191.73	1.000
19	8030350	190	1.290	191.73	1.286
20	1955321	75	1.013	076.53	1.004
21	3519960	152	0.956	153.33	0.952
22	2877746	190	0.772	191.73	0.770
23	3241035	56	1.512	057.33	1.494
24	16666900	132	2.235	134.02	2.216
25	5526975	171	1.130	172.48	1.125
26	3147755	56	1.492	057.32	1.472
27	6366105	133	1.376	134.13	1.369
28	1483903	62	0.975	063.32	0.962
29	2136882	61	1.172	062.81	1.159
30	2333030	56	1.283	057.33	1.268
31	5199277	174	1.086	175.27	1.082
32	10997870	140	1.759	141.79	1.750

33	2794600	75	1.215	076.48	1.201
34	1769152	100	0.836	101.21	0.831
35	1658547	96	0.826	097.37	0.820
36	1336715	56	0.971	057.33	0.959
37	1053195	56	0.862	057.33	0.852
38	4907830	133	1.208	134.13	1.202
39	2828781	94	1.091	095.67	1.080
40	3052841	101	1.094	102.53	1.084
41	1341750	35	1.223	037.99	1.181
42	4606907	58	1.771	059.50	1.748
43	3566350	34	2.020	037.90	1.927
44	6814361	94	1.695	096.90	1.666
45	3375758	58	1.509	060.05	1.490
46	1869050	35	1.444	037.99	1.394
47	5115210	56	1.906	057.29	1.878
48	25561961	122	0.910	123.16	0.905
49	1490624	77	0.871	079.23	0.862
50	1143329	57	0.888	059.93	0.868
51	3464780	152	0.949	153.33	0.945
52	2648900	74	1.188	076.42	1.170
53	2827780	152	0.857	153.33	0.853
54	1673520	94	0.837	095.73	0.831
55	500550	36	0.736	038.08	0.720
56	602264	41	0.763	043.44	0.740
57	415299	30	0.741	032.47	0.711
58	2139606	100	0.920	101.21	0.914
59	4712780	74	1.581	076.43	1.560
60	3199749	55	1.517	057.22	1.486
61	636600	111	0.475	114.71	0.468
62	2308325	133	0.828	134.13	0.824
63	1591800	75	0.917	076.48	0.906
64	791650	36	0.927	038.08	0.906
65	3786775	132	1.063	134.08	1.056
66	1591800	75	0.917	076.48	0.906
67	1591800	75	0.917	076.48	0.906
68	1591800	75	0.917	076.48	0.906
69	1591800	75	0.917	76.48	0.906
70	1614400	75	0.923	76.48	0.913
71	1591800	75	0.917	76.48	0.906
72	1446475	55	1.014	57.28	0.998
73	403755	55	0.539	57.22	0.528

IV.3 Résultats trouvés

IV.3.1 Avant renforcement

Le graphe de performance ci après (figure IV.1) des cas de ponts avant leur renforcement, montre les trois courbes (formation du réseau neural, validation et test).

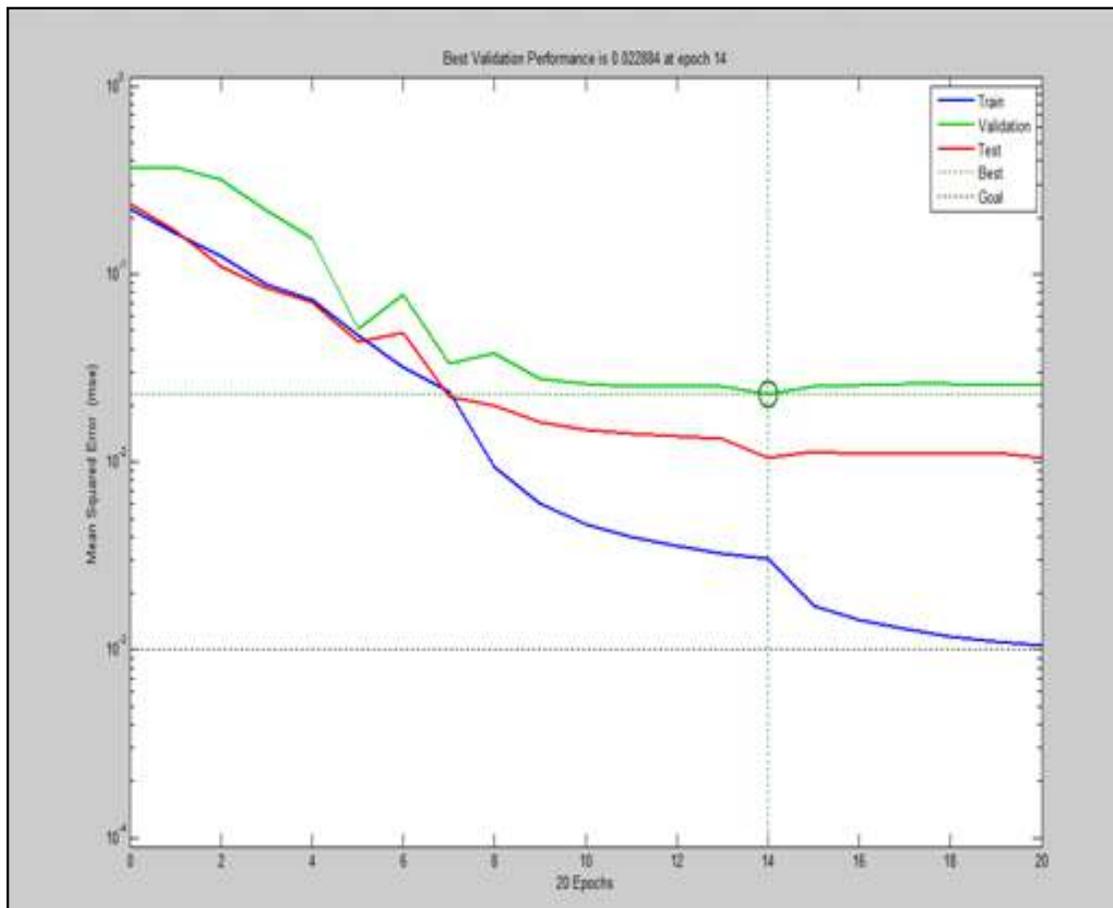


Figure IV.1 : Courbe de performances avant renforcement des ponts

Ces résultats montrent, par le biais de ce graphe, que la courbe de la performance indique une réduction dans l'erreur absolue moyenne d'approximativement 3×10^{-2} milli secondes (pour réseau avec zéro neurones cachés) à 10^{-4} milli secondes (pour un réseau avec 20 neurones cachés), ce qui montre une nette régression de l'erreur absolue tout le long de la formation du réseau.

Aussi, au-delà de l'arrêt de la performance pour l'épreuve mise d'observations (20 réseaux cachés), il n'y a aucun avantage à former un réseau neural au-delà de ce point où sa performance cesse d'améliorer pour l'ensemble d'observations de l'épreuve. De oint de vu chiffre, on constate de la courbe de la performance pour les observations de l'épreuve paraît être sur une tendance descendante légère, même après que 20 neurones cachés aient été formés. Cela indique que

l'amélioration supplémentaire dans la performance du réseau a pu être accomplie si dans les hypothèses, elle avait été autorisée à continuer, bien que par une petite quantité [76].

La figure IV.2 illustre la corrélation entre les périodes propres des structures mesurées (calculées) et prédites par le modèle pour la base de l'apprentissage [77]. En effet, la corrélation (pour l'apprentissage) a atteint la valeur de $R = 0.99704$ entre la valeur prédite de la sortie (output) et mesurée, ce qui montre qu'elle est assez bonne avec une erreur absolue de prédiction inférieure à 0.3% de période propre. Concernant la corrélation du test entre la mesurée et la prédite est d'une valeur de 0.97702, donc une erreur absolue de prédiction inférieure à 3% de valeur de la période propre de la structure. Ces résultats témoignent donc des capacités de généralisations du RNA adopté.

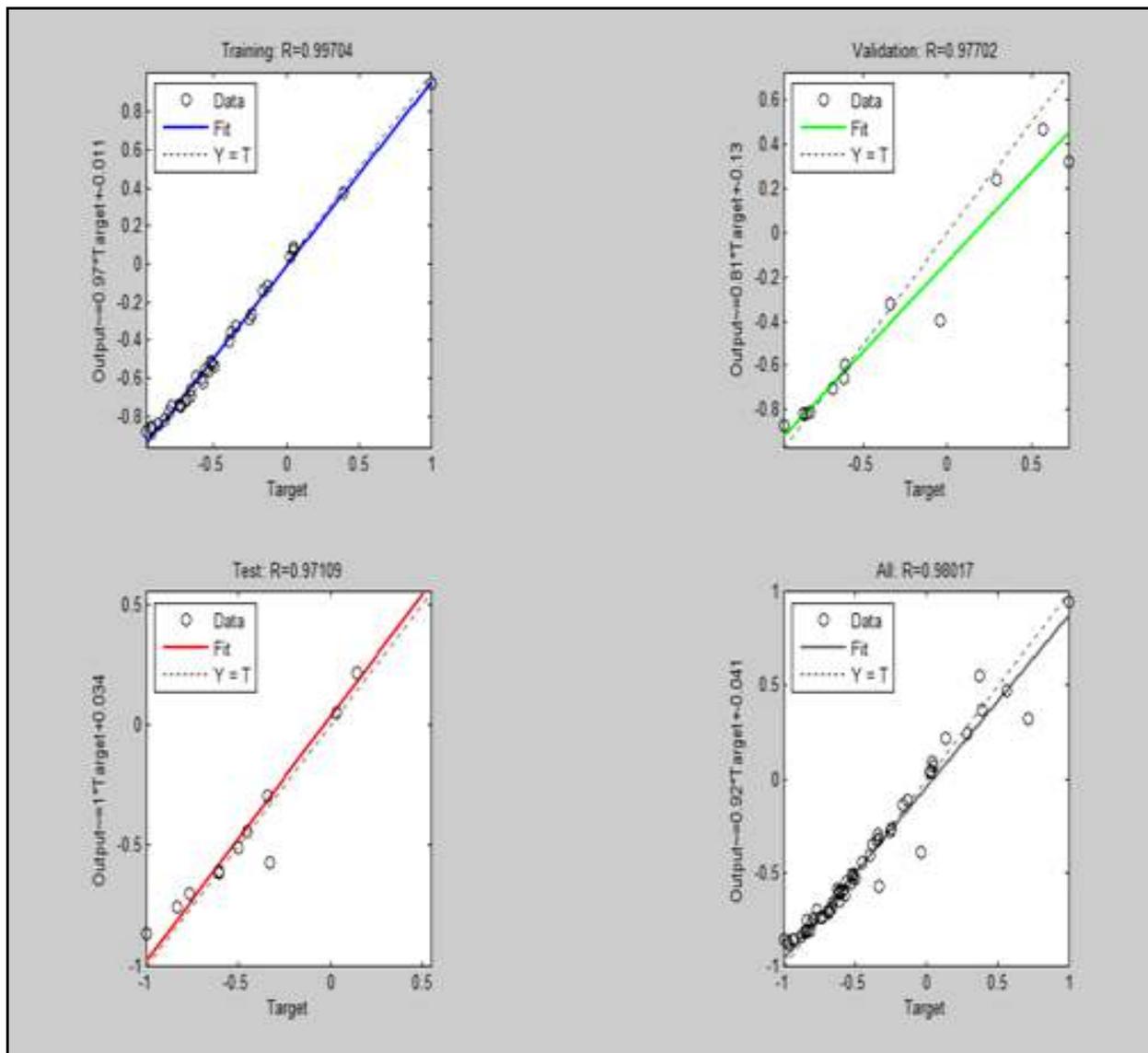


Figure IV.2 : Corrélation entre périodes mesurées et prédites par le modèle RNA

Aussi, on constate dans la figure IV.3 (comme dans la figure IV.1) que la formation du réseau s'est arrêté à la vingtième itération. La meilleure performance de la validation se produit par itération 14, se situant à mi chemin de l'arrêt du processus [78].

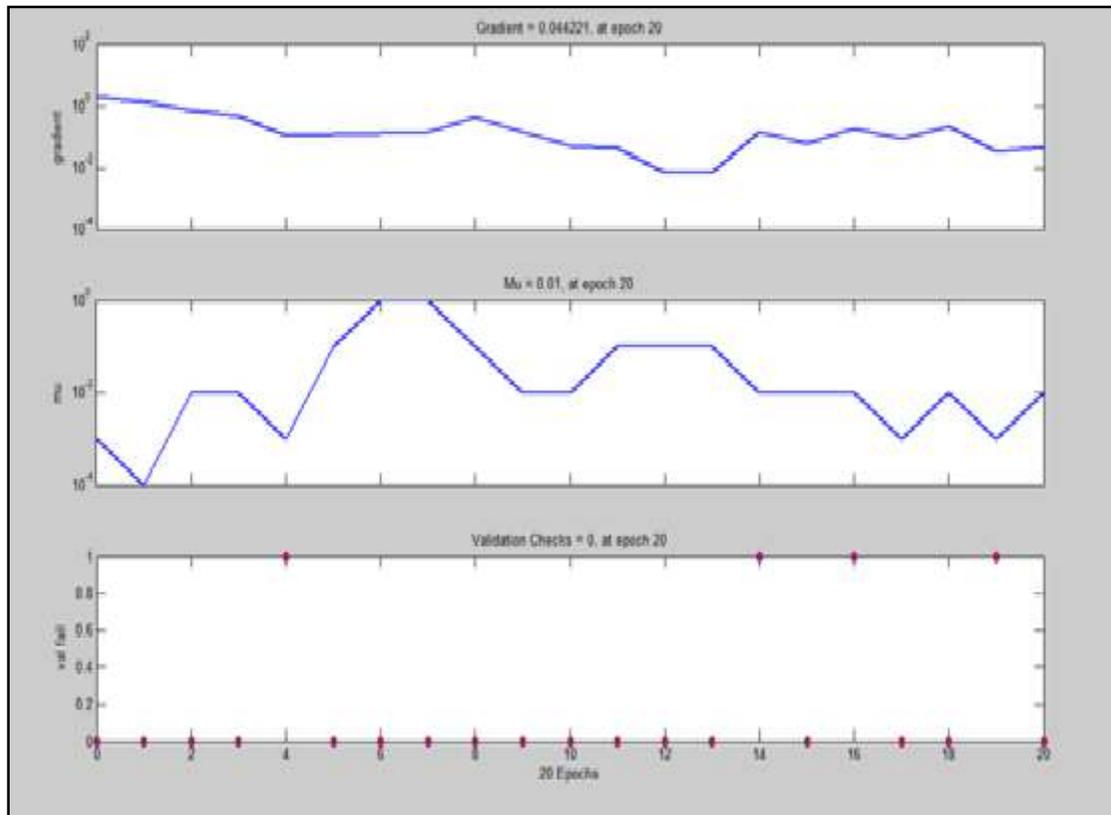


Figure IV.3 : Variation de paramètres durant la formation du réseau par RNA

IV.3.2 Après renforcement

Dans le but de prédire et comprendre le comportement des ponts testés renforcés par composites et ce par confinement de leur appuis centraux (piles) et de quantifier l'erreur entre les périodes propres mesurées et calculées par réseau neurone, nous présentons les courbes de performance, de corrélation et de variation de paramètres comme ça été fait pour les ponts avant renforcement.

Mêmes remarques en globalité sont faites. En effet, la courbe IV.4 illustre la performance du réseau. La courbe de la performance indique une réduction dans l'erreur absolue moyenne d'approximativement 7×10^{-1} milli secondes (pour réseau avec zéro neurones cachés) à 3×10^{-3} milli secondes (pour un réseau avec 20 neurones cachés), ce qui montre une régression de l'erreur absolue tout le long de la formation du réseau, qui est moins importante que celle avant renforcement.

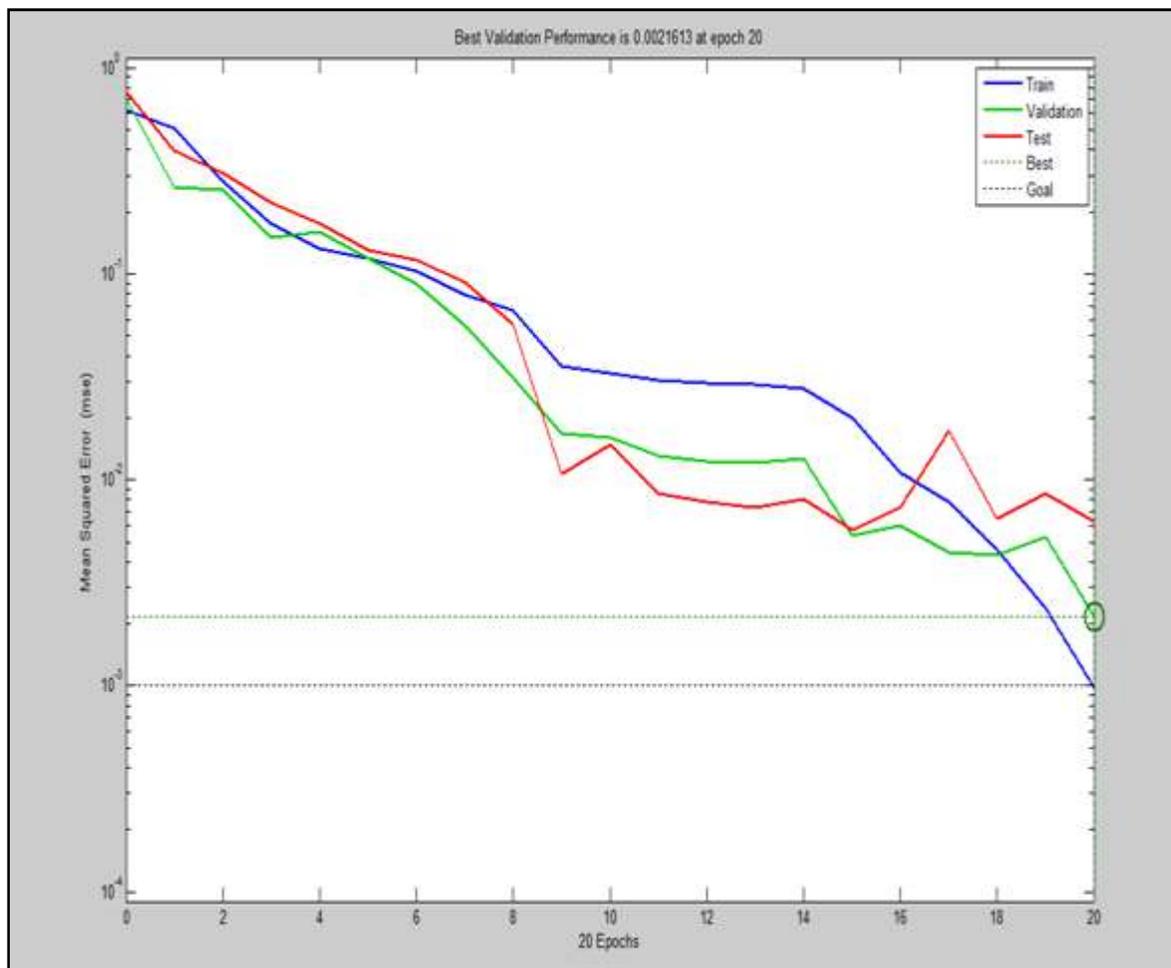


Figure IV.4 : Courbes de performances par RNA après renforcement des ponts

Pour la formation du réseau, l'arrêt s'est manifesté à la vingtième (20) itération (Figure IV.5). La meilleure performance de la validation, dans cette tentative se produit à la fin des itérations (itération 20). Ce qui montre la difficulté de maitrise de la formation du réseau dans ce cas de figure.

Néanmoins, que ce soit avant ou après renforcement par composites, la programmation avec application des réseaux neurones a été accomplis avec satisfaction. L'erreur est plus réduite avant ($1/10000$) qu'après renforcement par composites ($3/1000$). Soit un rapport significatif d'une valeur de 30. D'autres tentatives sont recommandées pour améliorer cette différence.

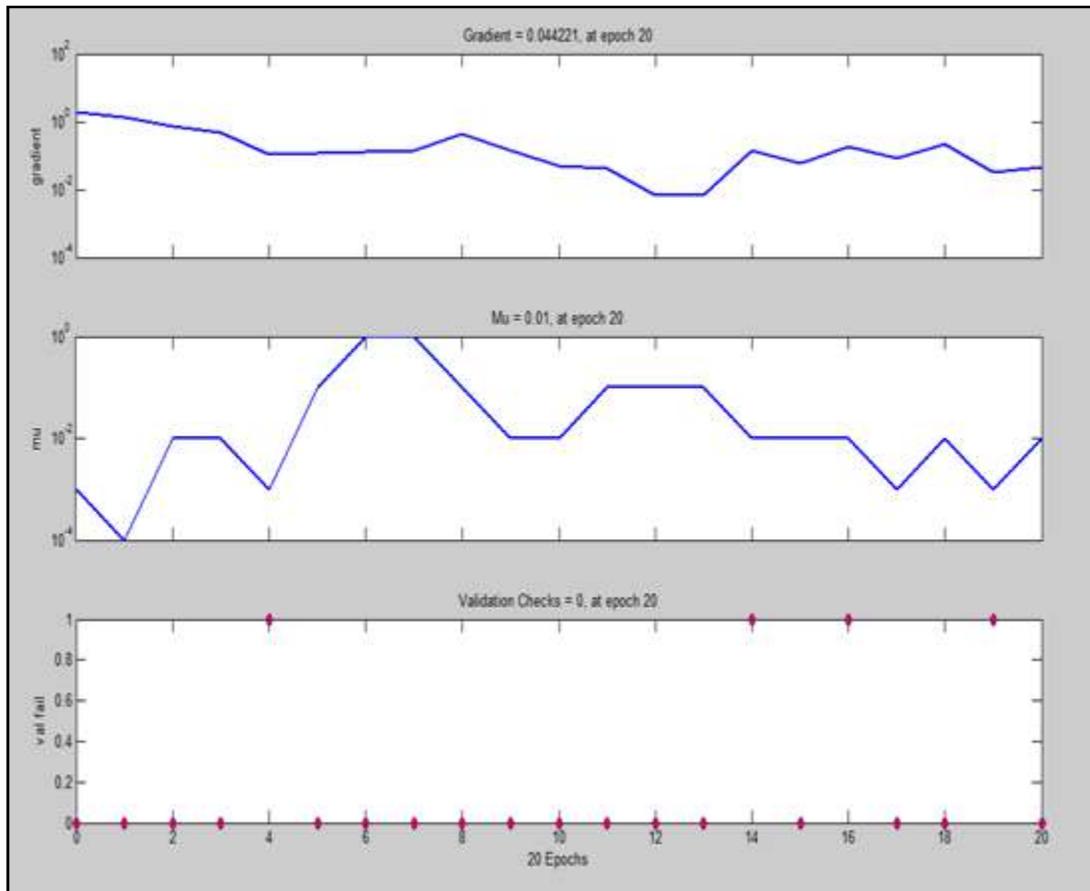


Figure IV.5 : Variation de paramètres dans la formation du réseau après renforcement

Pour la figure VI.6, la corrélation entre les périodes propres des structures mesurées (calculées) et prédites par le modèle pour la base de l'apprentissage, après renforcement, on constate que cette corrélation (pour l'apprentissage) a atteint la valeur de $R = 0.99774$ entre la valeur prédite de la sortie (output) et mesurée, ce qui montre qu'elle est assez bonne avec une erreur absolue de prédiction inférieure à 0.3% de période propre. Concernant la corrélation du test entre la mesurée et la prédite est d'une valeur de 0.99361, donc une erreur absolue de prédiction inférieure à 0.7% de valeur de la période propre de la structure. Ces résultats témoignent donc des capacités de généralisations du RNA très adopté.

IV.4 Comparaison avec résultats numériques

IV.4.1 Cas d'étude

Nous prenons un cas d'exemple de pont à poutres sous chaussées se trouvant dans la wilaya de Tipaza, zone de forte sismicité [10]. La figure ci après montre la vue en plan de l'ouvrage.

Le pont en question est un passage supérieur sur oued Oumazer se trouvant à Cherchell dans la wilaya de Tipaza, distante de 80km à l'ouest d'Alger, se localisant dans la zone III caractérisée par des fortes activités sismiques [3] et [79]. L'ouvrage est un pont hyperstatique à trois travées, le tablier est constitué de quatre poutres maîtresses en béton armé, à inertie variable, liaisonnées par des entretoises et longrines surmontées d'une dalle en béton armé, tandis que l'infrastructure est composée de deux piles, qui sont constituées de quatre poteaux liaisonnés par voiles et de deux sommiers sous forme d'appuis simples, qui sont en béton armé. Les caractéristiques géométriques du pont sont :

- Longueur totale 70,00m
- Longueur de la travée d'accès 15,00m
- La travée intermédiaire 40,00m
- Longueur de la chaussée 6,00m
- Longueur des trottoirs 1,00m
- Hauteur de la pile 10,00m



Figure IV.7 : Vue en plan de l'ouvrage sur oued oumazer à cherchell. [10]

Les mesures des périodes propres ont été effectuées sur le pont avant et après application des fibres de carbone lors de sa réparation. L'objet de ce test dynamique est de déterminer les modes de vibration les plus prépondérantes d'une part et de voir l'influence des composites plaqués sur les poutres pour le comportement du pont d'autre part [32].

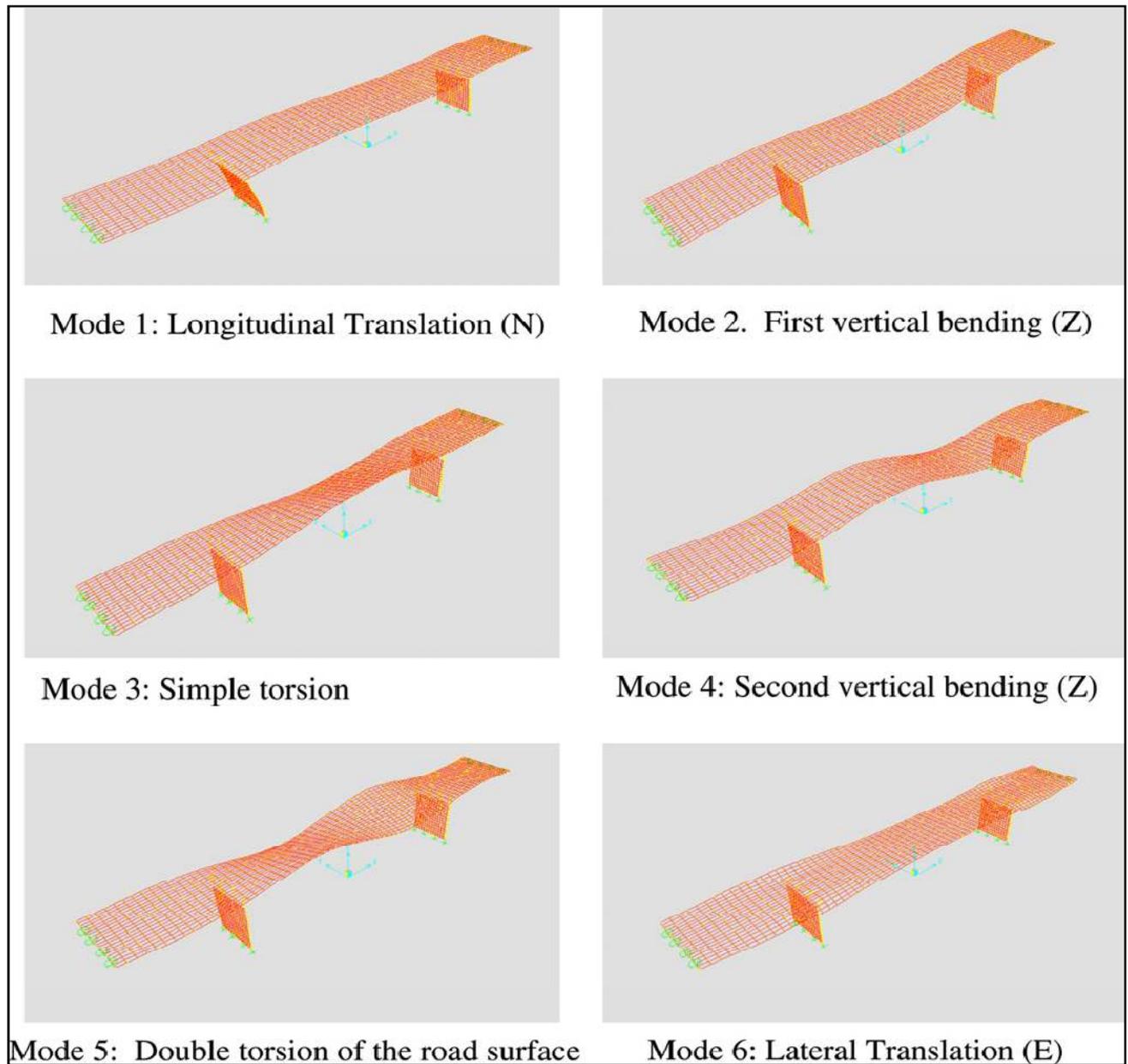


Figure IV.8 : Modèles des six premiers modes propres

IV.4.2 Validation des résultats

La validation des résultats expérimentaux a été effectuée par modélisation de l'ouvrage par le logiciel SAP 2000 [10]. Le tableau ci après illustre les valeurs des 6 modes propres, avant et après renforcement par CFRP, expérimentalement et numériquement.

Tableau IV.2: Comparaison fréquences entre model FE et expérimental

N°	Fréquence avant renforcement (Hz)			Fréquence après renforcement (Hz)		
	Expérim.	Num (Sap)	Ecart (%)	Expérim.	Num. (Sap)	Ecart (%)
1	3.94	2.85	27.7	4.05	4.00	1.23
2	4.55	3.13	31.2	4.67	4.16	10.9
3	4.89	3.89	20.45	5.00	4.54	9.2
4	5.03	8.23	- 63.6	5.07	10.11	- 99.1
5	6.72	13.02	- 93.8	6.93	13.37	- 92.9
6	7.23	13.22	- 82.8	7.36	16.66	- 126.4

En introduisant les écarts trouvés dans la programmation par réseaux de neurones qui sont de l'ordre de 3% avant renforcement par composites et 0.7% après renforcement, par rapport aux valeurs expérimentales, on arrivera aux valeurs mentionnées dans le tableau ci après (Tableau IV.3). On s'intéresse ici au premier mode, puisqu'il s'agit de l'application de la méthode statique équivalente (valeur monomodale).

Tableau IV.3: Comparaison des fréquences entre model expérimental, FE et RNA

N°	Fréquence avant renforcement (Hz)			Fréquence après renforcement (Hz)		
	Expérim.	Num (Sap)	RNA	Expérim.	Num. (Sap)	RNA
1	3.94	2.85	3.82	4.05	4.00	4.02

Ce tableau montre que les valeurs expérimentales et par simulation par réseaux de neurones sont presque semblables (voir très rapprochées), objectifs principales de l'application des RNA.

Cependant, les valeurs numériques peuvent être améliorées avec plusieurs tâtonnements et avec un choix approprié du modèle mathématique (choix adéquat des caractéristiques, condition aux limites, réflexion sur l'interface support-composite, etc.).

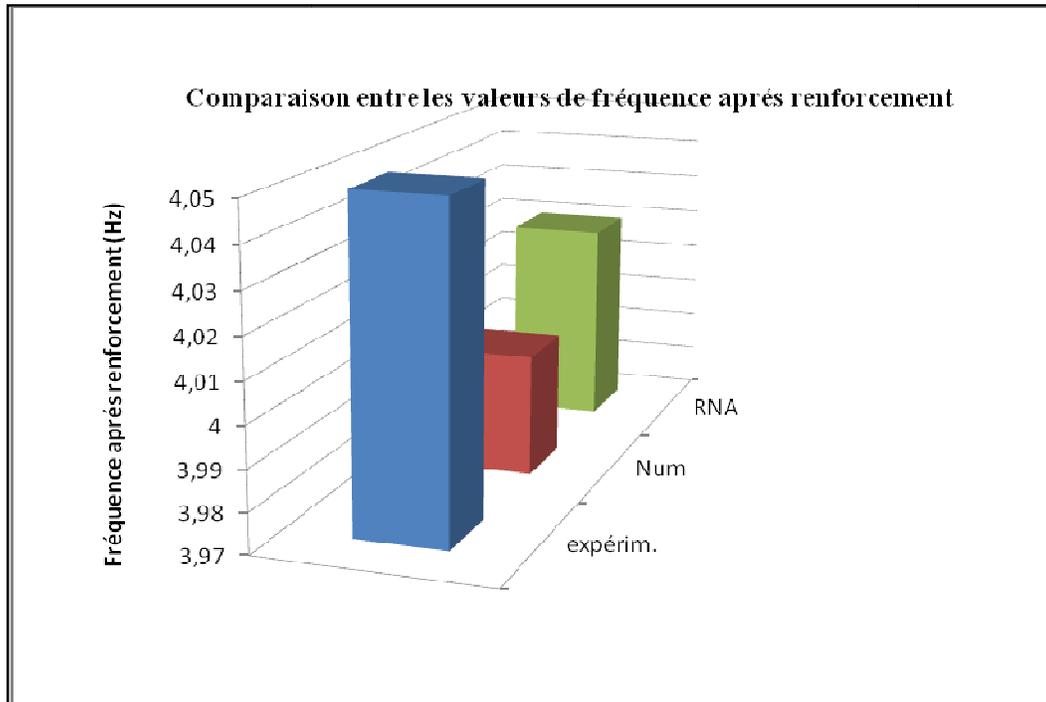


Figure IV-9 Comparaison des fréquences des trois simulations avant renforcement

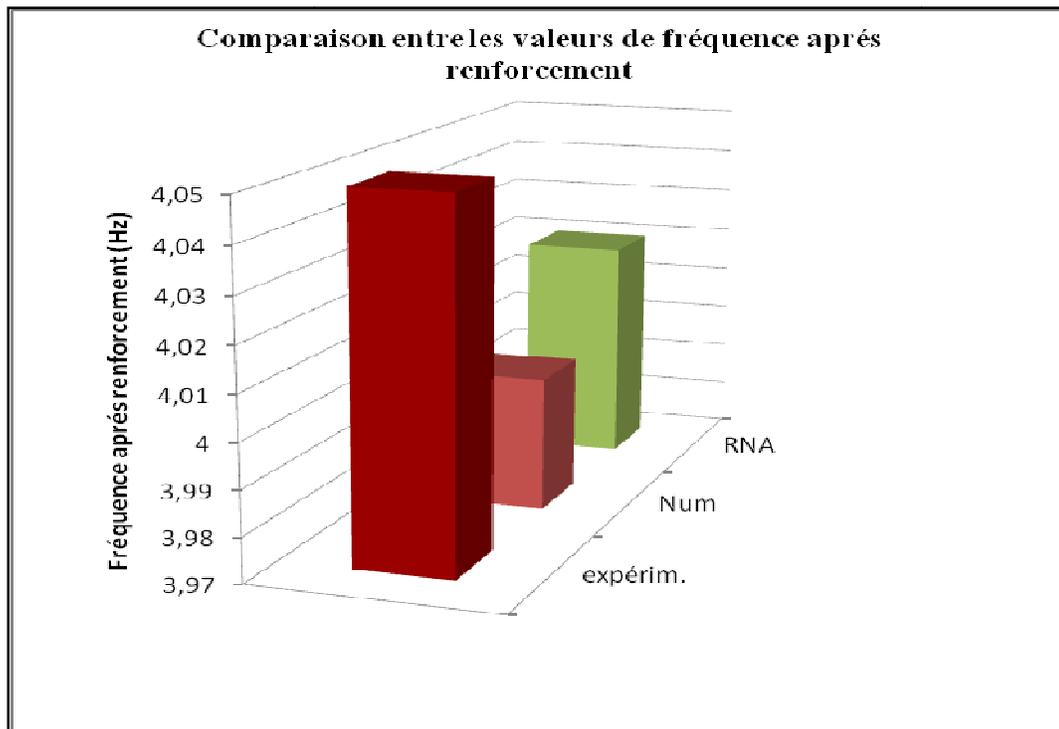


Figure IV-10 Comparaison des fréquences des trois simulations après renforcement

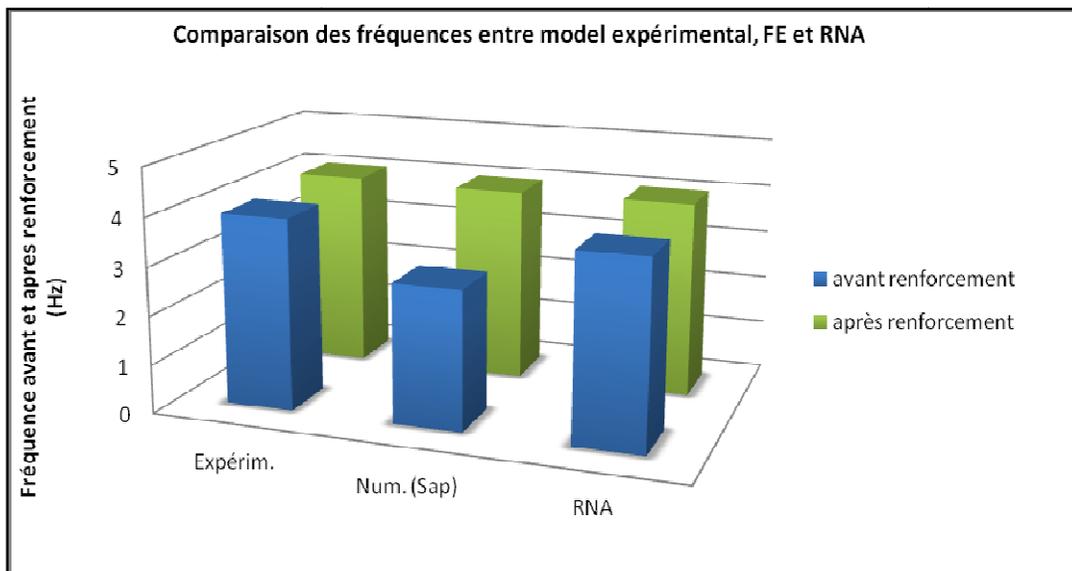


Figure IV-11 Comparaison des fréquences avant et après renforcement

IV.4.3 Autre exemple

Avec le manque d'études similaires, dans la prédiction de la période de vibration pour ponts renforcés, avant et après renforcement, nous nous sommes contentés aux exemples traitant l'influence (sur les fréquences) du collage du composite sur le comportement de ces ponts.

Le deuxième exemple, est le travail mené par F. Necati Catbas et al. en 2007, où des études très approfondies ont été lancées pour évaluer le comportement d'un pont réhabilité par application de matériaux composites à base de fibre de carbone [84]. Il s'agit d'un pont ancien appelé "pont 2028" sur PR28, à poutres sous chaussée en béton armé, se trouvant sur l'autoroute 52 près de la ville Cayey au Porto Rico (Figure IV.7).



Figure IV-12: Vue d'ensemble du "Pont 2028 sur RN 52" [84].

Ce pont a été mis en service en 1997. C'est un ouvrage composé de deux ponts jumelés, de deux travées chacun de 25 mètre, séparés par un joint. Chaque pont dispose d'une chaussée qui comporte trois voies de la circulation. La superstructure est en béton armé, composée de neuf (09) poutres continues en forme de T qui surmontent une dalle. L'inertie des poutres est variée avec une hauteur allant de 0.9 à 1.9 mètre.

Afin de réhabiliter cette ouvrage, vu les dégradations prononcées et les fissures apparentes aux poutres, l'application des composites CFRP collés avait pour objectif, la réparation de ces dégradations et le renforcement de l'ouvrage qui sera capable de recevoir d'autres charges plus importantes du trafic selon le règlement AASHTO [84].

Les résultats trouvés par l'expérimentation et par modélisation sont illustrés par la figure ci après (Figure IV.8) ainsi que le tableau IV.4 des valeurs.

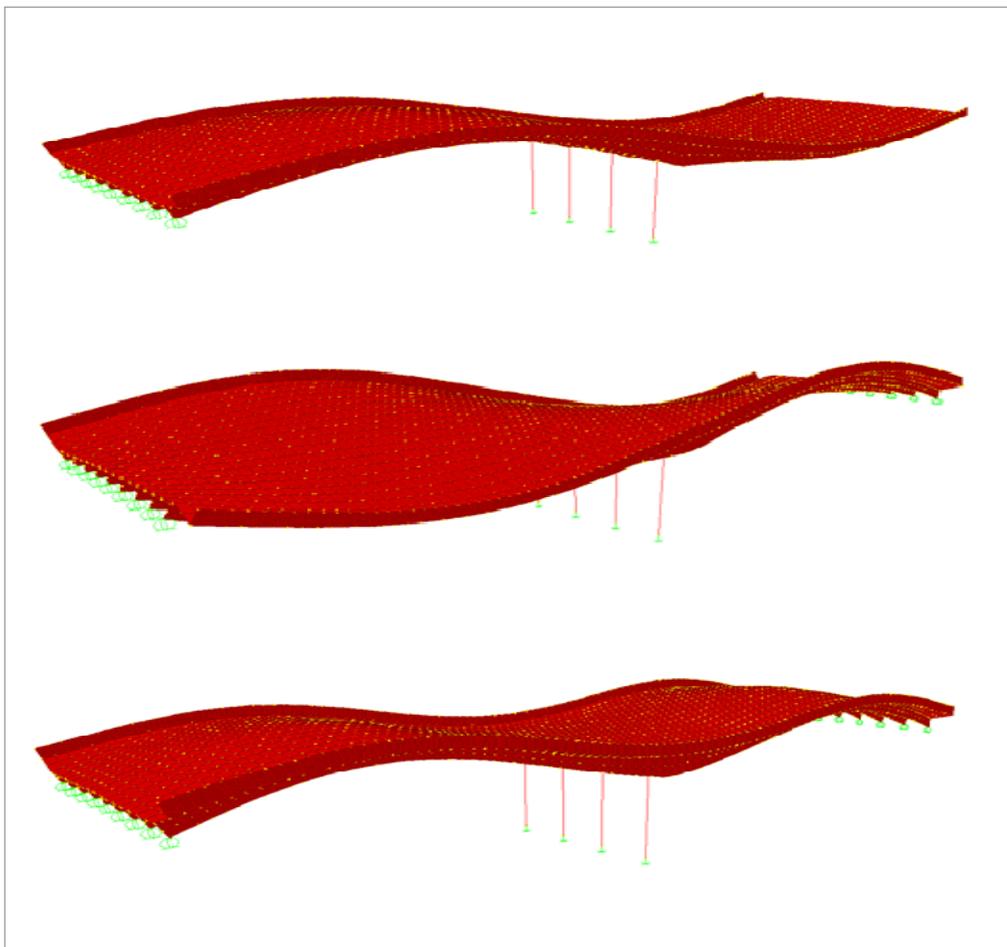


Figure IV-13 : Premiers modes de vibration de l'ouvrage testé.

Tableau IV.3: Fréquences expérimentales avant et après renforcement.

Opération/Mode	Test avant F(Hz)	Test après f(Hz)	Changement (%)
1	2.64	2.83	7.2
2	3.39	3.61	6.49
3	4.28	4.39	2.57
4	5.36	5.45	1.68
5	6.24	6.33	1.44
6	-	9.55	-

De la même façon que l'exemple précédant et en introduisant les résultats des valeurs trouvés, on déterminera les fréquences du mode prépondérant (monomodale) de l'ouvrage testé (Tableau IV.4). La confrontation entre les résultats des trois méthodes (expérimentale, numérique et paramétrée) donne une certaine ressemblance entre le réel (pratique) et celui du réseau de neurones avec des pourcentages de 3% (avant réparation) et 0.7% (après réparation).

Tableau IV.4: Comparaison des fréquences entre model expérimental, FE et RNA.

N°	Fréquence avant renforcement (Hz)			Fréquence après renforcement (Hz)		
	Expérim.	Num (Sap)	RNA	Expérim.	Num. (Sap)	RNA
1	2.64	2.48	2.56	2.83	2.57	2.65

En faite, entre l'expérimentation et le numérique, un écart (erreur) de l'ordre de 6% (avant réparation) et de l'ordre de 9.2% (après réparation), ce qui montre que le modèle numérique choisi nécessite autres améliorations, voir changement, des hypothèses utilisées. Cet exemple confirme, encore une fois, la réduction de l'erreur consentie entre l'expérimental et le RNA.

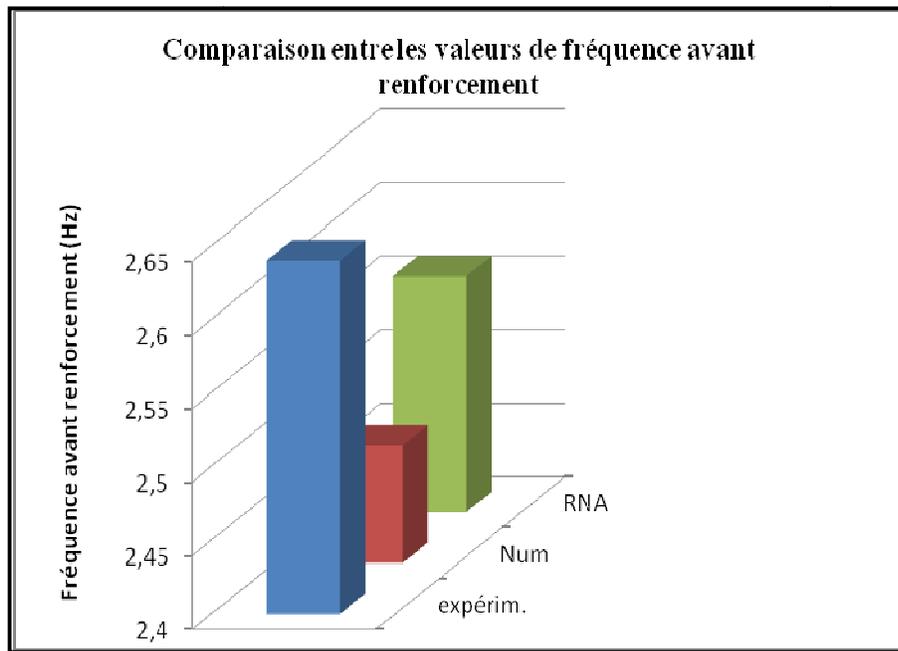


Figure IV-14 Comparaison des fréquences des trois simulations avant renforcement

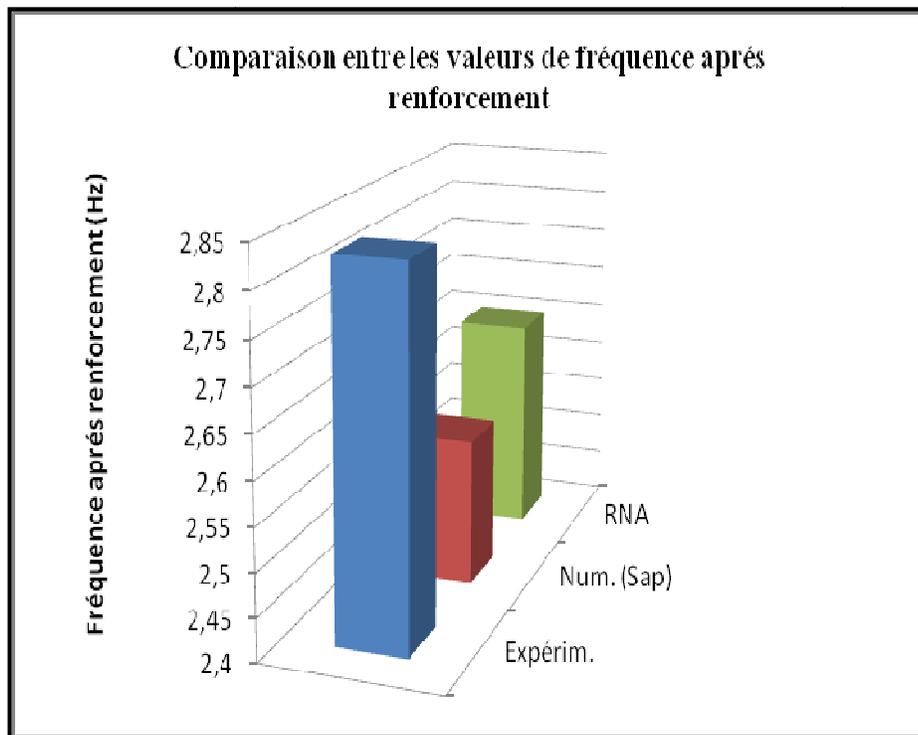


Figure IV-15 : Comparaison des fréquences des trois simulations après renforcement.

Enfin, et concernant la comparaison (Figure IV.16) des valeurs des fréquences de l'ouvrage avant et après renforcement par composites pour les trois simulations (modèle expérimental, modèle numérique et réseaux de neurones), on constate que le renforcement augmente cette fréquence (diminution de la période) ce qui confirme nos résultats déjà trouvés, puisque le composite rigidifie le structure (K augmentée).

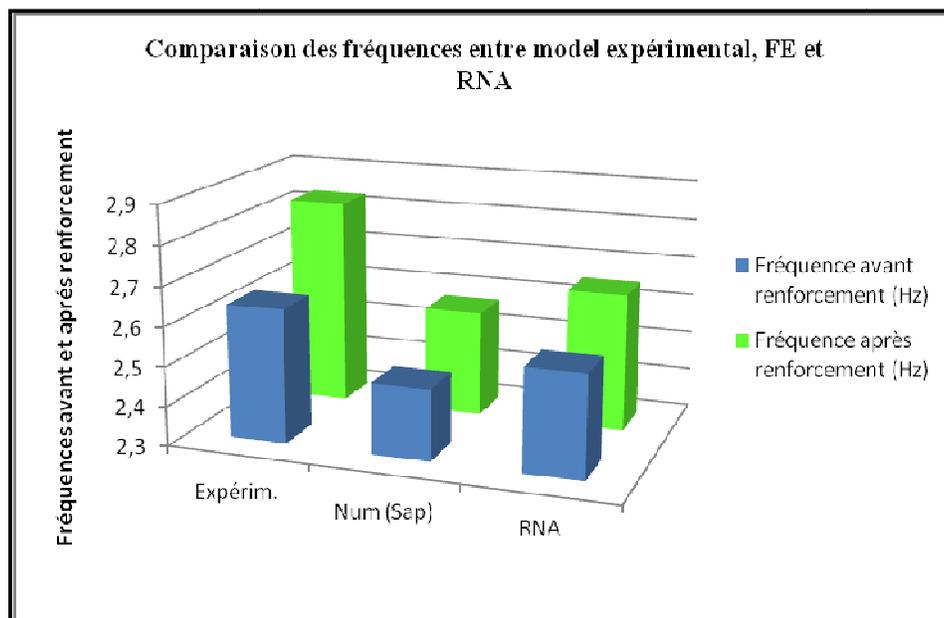


Figure IV-16 : Comparaison des fréquences avant et après renforcement

Conclusion Générale et Recommandations

Conclusion générale et recommandations

Au terme de cette étude, qui consistait tout d'abord à bien comprendre les matériaux composites à base de fibres de carbone et leur application comme acier additif collé extérieurement sur les surfaces du béton des poutres et des piles de ponts en état qui présentait détériorations et fissurations, avec la prédiction de leur comportement dans le temps par mesure de leur période propre (prépondérante) par application de l'intelligence artificielle avec la méthode appelée les réseaux de neurones.

En effet, après plusieurs tentatives relatives à la compréhension et à la programmation des réseaux de neurones par le logiciel Matlab effectuée sur la base d'une base de données composée d'un nombre avoisinant les cent (100) cas d'étude de ponts se trouvant dans la wilaya d'Alger, caractérisée par un climat agressif (vulnérabilité d'agressivité qui peut engendrer des dégradations), par un zonage de moyenne ou forte sismicité ainsi qu'un trafic instance (vibrations permanentes), nous avons pu arriver à la prédiction du comportement de ces ouvrages par le biais des courbes de performance et de corrélation entre la période mesurée et la période prédite, et ceux avant et après le renforcement de l'ouvrage par composites collés par confinement de leurs futs (piles).

Quantitativement, si l'erreur (l'écart) était de l'ordre de 5% jusqu'à 20% entre l'expérimentation et le numérique (éléments finis), cette erreur a pu être réduite par l'application des réseaux de neurones et qui désormais varie entre 0,7% et 3% (principal objectif).

Néanmoins, et afin de réduire plus cet écart, il est recommander pour future étude d'augmenter le nombre de cas d'étude (base de données), voir d'autres recherches plus pointues dans ce domaine et augmenter le nombre de tests dynamiques expérimentaux afin de bien maîtriser la programmation par RNA.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] : SAHAO, BOUTALEBA, Applications des réseaux de neurones aux matériaux dans le génie civil état de l'art, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique d'Oran, Algérie, 2006.
- [2] : Ministère des travaux publics, Recensements des ouvrages d'art en Algérie, Alger, 2008.
- [3] : Ministère des Travaux Publics, Direction des Routes, Règlement Parasismique Algérien des Ouvrages d'Art (RPOA), Alger, Algérie, Juin2008.
- [4] : M. SIDNEY, Dégradation, entretien et réparation des ouvrages, éditions Eyrolles, Paris, 1969.
- [5] : S. BENYAMINA, Comportement d'un tablier de pont à poutres multiples sous chaussée en béton armé réparé par matériaux composites, thèse de magister, université de Blida, Avril 2008.
- [6] : C. DESPREZ, Analyse et réduction de la vulnérabilité sismique des structures existantes en béton armé : Renforcement par collage de tissus de fibres de carbone (TFC), thèse de doctorat, université de Grenoble, Juillet 2010.
- [7] : D. POINEAU, J A. CALGARO, Pathologie et évaluation des ponts existants et principaux désordres, Techniques de l'ingénieur, 2010.
- [8] : AFG/ CEFACOR (centre français de l'anticorrosion),'' Réhabilitation du béton dégradé par la corrosion'', document technique, Novembre 2003.
- [9] : S. HAOUARA, A. GUETTALA, Les Facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton armé dans la région de Biskra, article, Université de Biskra, 2005.
- [10] : M. ABDESSEMED, Etude expérimentale et modélisation du comportement des poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites sous flexion cas des ponts, thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, Juin 2011.
- [11] : M. BOUKHEZAR, réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites, thèse de magister, département du génie civil, université de Mentouri, Constantine, 2009.
- [12] : GCI714, Durabilité et réparation du béton, chapitre III, université de Sherbrooke.
- [13] : FABEM, Traitements des fissures par injection, guide stress.
- [14] : M. ABDESSEMED, Comportement des poutres isostatiques en béton armé renforcées par des fibres de carbone, thèse de magister, département de génie civil, université de Blida, 2003.
- [15] : A. GUETTALA, S. BENMEBAREK, Diagnostic et réparation d'un pont en béton armé, département de génie civil, Université de Biskra, 2002.
- [16] : A. MENDAS, Utilisation du TFC dans la réparation des poutres en béton armé, thèse de magister, université de Mantouri, Constantine, 2005.
- [17] : Glossaire des matériaux composites, Centre d'animation régional en matériaux avancés, Octobre 2006.

- [18] : J M. BERTHELOT, Matériaux composites, Comportement mécanique et analyse des structures, Université de Maire, 1992.
- [19] : F. HADDOUCHE, Analyse numérique du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites, thèse de magister, université de Blida, 2007.
- [20] : L'industrie française des matériaux composites, rapport Nodal consultants, Mai 2002.
- [21] : J. LUYCKX, composites à fibres de carbone dans le génie civil, techniques de l'ingénieur, 2010.
- [22] : C. DIAGANA, A. LI, L. BOUAZAOUI et Y. DELMAS, Renforcement des poutres en béton armé par collage de bandes de TFC, XXI^{èmes} rencontres universitaires de génie civil, GMMS, Université de Reims champagne Ardemre, 2003.
- [23] : Refhorm, Etude des spécificités des bétons de la première moitié du 20^{ème} siècle et leur adaptabilité aux nouvelles technologies de renforts composites, rapport final, Septembre 2009.
- [24] : R. BENZAID et N E. CHEIKH, Renforcement et réparation des structures en béton armé par matériaux composites, université de Jijel, 2004.
- [25] : R. SUTER et J. DAC, Confinement de colonnes au moyens de tissus en matériaux composites, revue chantiers, Mai 2001.
- [26] : R. SUTER, Renforcement parasismique au moyen de matériaux composites, école d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg, Suisse.
- [27] : R. SUTER et al., Chocs de véhicules lourds, renforcement des piles de pont au moyen de tissus en Kevlar, revue chantiers, Octobre 2001.
- [28] : M. CHATAIN, Matériaux composites présentation générale, techniques de l'ingénieur, volume AM5,2000.
- [29] : Van ERP G, C. CATTEL, S. Ayers, A fair dinkum approach to fibre composites in civil engineering (Australia), Elsevier, construction and building materials 20, 2006.
- [30] : Structure rénovation/ DEC, unité de réalisation, SAPTA, expertise et réparation des ouvrages d'art en béton, El Harrach, 2009.
- [31] : E. David, C. Djelal et Buyle-Bodin F, Endommagements et réparation des poutres en béton armé à l'aide de matériaux composites, 14ème Rencontre Universitaire de Génie Civil, Clermont Ferrand, 9-10 Mai 1996, France.
- [32] : Abdessemed M., Kenai S. , Bali A. et Kibboua A., Dynamic analysis of a bridge repaired by CFRP, Experimental and numerical modelling, Science Direct, Elsevier, Journal "Construction & Building Materials", Volume 25, Issue 3, March 2011, Pages 1270-1276.
- [33] : M. SENOUCI et H. BAGHDADI, Réseaux de neurones, théorie et pratique, LTE, Oran ENSET, Oran, Algérie, 2005.
- [34] : R. TOUHAMI, I. BADJI, Modélisation par les réseaux de neurones récurrent et implémentation FPGA d'un champ photorécepteur détecteur de mouvement, thèse de fin d'étude, Département d'électronique, Université de Blida, 2009.

- [35] : Alp Mestan, Introduction aux réseaux de neurones Feed Forward, 2008.
- [36] : M A. SHAHIN, State of the art of Artificial Neural Network in geotechnical engineering, Département de génie civil, Curtin Université de technologie, Australie, 2009.
- [37] : Y. AMMAR, Mise en œuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch/continu, thèse de doctorat de l'INP, Toulouse, 2007.
- [38]: Rumelhart et al, Learning interval representation by error propagation, ' Parallel distributed processing', 1986.
- [39] : K. VIRIYAMETANONT, Reconnaissance physique et géométrique d'éléments en béton armé par radar et réseaux de neurones artificiels, thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, 2008.
- [40] : I. FLOOD, A neural network approach to the sequencing of construction tasks, proceeding of the 6th international symposium on automation and robotics in constructions, construction industry institute, Austin, pp. 204-211, 1989.
- [41] : D. TOOL, Artificial intelligence applications in geotechnical engineering, électronique journal of geotechnical engineering, university of Durham, UK, 29p, 1996.
- [42]: CI. TEH and al, A prediction of pile capacity using neural network, journal of computing in civil engineering, 1997.
- [43] : NO. NAWARI and al, An artificial intelligence techniques for the design and analysis of deep foundations, électronique journal of geotechnical engineering, department of civil engineering, university of akron OH, USA, 1999.
- [44] : DN. URAL et H. SAKA, Liquefaction assessment by neural networks, électronique journal of geotechnical engineering, UK, 1998.
- [45] : J. KASPERKIEWIEZ, J. KACZ and A.DUBRAWISKI, HPC strength prediction using artificial neural network, Journal in civil engineering, Vol 9, pp 279, 1995.
- [46]: J. W. Oh, I. W. Lee, J. T. Kim, and G. W. Lee, « Application of neural networks for proportioning of concrete mixes» ACI Material Journal, Vol. 96, pp. 61, 1999.
- [47]: H. G. Ni, and J. Z. Wang, « Prediction of compressive strength of concrete by neural networks» Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1245, 2000.
- [48]: S. C. Lee, « Prediction of concrete strength using artificial neural networks» Engng. Structure, Vol.25, pp. 849, 2003.
- [49]: J. I. Kim, D. K. Kim, M. Q. Feng, and F. Yazdani, « Application of neural networks for estimation of concrete strength», J. Mat. Civil Engng. Vol. 16, pp. 257, 2004.
- [50]: D. K. Kim, J. J. Lee, J. H. Lee and S. K. Chang, « Application of Probabilistic Neural Networks for Prediction of Concrete Strength», J. Mat. Civil Engng. Vol. 17, pp. 353, 2005.

- [51]: Yeh IC, Modeling of strength of high performance concrete using artificial neural network, cement and concrete research, 1998, vol 28, n° 12, p 1797-1808.
- [52]: Dias WPS, Poolivadaa SP, Neural network for predicting properties of concretes with admixtures, Construction and building materials, 2001.
- [53]: Sbartai z.m., Laurens s., Rhazi j., Balayssac j.p., Arliguie g. 'using Radar direct wave for concrete condition assessment: correlation with electrical resistivity'. Journal of applied geophysics. 2007, vol. 62, issue 4, p. 361-374.
- [54]: öztas a., pala m., özbay e., kanca e., çağlar n., bhatti m.a. 'predicting The compressive strength and slump of high strength concrete using neural network'. Construction and building materials. 2006, vol. 20, p. 769-775.
- [55]: Bhokha S., Application of ANNs to forecast Pre-design construction cost and duration of buildings, PhD Thesis, School of civil engineering, Asian institute of technology (AIT), 1998.
- [56]: Khaldoun N., Rahal N. et Abu-Kiefa M., Neural Networks for calculation of shear strength of reinforced concrete beams, Kuwait Journal of science and environment, Vol 26, N°2, pp.240-251, 1999.
- [57]: Sanad A. Saka MP. Design of reinforced concrete structures using neural networks, proceeding of the 2nd International conference in civil engineering on computer applications, research and practice, vol.1, Department of civil and architectural engineering, University of Bahrain, pp. 69-83, 1996.
- [58]: Papadrakakis N., Largos N.D et Tsompanakakis Y, Structural optimization using evolution strategies and Neural Networks, Journal of computer methods in applied mechanics and engineering, N° 156, pp. 309-333, 1998.
- [59]: Papadrakakis N., Papadopoulos V. et Largos N.D., Structural reliability analysis of elastoplastic structures using neural networks and monte Carlo Simulation, Journal of computer methods in applied mechanics and engineering, Vol.136, pp.145-163, 1996.
- [60]: Hiratsuka K., Shingu K., Dynamic response of conical shell using neural networks based vibration control, 12WCEE, N° 0450, 6p, 2000.
- [61]: Yeh IC., Kuo YH., Building and expert system for debugging FEM input Data with artificial neural networks, Expert system with Applications, Vol. 5, pp. 59-70, 1992.
- [62]: Basma AA., Suleiman TI. Et Obaidat MT., Feasibility of using artificial neural networks in assessing pavement condition, proceeding of the 2nd international conference in civil engineering on computer applications, research and practice, Vol.1, Department of civil and architectural engineering, University of Bahrain, pp. 85-92, 1996.
- [63]: Wong FS., Thint MP, et Tung AT, On line detection of damage using neural networks, weidlinger associate, CA 94022, USA, 27p, 1996.
- [64]: Sdhabhon B. application of ANNs to forecast pré-design construction cost and duration of building, thesis of master in school of civil engineering Asian institute of technology (AIT), 110 p.1998.
- [65]: LIU S.W., HUANG J.H. SUNG J.C., LEE C.C. 'Detection of cracks using neural networks And computational mechanics'. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 2002, vol. 191, p. 2831-

2845.

[67] : Hola j., schabowicz k. 'new technique of non-destructive assessment of concrete Strength using artificial intelligence'. *Ndt&e international*. 2005, vol. 38, n° 4, p. 251-259.

[68]: kewalramani m.a., gupta r. 'concrete compressive strength prediction using Ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks'. *Automation in construction*. 2006, vol. 15, p. 374-379.

[69]: mansour m.y., dicleli m., lee j.y., zhang j. 'predicting the shear strength of Reinforced concrete beams using artificial neural networks'. *Engineering structure*. 2004, vol. 26, p. 781-799.

[70]: SAKLA S.S.S., ASHOUR A.F. 'Prediction of tensile capacity of single adhesive anchors using neural networks'. *Computers and Structure*. 2005, vol.83, p. 1792-1803.

[71] : INEL M. 'Modeling ultimate deformation capacity of RC columns using artificial neural networks'. *Engineering Structure*. 2007, vol. 29, p. 329-335.

[72]: K. Ramanjancylu, V. Srinivas, Application of neural network for design responses of bridge decks, structural engineering research centre, CSIR campus, Taramani, Chennai, 2006.

[73] : Exemple de dimensionnement d'un pont, Annexe B, SAPTA.

[74] : B. Boukhatem, Application des réseaux de neurones pour la prévision des propriétés des bétons avec ajouts, thèse de magister, Département de génie civil, Université de Blida, 2003.

[75] : Fiches techniques des ponts de la wilaya d'Alger, CTTTP, 2011. [78] :Matlab user's guide, version 7.10, 2010.

[76]: R. Younes, Initiation sur Matlab, faculté de génie mécanique, Université Libanaise, Beyrouth, 2005.

[77]: Flood I, Muszynski L and Nandy S., Rapid analysis of externally reinforced concrete beams using neural networks, *Journal Computers and structures*, 79 (2001) 1553-1559, Pergamon, February 2001.

[78]Sbartai Z.M., Radar et réseaux de neurones artificielles appliqués à l'évaluation non destructive des teneurs en eau et en chlorure des bétons, XXIV^{ème} Rencontres universitaires de Génie Civil 2006, Prix Jeunes Chercheurs, France.

[79] Omer F. Cansiz and Said M.Easa, Using artificial neural network to predict collisions on horizontal tangents of 3D two-lane highways, *International journal of engineering and applied sciences*, 7-1-2011.

[80]: Catbas FN, Grimmelman KA, Ciloglu SK, Burgos-Gil I, Coll-Borgo M. Static and dynamic testing of a concrete T-beam bridge before and after carbon fiber reinforced polymers (CFRP) retrofit. *Journal Transport Res Board* 2006(1976):77-87.

Annexe I
