

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

Université Saâd Dahleb de Blida

Faculté des sciences de l'ingénieur

Département de Génie Civil

Mémoire de Master II

Option : Géotechnique

Titre :

**Modélisation et analyse par réseaux de neurones
artificiels du renforcement sismique des piles de
ponts par matériaux composites (CFRP)**

Proposé par :

Ministère des Travaux Publics (DIA/MTP)

Présenté par :

Mr. Djebari Ilyes Adel

Mr. Hakem Saâd-Eddine

Encadré par

Dr. Mouloud ABDESSEMED

Directeur Central/MTP

Université Saâd Dahleb de Blida
Décembre 2012

Remerciements

Nous souhaitons remercier en premier lieu notre encadreur et professeur, le Dr. Mouloud Abdessemed, Directeur des Infrastructures Aéroportuaires au Ministère des Travaux Publics, pour tout le savoir qu'il nous a dispensé durant ces deux dernières années de travail, et surtout de la confiance qu'il nous a accordé, dans un thème relativement difficile à traiter.

On voudrait exprimer notre gratitude à Mr. Alloune Nabih, Magistère en Electronique, pour son aide très précieuse.

Nous sommes reconnaissants envers Mr. Eid Rédha, Ingénieur d'Etat en Génie Géotechnique, pour tous ses conseils.

On tient à remercier Mr. Bouiche Abd-El-Hak, Master en Recherches Opérationnelles, et Mr. Meguenni Youcef, Master en Automatismes, de leur assistance dans les moments difficiles.

Sans oublier de remercier le Professeur Mnewer, Membre fondateur de la société « LE CACT », Mr. Kerkar Slim, Master en Génie Géotechnique, pour l'aide qu'ils nous ont proposé.

Ainsi que Mr. Kibboua, Chercheur au Centre de Génie Sismique pour son aide à finaliser notre travail.

On adresse également nos remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

On tient à exprimer nos remerciements à tous les enseignants qui ont accepté d'apporter leurs aide par des conseils et des prestations de documents et références bibliographiques, et en particulier nos professeurs de l'université de Blida.

Dédicaces

A nos parents avant tout, nos familles respectives et nos proches, pour tous leurs sacrifices, la détermination ainsi que l'abnégation qu'ils ont su nous inculquer durant toutes nos années d'études.

A Yasmine & Nadia, Inès, Rabab, Abd-El-Djalil, Sid-Ali, Walid, Saâd-Eddine et Zinedine qui à chaque moment étaient présents quand le moral n'était pas au rendez-vous, à Salim et Rédha pour leurs encouragements, à Mourad et Taher en espérant que vous alliez mieux.

A Mahrez, Nesrine, Abd-El-Raouf, Assam, et Ilyes Adel qui ont été présents dans les moments difficiles, à Maya & Mounia de l'université de Bab Ezzouar, qui nous ont soutenues techniquement et moralement, à Sofiane, Smail, et tous nos collègues.

A tous nos camarades, et tous ceux de la faculté des sciences de l'université de Blida qui nous connaissent de près ou de loin.

Ilyes Adel & Saâd-Eddine

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 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 bridges' structures. 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 an appropriated choice of the architecture and the process of training of the network used, we found the values estimated period's vibration for 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.

ملخص

تعرض هذه الدراسة أولاً، المواد المركبة و مزاياها في تعزيز هياكل الجسور. ومن ثم، السلوك الديناميكي، بتوقع قيم فترة اهتزاز عدد من الجسور (قاعدة بيانات) الواقعة في مناطق متعرضة 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).

Sommaire

Introduction générale.....01

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

I-1 Les ouvrages d'art en Algérie..... 03

I-1-1 Distribution des ouvrages d'arts selon le zonage sismoque..... 03

I-1-2 Bilon des ponts en Algérie..... 03

I-2 Pathologie des ponts..... 04

I-2-1 Actions permanentes (statiques)..... 04

I-2-2 Actions dues au trafic (dynamiques)..... 04

I-2-3 Actions a caractère accidentel 04

I-3 Constat des pathologies..... 06

I-3-1 Objectifs..... 06

I-3-2 Investigations visuels 07

I-3-3 Mesures in-situ 07

I-3-3-1 Mesures relatives à la résistance du béton 07

I-3-3-2 Mesures relatives à la qualité du béton ou à son vieillissement 10

I-3-4 Etude et analyse des éléments recueillis..... 12

I-3-5 Conclusions et recommandations 13

I-4 Procédés de renforcement des ponts en B.A13

I-4-1 Traitements de surfaces 13

I-4-2 La protection du béton et des armatures..... 15

I-4-3 Régénération des matériaux..... 17

I-4-4 L'ajout de forces (ou de déformations)..... 17

I-4-5 Ajout de matière	18
I-5 Matériaux composites	18
I-5-1 Définition et identification	19
I-5-1-1 Le renfort	19
I-5-1-2 La matrice.....	20
I-5-1-3 Charges et additifs	20
I-5-2 Classification des matériaux composites	21
I-5-2-1 Classification suivant la forme des constituants.....	21
I-5-2-2 Classification suivant la nature des constituants	21
I-5-3 Modèles de renforcement	22
I-5-4 Différents types de matériaux composites	23
I-5-5 Matériaux composites à base de fibres de carbone.....	24
I-5-5-1 Propriétés des fibres de carbone	24
I-6 Confinement des colonnes par composites	26
I-7 Comportement des poutres renforcées par composites	30
I-7-1 Résultats des poutres renforcées	30
I-8 Comportement d'une dalle renforcée par composites.....	31
I-8-1 Résultats expérimentaux.....	32
I-9 Quelques exemples de matériaux composites appliqués pour le renforcement des ponts	32
I-10 Conclusion.....	38

Chapitre II..... Les réseaux de neurones en génie civil

II-1 Avant-propos.....	39
II-2 Principe de la méthode	39

II-3 Architecture des réseaux de neurones.....	40
II-3-1 Les réseaux de neurones statiques.....	40
II-3-1-1 Les réseaux de neurones complètement connectés.....	41
II-3-1-2 Les réseaux de neurones à couches.....	41
II-3-2 Les réseaux de neurones dynamiques.....	41
II-4 Apprentissage des réseaux de neurones.....	42
II-4-1 Algorithme d'apprentissage	43
II-5 Conception d'un réseau de neurones.....	43
II-5-1 Détermination des entrées/sorties du réseau de neurones.....	44
II-5-2 Choix et préparation des échantillons.....	44
II-5-3 Elaboration de la structure du réseau.....	44
II-5-3-1 Nombre de couches cachées.....	44
II-5-3-2 Nombre de neurones cachés.....	45
II-5-4 Apprentissage.....	45
II-5-5 Calcul de la valeur prédite.....	45
II-5-6 Validation et Tests	46
II-6 Application des réseaux de neurones en génie civil.....	46
II-6-1 Application des réseaux de neurones en géotechnique.....	46
II-6-2 Application des réseaux de neurones en technologie des bétons et matériaux.....	47
II-6-3 Prédiction du comportement des structures par les réseaux de neurones.....	48
II-7 Exemple d'application des réseaux de neurones	49

Chapitre IIIprévision du comportement des ponts par les réseaux de neurones

III-1. Avant-propos.....	52
III-2 Problématique.....	52
III-3 Elaboration de la base des données.....	53
III-3-1 Au sens longitudinal.....	53
III-3-2 Au sens transversal.....	53
III-3-2-1 Modèle mathématique.....	53
III-4 Application des réseaux de neurones.....	55
III-4-1 Choix du réseau.....	55
III-4-2 Méthodologie.....	55
III-4-3 présentation du logiciel Matlab.....	56
III-4-4 Architecture du réseau RPG.....	59
III-4-5 Sélection de l'algorithme d'apprentissage.....	59
III-4-6 Apprentissage et test du réseau RPG.....	60

Chapitre IV.Résultats et commentaires

IV-1 Présentation des résultats	62
IV.1-1 Principe	62
IV.2 Mise en œuvre des réseaux de neurones	62
IV.2 Résultats trouvés	64
IV.2.1 Avant renforcement	64
IV.2.2 Après renforcement	67

Conclusion générale et recommandations69

Liste des figures

Figure I-1 Pourcentage des ponts dans les zones sismiques.	03
Figure I-2 Etat récapitulatif des ouvrages d'art en Algérie en nombre.	04
Figure I-3: Affouillement des rivières sur les ponts.....	05
Figure I-4 : Rupture des piles par cisaillement	05
Figure I-5 : Choc de véhicule sur une pile	06
Figure I-6: Le scléromètre.....	08
Figure I-7: Appareil d'auscultation par ultrasons.	08
Figure I-8: Le pachomètre.....	09
Figure I-9: Le profomètre.....	09
Figure I-10: Le corrosimètre	10
Figure I-11 : Roue électrode Détection des armatures au radar	10
Figure I-12: Le fissuromètre	11
Figure I-13: L'hygromètre	12
Figure I-14 : Injection de fissures	14
Figure I-15 : Calfeutrements des venues d'eau par mortier de ciment hydrofugé.....	15
Figure I-16 : Constitution des matériaux composites.....	19
Figure I-17 : Fibres parallèle	22
Figure I-18 : Fibres coupées et broyées	23
Figure I-19 : Fibres orientées	23
Figure I-20 : Tissu de fibre de carbone	25
Figure I-21 : Comparaison entre les aciers et les matériaux composites	25
Figure I- 22 : Enchemisement avec CFRP préfabriqué et in-situ	27
Figure I-23 : Enveloppement total de la pile.....	27
Figure I- 24 : Colonne partiellement enveloppée par CFRP	27
Figure I-25 : Courbe (contrainte- déformation) idéalisée pour un béton confiné par CFRP.....	28
Figure I- 26: Essais de compression sur des colonnes confinées.....	28
Figure I-27 : Rupture d'une colonne carrée avec confinement en carbone	28

Figure I-28 : Rupture de colonnes renforcées par des confinements en fibres d'aramide et de carbone.....	28
Figure I-29 : Essais de flexion sur des colonnes renforcées par des tissus de CFRP.....	29
Figure I-30: Essais d'effort tranchant sur des colonnes en béton avec ou sans renforcements par des tissus en CFRP	29
Figure I-31 Courbes force-flèche des différents renforcements.....	31
Figure I-32 : dispositif expérimental	31
Figure I-33: Pont blanc d'El Harrach (Alger) avec dégradation au niveau de la pile.....	33
Figure I-34 : Pose de tissu en fibres de carbone sur les poutres du tablier	34
Figure I-35 : Vue des dégradations apparentes sur la pile	35
Figure I-36 : Echafaudage des appuis du pont	35
Figure I- 37: Applications des fibres de carbone CFRP sur les poutres du pont	36
Figure I-38 : Application des CFRP sur le pont.....	36

Chapitre II..... Les réseaux de neurones en génie civil.

Figure II-1 : Réseau de neurones à n entrées, une couche de N_c neurones cachés et N_0 neurones de sortie.....	40
Figure II-2 : Réseau de neurone dynamique	41
Figure II-3 : Apprentissage supervisé	42
Figure II-4 : Apprentissage non supervisé	42
Figure II-5 : sections des poutres en T formant le tablier du pont	49
Figure II-6 : Variation de l'erreur en fonction des éléments traités dans chaque couche cachée	50
Figure II-7 : Architecture du réseau adoptée.....	50
Figure II-8 : Variation de l'erreur en fonction du nombre d'itération.....	50

Chapitre III.....

Figure III-1: Représentation transversale d'un pont	53
Figure III-2 Modèle dynamique de l'ouvrage "sens transversal	54
Figure III-3 : Architecture adoptée pour le 1er cas	55
Figure III-4 : Architecture adoptée pour le 2eme cas.....	55

Figure III-5 : Méthodologie de développement du réseau de RPG.....	56
Figure III-6 : Les blocks présentés par MatLab	57
Figure III-7 : Interface du Matlab 9.....	58
Figure III-8 : Graphe caractéristiques de la fonction tansig.....	60
Figure III- 9 : Panneau d'apprentissage du réseau	61

Chapitre IVRésultats et commentaires

Figure IV.1 : Courbe de performances avant renforcement des ponts (sens longitudinal).65	
Figure IV.2 : Courbe de performances avant renforcement des ponts (sens transversal)...65	
Figure IV.3 : Corrélacion entre périodes mesurées et prédites par le modèle RNA (sens longitudinal).....66	
Figure IV.4 : Corrélacion entre périodes mesurées et prédites par le modèle RNA (sens transversal).....66	
Figure IV.5 : Variation de paramètres durant la formation du réseau par RNA (sens longitudinal).....66	
Figure IV.6 : Variation de paramètres durant la formation du réseau par RNA (sens transversal).....66	
Figure IV.7 : Courbes de performances par RNA après renforcement des ponts (sens longitudinal).....67	
Figure IV.8 : Courbes de performances par RNA après renforcement des ponts (sens transversal).....67	
Figure IV.9 : Variation de paramètres dans la formation du réseau après renforcement (sens longitudinal).....68	
Figure IV.10 : Variation de paramètres dans la formation du réseau après renforcement (sens transversal).....68	
Figure IV.11 : Corrélacion entre périodes mesurées et prédites par le modèle RNA (sens longitudinal).....68	
Figure IV.12 : Corrélacion entre périodes mesurées et prédites par le modèle RNA (sens transversal).....68	

Liste des tableau

Chapitre I Synthèse Bibliographique

Tableau I.1 : Comparaison entre les différents types de fibres existants.....24

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

Tableau III-1 : Architecture et paramètres du RN adopté..... 59

Tableau III-2 : Comparaison entre les algorithmes d'apprentissage..... 60

Chapitre IV.....Résultats et commentaires

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

Propres..... 63

Introduction Générale

Introduction générale

Le nombre d'ouvrage d'art en Algérie avoisine les 11 000 ponts, dont la moitié routiers, et qui sont pour certains dans un état vétuste pouvant nuire à la sécurité des usagers.

En effet, à cause d'erreurs de conception ainsi qu'un environnement agressif, ces structures atteindront d'ici peu leurs durées de vie utile, d'où la nécessité de les réhabiliter (réparation et/ou renforcement).

La maintenance des ouvrages de génie civil consiste à les protéger en assurant une meilleure étanchéité ou en limitant la corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance dues à la fissuration, à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des ouvrages. C'est un problème de plus en plus préoccupant dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé.

Le projet entrepris dans ce mémoire servira d'illustration, et exposera l'application des réseaux de neurones dans la prédiction du comportement des ponts, dont les appuis ont été renforcés par matériaux composites collés (CFRP). Ainsi qu'une analyse numérique, avec la prise en compte des effets sismiques sur ces ponts renforcés.

La popularité croissante dans l'utilisation de ces produits innovants dans le domaine du génie civil est à souligné, notamment en ce qui concerne les réparations et les renforcements des structures.

Les recherches établis pour étudier le comportement des ponts renforcés par collage de matériaux composites, en utilisant des modèles analytiques et numériques (méthode des éléments finis) ne sont pas nouvelles, cependant celles-ci ont observé des résultats (écarts dans les simulations) peu concluants, ce qui a poussé à appliquer d'autres méthodes plus sophistiquées telles-que l'IA (l'Intelligence Artificielle).

Les réseaux de neurones faisant partie de l'IA, ils sont les mieux adaptés pour ce genre de travaux, notamment grâce à une grande robustesse de calculs, et une capacité d'apprentissage, de classification, de simulation et de prédiction.

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

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

Après une introduction générale, le premier chapitre donne une idée 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 et notamment leur état. Dans le même chapitre, on présentera une synthèse bibliographique relative à l'étude des matériaux composites, leur historique, leur introduction dans le domaine des ouvrages d'art, 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.

Le troisième chapitre fera l'objet de la prévision du comportement de ponts, dont les piles ont été renforcé par composites, et ce par la méthode des réseaux de neurones, en introduisant une base de données composée de plusieurs cas d'études de ponts, composés de valeurs mesurées de paramètres de l'ouvrage d'art (longueur, largeur, hauteur, nombre appui, la masse et la rigidité de la structure).

La lecture des résultats trouvés (expérimentalement, analytiquement et numériquement) et des discussions, ainsi que des commentaires feront l'objet du chapitre quatre.

Enfin, une conclusion générale et des recommandations pour de futurs travaux de recherche.

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I-1 Les ouvrages d'art en Algérie

L'Algérie dispose d'un nombre considérable d'équipement routiers (routes, autoroutes, tunnels, ouvrages d'art), et fait des ponts un atout puissant dans le développement en tout points des régions (économique, politique et social) en offrant la possibilité de franchissement d'obstacles naturels (oueds, rivières) ou artificiels (routes, chemins de fer...).

On exposera par la suite les dernières statistiques connues dans le but de donner une image globale du patrimoine algérien des ouvrages d'art, en précisant le nombre total d'ouvrages présents sur le territoire national, leur répartition selon le zonage sismique, ainsi que leur état physique.

I-1-1 Distribution des ouvrages d'art selon le zonage sismique

Le règlement parasismique algérien des ouvrages d'art classe le territoire algérien en quatre zones [1]. Les statistiques récemment menées pour les zones sismiques, montrent qu'une grande partie des ponts algériens se situe dans les zones sismiques 2 et 3 [Fig. I-1], dites zones à risque (65% environ).

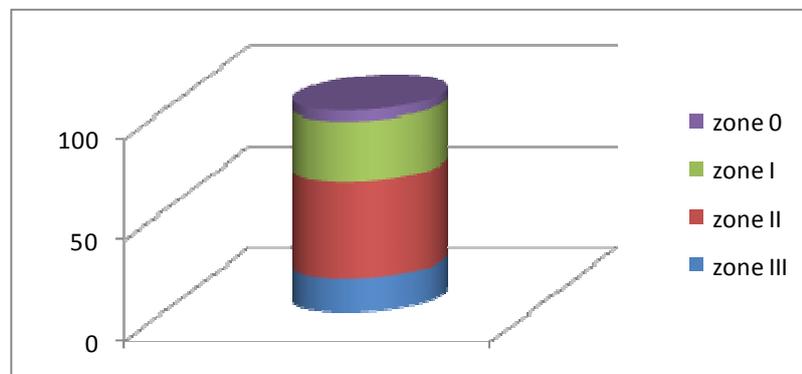


Figure I-1 : Pourcentage des ponts dans les zones sismiques [1]

I-1-2 Bilan des ponts en Algérie

L'âge avancé des ponts algériens est un fait palpable, puisque le recensement démontre que la moitié des ponts existants (50%) ont dépassé les 40 ans, ce qui représente une consommation de presque 50% de leur vie (la durée de vie d'un pont est estimée entre 70 et 100 ans), et par conséquent, nécessitant une maintenance et une surveillance permanentes pour les sauvegarder. Pour l'état physique des ponts existants, nous constatons que 1305 ponts sont dans un état de dégradation avancé. En effet, d'après la figure I-2, le pourcentage global des ouvrages qui se trouvent dans un état inconnu, mauvais ou moyen, est d'environ 50%.

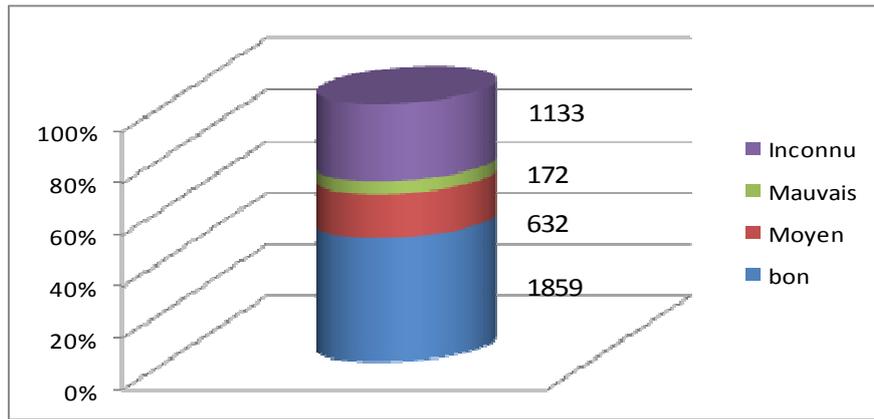


Figure I-2 : Etat récapitulatif des ouvrages d'art en Algérie (nombre/%) [1]

I-2 Pathologie des ponts

La présence de dégradations visibles à l'œil nu (détériorations locales/générales, fissurations) est souvent le signe visible de pathologie. Cependant, il est possible qu'il y ait endommagement bien avant l'apparition de signes visibles. L'étude du comportement pathologique de ces ouvrages met en évidence des endommagements de matériaux et de structures dus à des sollicitations détaillées par la suite.

I-2-1 Actions permanentes (statiques)

- Rechargement abusif de la chaussée ;
- Sous estimation du poids des équipements des ouvrages.

I-2-2 Actions dues au trafic (dynamiques)

- 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 de trains sur des rails interrompus engendrant une déconsolidation des assemblages rivés ;
- Effet de souffle provoqué par des trains à grande vitesse sur les équipements placés en bordure de voie.

I-2-3 Actions à caractère accidentel

- a) Actions mécaniques de l'eau

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

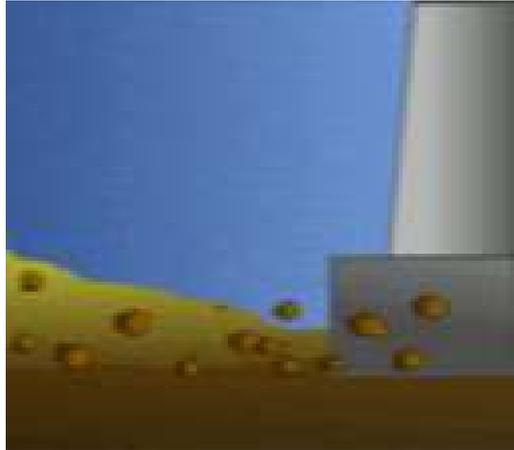


Figure I-3: Affouillement des rivières sur les ponts [2]

b) Séismes

Lorsque l'accélération au sol dépasse 0.03g, l'action du séisme peut 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 [3].



Figure I-4 : Rupture des piles par cisaillement [4]

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 dans le monde. La fréquence d'accidents aux conséquences catastrophiques avec pertes de vies humaines, ainsi que d'importants dégâts affectant les ouvrages, est de l'ordre de 1.5 pont/an. En effet, 200 à 300 personnes ont trouvé la mort dans ces circonstances entre 1960 et 1983.

d) 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-5 : Choc de véhicule sur une pile [4]

I-3 Constat des pathologies

I-3-1 Objectifs

Dans le but de réhabiliter une structure en béton armé, il est primordial de passer par un diagnostic. Ce dernier est le résultat d'investigations effectuées pour se prononcer sur l'état d'une construction et de ses conséquences. Il est devenu habituel de désigner par la même appellation de "diagnostic" la réalisation des examens nécessaires à la formulation de conclusions. [5].

Le déroulement du diagnostic comporte quatre volets : [6]

- 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 sur des éléments recueillis.
 - La formulation des conclusions et recommandations.
- Il faut cependant souligner que de façon générale, un diagnostic reste une approximation plus ou moins précise où il est rarement possible d'obtenir un recueil exhaustif des données.

I-3-2 Investigations visuelles

L'investigation visuelle est la forme d'examen la plus simple et la plus économique. Quel que soit leurs origines, ces informations doivent être utilisées avec prudence. Elles ne doivent pas être utilisées comme des données de base du diagnostic [6], mais plutôt considérées 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 que : joints, appuis, etc. ;
- Une localisation des fissures.

I-3-3 Mesures in –situ

Les mesures in-situ consistent à déterminer les caractéristiques indispensables : un niveau d'existence, de position, et de section des armatures dans le béton, la dureté et la résistance du béton, le degré de corrosion et d'oxydation des armatures. À l'issue d'un tour d'horizon général, on peut déjà conclure que :

- L'homogénéité de l'état des lieux, ou au contraire l'existence de plusieurs cas de figure bien distincts ; [6]
- La nature et la localisation des manifestations ;
- Les désordres dus à la vétusté, la non conformité réglementaire, les anomalies de fonctionnement ;
- La nature et la localisation des sondages, l'auscultation ou les 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.

I-3-3-1 Mesures relatives à la résistance du béton

a) Le scléromètre

Cet instrument (classé parmi les essais in-situ non-destructif) permet d'apprécier la résistance du béton, et ce, par rebondissement d'une masselotte sur une surface. Dans le but d'appréhender une valeur assez proche de la réalité, il est impératif de procéder à une quinzaine d'essais sur chaque zone testée. 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-6)



Figure I-6: Le scléromètre [7]

b) L'auscultation par ultrasons

Cette méthode également classée parmi les essais in-situ non-destructif, 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-7)



Figure I-7: Appareil d'auscultation par ultrasons [7]

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-8)



Figure I-8: Le pachomètre [7]

- Le profomètre :

Il sert à déterminer avec précision la position et le diamètre des armatures dans le béton. (Figure I-9)



Figure I-9: Le profomètre [7]

- Le corrosimètre :

Très utilisé par les laboratoires de contrôles de béton, il permet de détecter la corrosion des armatures et d'ouvrages en béton avant l'apparition de dommages visibles. (Figure I-10)



Figure I-10: Le corrossimètre [6]

d) Mesure de l'enrobage des armatures

La technique de mesure de l'enrobage des armatures fait appel à de nombreux appareils, basés sur des principes magnétiques ou réflectométriques (radar géophysique). Ces techniques, dont les performances sont fonction de leur principe de base, permettent d'accéder aux informations suivantes : Enrobage (profondeur), estimation du diamètre des armatures, présence d'armatures adjacentes, reconnaissance du profil de l'acier. (Figure I-11)



Figure I-11 : Roue électrode détection des armatures au radar [7]

I-3-3-2 Mesures relatives à la qualité du béton ou à son vieillissement

a) 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...). Ce procédé est utilisable pour des éléments dont l'épaisseur ne dépasse pas 60 à 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.

b) Carottage

Le prélèvement de carottes a pour but d'effectuer des analyses en laboratoire. Ces examens peuvent être demandés en vue :

- D'examens pétrographiques pour l'identification des agrégats, leur détérioration, l'homogénéité du béton, la profondeur de carbonations, et la répartition des fissures ;
- D'analyses chimiques ;
- D'essais physico-mécaniques: densité, résistance à la compression, module d'élasticité.

c) Détecteur des fissures

- Fissuromètre :

Il permet de suivre l'évolution d'une fissure sur un plan ou dans un angle. (Figure I-12)



Figure I-12: Le fissuromètre [7]

d) Evaluation du taux d'humidité

- Hygromètre :

Cet humidimètre permet l'évaluation de l'humidité, en surface et en profondeur, de parois de construction, de façon non destructive, grâce à une méthode basée sur la radiofréquence. (Figure I-13)



Figure I-13: L'hygromètre [6]

e) Détermination de la profondeur de carbonatation

Elle constitue une détermination du degré de vieillissement du béton. Pour établir la représentativité d'une mesure de profondeur de carbonatation, il faut effectuer un nombre suffisant de déterminations, en tenant compte des conditions locales d'exposition, et de l'hétérogénéité du matériau.

f) Mesures de résistivité

Les mesures de résistivité sur site sont utilisées en parallèle avec les mesures de potentiel afin d'affiner le diagnostic de corrosion.

I-3-4 Etude et analyse des éléments recueillis

Afin de tirer des conclusions des essais d'investigations, il est nécessaire d'interpréter les constats et les résultats obtenus. Mais aussi d'analyser les données et informations collectées. Les modes d'analyse font appel à différents types d'opérations, tels que :

a) Le calcul

La capacité portante des structures ainsi que les zones critiques au niveau des éléments structuraux peuvent être déterminés grâce à cette étape.

b) Le recouplement

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 qui comporte une part d'approximation 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.

I-3-5 Conclusions et recommandations

Une conclusion est une proposition finale caractérisant la dernière partie d'une étude ou d'un raisonnement, comprenant des arguments et des analyses ainsi que des constats.

À partir d'une conclusion, des recommandations peuvent être déduites tout en respectant les enjeux économiques et 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 Procédés de renforcement des ponts en B.A

Le diagnostique et la détermination des causes de dégradations est l'étape principale avant tous travaux de réparations ou de renforcements d'une structure quelconque. Il existe cinq techniques majeures de réparation et/ou renforcement de structure en béton, selon les causes et désordres affectant celle-ci [5] :

- 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

Un des principaux traitements de surface : le ragréage et l'injection de fissures.

a- Le ragréage

Le ragréage est la technique traditionnelle de réparation des bétons. Il permet dans un premier temps de reconstituer les sections d'armatures qui ont disparu, de stopper le phénomène de corrosion des aciers par passivation. Par la suite, la protection des armatures s'effectue par la reconstitution manuelle ou mécanique de l'enrobage à l'aide de mortier de réparation. Les étapes de la réparation sont les suivantes :

- Eliminer les zones de faible cohésion ;
- Dégager l'armature corrodée jusqu'à une zone où celle-ci est saine, nettoyer l'armature ;
- Remplacer l'armature si la perte de section est trop forte ;
- Passiver les armatures corrodées par l'application de produits ;
- Reconstituer manuellement l'enrobage de béton à l'aide de mortier de réparation.

D'autres procédures : le bouchage, le burinage et le piquage par marteau pneumatique, le décapage thermique, le décapage chimique et le rabotage, sont des techniques déconseillées en présence d'armatures, en raison de leur brutalité.

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.



Figure I-14 : Injection de fissures [8]

Le calfeutrement consiste à colmater les fissures sur une certaine profondeur, par l'utilisation d'un produit souple, voire rigide afin de 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, à titre d'exemple aux fissures des dallages industriels. [8]



Figure I-15 : Calfeutrements des venues d'eau par mortier de ciment hydrofugé [8]

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 de 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 ces derniers.

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 :

- L'imperméabilisation et l'aspect ;
- L'étanchéité et l'aspect ;
- La protection contre la pénétration de produits agressifs.

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. Il est à distinguer [5] :

a- Techniques de protection du béton

L'application d'un traitement de protection du béton est un procédé primordial, particulièrement si l'enrobage des aciers est (trop) poreux ou d'épaisseur insuffisante, ou lorsque l'environnement est particulièrement agressif. Une telle protection est aussi envisageable concernant un mortier fraîchement déposé, en raison des agressions atmosphériques, des fondants de l'eau de mer, des attaques chimiques ou bactériologiques, ou tout simplement, en raison de la pénétration de l'eau. Cela afin d'assurer une grande durabilité de la réparation. Les cinq grandes familles de produits de différentes caractéristiques sont :

- 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.

- Revêtement imperméabilisant :

Les revêtements imperméabilisants, une fois appliqués sur le parement, permettent de stopper la pénétration d'éléments dans le béton. Il existe différents types de revêtement selon contre quoi on souhaite protéger la structure. Parmi eux il y a les revêtements hydrofuges (contre l'arrivée d'eau), et ignifuges (contre les attaques du feu). Certains d'entre eux protègent aussi contre les attaques de chlorures ou contre la pénétration du CO₂ dans le béton.

b- Techniques de protection des armatures

Dans ce contexte, et afin de protéger les aciers porteurs du béton armé constituant les éléments structuraux, il est impératif de passer par les étapes suivantes [5] :

- 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 ;
- La qualité du béton ;
- Le 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.

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 se réalisent. Cette méthode consiste à abaisser en un point de l'armature le potentiel de ce métal jusqu'à une valeur négligeable. L'abaissement du potentiel est obtenu en imposant le passage d'un courant électrique allant 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.

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 [5] :

- 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 être complet que si l'on parvient à évacuer l'air emprisonné. Pour ce faire, la technique du vide qui exige l'emploi de tuyauterie et de produits spéciaux est utilisé.

- L'extraction des chlorures des bétons :

L'extraction des chlorures permet d'enlever les ions chlorures ayant pénétrés dans l'enrobage. L'extraction est efficace si la teneur en chlorure au voisinage d'une armature est inférieure au seuil habituellement admis pour éviter la corrosion métallique. Ceci correspond souvent à un rendement de 80 à 90% pour l'extraction des chlorures. L'application de cette méthode de protection se fait de manière électrochimique.

- La ré-alkalinisation :

La ré-alkalinisation permet d'augmenter l'alkalinité du béton, c'est-à-dire d'augmenter son PH. La méthode de réalisation de la ré-alkalinisation est identique à celle de l'extraction des chlorures, seul l'électrolyte utilisé change.

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, des efforts d'une intensité connue et suivant des directions définies par le biais de câbles précontraints (précontrainte additionnelle) sont appliquées. 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 [5] :

- Le 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).

- Le 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 [9] :

- 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 actuellement. Elle est appliquée dans la réparation et la réhabilitation des ouvrages en béton armé. La pratique a montré que ces techniques présentent des limites. En effet, les techniques de chemisage ou de béton projeté 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 [9].

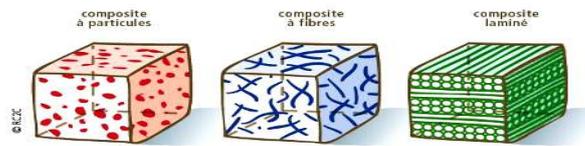
I-5 Matériaux composites

Les composites, produits de synthèse, sont des concurrents aux métaux par leur légèreté, inaltérabilité et leur résistance dépassant celle de l'acier (leur rapport résistance/poids est très élevé). En effet, les plaques de PRF sont de 2 à 10 fois plus résistantes que les plaques en acier, tandis que leur poids est seulement de 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 de 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 apparence

simplicité, est en fait très technique et nécessite une grande minutie au niveau de la préparation lors de l'encollage.



I-5-1 Définition et identification

L'assemblage de deux ou plusieurs matériaux non miscibles définit le matériau composite. Ce dernier possède des propriétés que l'élément constitutif seul ne possède pas.

Il est constitué comme le montre la figure 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).

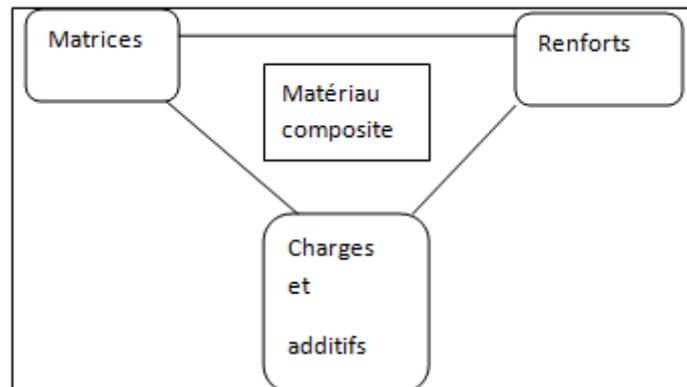


Figure I-16 : Constitution des matériaux composites [10]

I-5-1-1 Le renfort

C'est l'armature, ou le squelette. Il assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité), souvent de nature filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques). Les fibres les plus employées sont les suivantes :

- a- Les fibres de verre

Utilisées dans le bâtiment et diverses applications non structurales. Elles sont les plus utilisées de nos jours, en raison de leurs faibles cout de revient.

b- Les fibres de carbone

Utilisées pour les applications structurantes, leurs prix de revient diminue actuellement avec l'augmentation du volume de leur production, sans pour autant égaier celui des fibres de verre.

c- Les fibres de carbure de silicium

Leur utilisation est limitée sous atmosphère oxydante et aux milieux dont la température dépasse les 500°C, et ceci à cause de leurs prix de production élevés.

d- Les fibres d'aramides (kevlar)

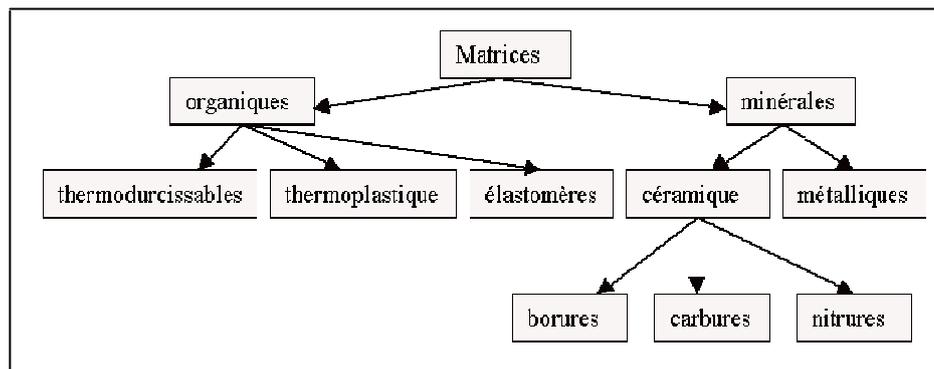
Elles sont utilisées dans les protections balistiques.

e- Les fibres végétales

Elles sont dotées de bonnes propriétés mécaniques et écologique pour un prix modeste (le lin, le chanvre...)

I-5-1-2 La matrice

En général une matière plastique, lie les fibres des renforts, répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion), et assure la protection chimique. Par définition, c'est un polymère ou une résine organique (résine thermoplastique ou thermodurcissable) [13].



1-5-1-3 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 ou 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 fibres et les matériaux composites à particules [11].

a) Composites à fibres

Un matériau composite est un matériau composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Elles se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc... L'arrangement des fibres et leur orientation permet 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 matériau composite à 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

De nos jours, les matériaux composites sont de plus en plus nombreux, on peut les classer en trois familles selon la nature de la matrice [12] :

a- Les composites à matrices organiques (CMO)

Ce sont les plus importants actuellement dans tous les domaines industriels. Ils sont faits avec des fibres minérales, organiques ou encore métalliques, travaillant à une température inférieure à 300°C. Les principales matrices utilisées sont :

- Les résines polyester : peu onéreuses et généralement utilisées avec les fibres de verre ;
- Les résines vinylester : sont utilisées là où les résines polyester ne sont pas suffisantes, elles sont issues d'une modification d'une résine époxyde ;
- Les résines époxy : très utilisées avec les fibres de carbone pour leurs bonnes caractéristiques mécaniques ;
- Les résines phénoliques : utilisées dans les applications nécessitant des propriétés de tenue au feu et flammes imposées par les normes dans les transports civils ;
- Les résines thermoplastiques : comme le polypropylène ou le polyamide.

b- Les composites à matrices céramiques ou minérales(CMC)

Peuvent être constitués de carbone ou de carbure de silicium, travaillant à une très haute température (1000°C) pour les domaines nucléaire, militaire, spatial... Ils sont faits à base de fibres métalliques, des particules métalliques et minérales.

c- Les composites à matrices métalliques(CMM)

Ils sont faits avec des fibres minérales, métalliques et métallo-minérales, travaillent aussi à une haute température (600°C) et elles se constituent d'une matrice métallique (comme l'Aluminium, Magnésium, Zinc, Nickel...), et un renfort métallique ou céramique (comme le fil d'acier, Carbone, Alumine, poudre de diamant...).

I-5-3 Modèles 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 [12]. En fonction de l'orientation des fibres, il existe plusieurs architectures de renforcements [10] :

Unidirectionnelle :

Les fibres parallèles peuvent se présenter sous deux formes :

- Sans liaison particulière
- Reliées par un fil (nappes).

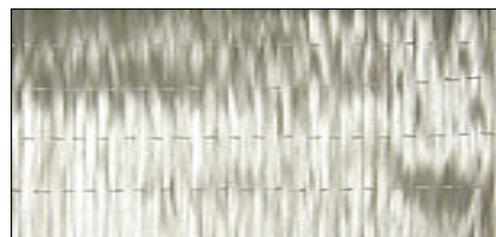


Figure I-17 : Fibres parallèle [10]

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.

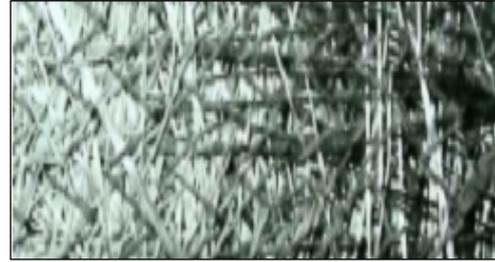


Figure I-18 : Fibres coupées et broyées [10]

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-19 : Fibres orientées [10]

Bi ou tridimensionnelles, qui sont également réalisés pour des applications aérospatiales, et de défense.

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

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 ouvrage d'art, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs. Cela grâce à leur bonne tenue mécanique en comparaison avec les matériaux homogènes, et à leur faible masse volumique. Parmi les matériaux composites de renforcement, il y a : les matériaux composites stratifiés (lamelles), les tissus unidirectionnels ou les tissus bidirectionnels.

Les fibres entrantes dans leurs compositions sont à base de [5] :

- 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 que les 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.

Renforts	Diamètre du filament (μm)	Masse volumique (kg.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		

Tableau I.1 : Comparaison entre les différents types de fibres existants [14]

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

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

Les fibres de carbone présentent un très bon compromis rigidité/poids. Elles sont utilisées partout où il y a un besoin de résistance. Le diamètre des fibres de carbone varie de 5 à 15 microns. Ces fibres sont caractérisées par leurs faibles densités, leurs résistances élevées à la traction et à la compression, leurs flexibilités, leurs bonnes conductibilités électriques et thermiques, leurs tenues en température et leurs inerties chimiques (sauf à l'oxydation). Elles résistent à la corrosion et à l'usure. Elles sont faciles à usiner et sont perméables aux rayons X. Leurs limites d'utilisation sont les suivantes : sensibilité aux chocs (rigidité élevée et faible allongement à la rupture), attaque à chaud (température supérieure à 400°C) par l'oxygène de l'air et les acides oxydants, corrosion de type galvanique au contact des métaux et alliages.

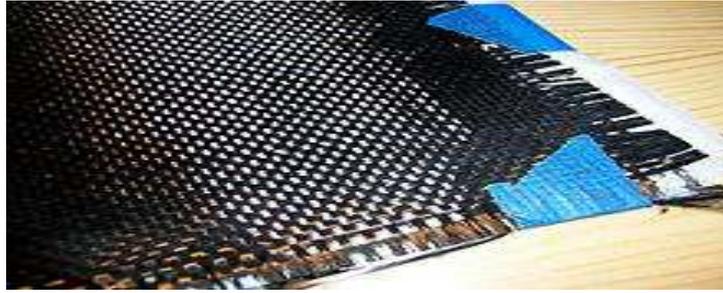


Figure I-20 : Tissu de fibre de carbone [15]

Un matériau composite n'est généralement pas composé d'une seule rangée de fibres collées entre elles. Plusieurs couches de fibres appelées "plis" sont empilées jusqu'à obtention de l'épaisseur désirée (qui détermine la résistance de la structure). Les plis sont constitués soit de fibres placées toutes dans le même sens (plis unidirectionnels), soit d'un tissage de fibres (comme pour un tissu classique). Le sens dans lequel sont disposées les fibres est primordial, car la structure est beaucoup plus résistante dans le sens des fibres.

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

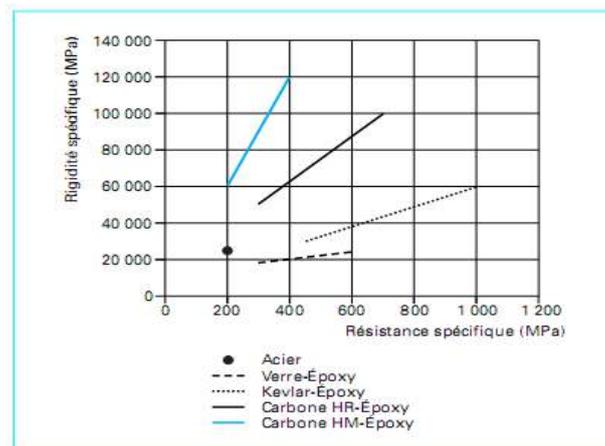


Figure I-21 : Comparaison entre les aciers et les matériaux composites [16]

Les matériaux composites à base de fibres de carbone présentent un certain nombre d'avantages, une fois comparés aux matériaux de construction traditionnels, tels que l'acier et les autres types de matériaux composites.

Avantages

- 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

Inconvénients

- 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

Le coût élevé apparent de FRP comparé aux matériaux conventionnels a été un obstacle important à la généralisation de leur utilisation. Cependant, 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, leur légèreté réduit les dépenses de transport, et permet à une certaine préfabrication d'avoir lieu en usine.

I-6 Confinement des colonnes par composites

Le confinement par CFRP est principalement utilisé pour les éléments en compression, afin d'augmenter leur résistance et leur comportement ductile.

L'utilisation de CFRP en confinement des supports est très avantageuse, en comparaison de l'emploi de l'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 au maintien des barres vis-à-vis du glissement 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

- 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 : la stratification au contact, l'enroulement filamentaire, et le chemisage par coquille préfabriquée en CFRP.

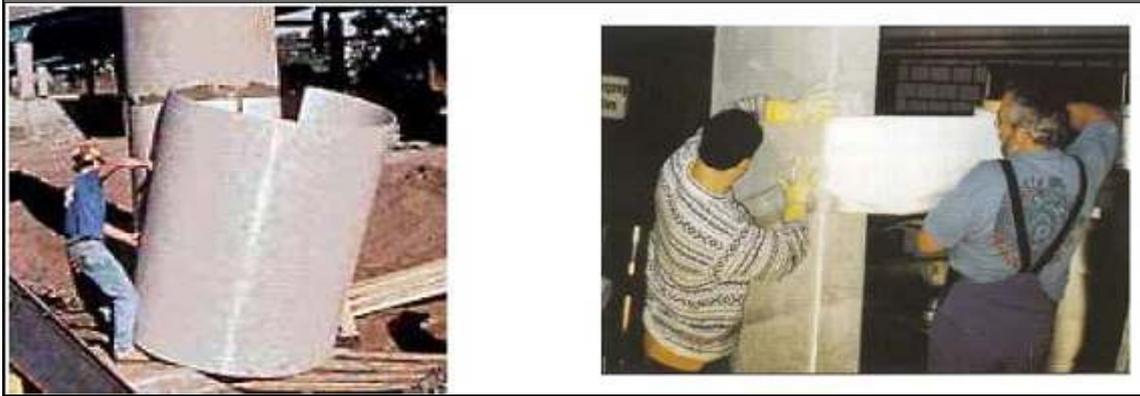


Figure I-22 : Enchemisement avec CFRP préfabriqué (gauche) et in-situ (droite) [17]

Une colonne peut être enveloppée complètement par des tissus de composites avec une ou plusieurs couches.

Elle peut être aussi partiellement enveloppée en utilisant des bandes CFRP sous forme d'une spirale continue ou des anneaux discrets.



Figure I-23 : Enveloppement total de la pile [16]

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 améliore à la fois l'effort et la contrainte de compression ultime du béton.



Figure I- 24 : Colonne partiellement enveloppée par CFRP [16]

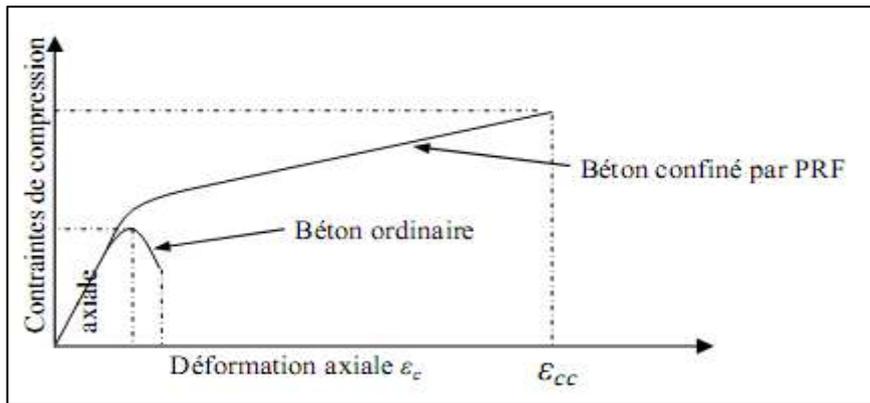


Figure I-25 : Courbe (contrainte- déformation) idéalisée pour un béton confiné par CFRP [16]

- Recherches déjà établies

Plusieurs recherches ont été menées afin de comprendre et étudier le comportement des éléments colonnes confinés à l'aide de composites. Un projet de recherche [18] portait sur le confinement de colonnes au moyen de tissus en matériaux composites. Dans le cadre de ce projet, le comportement de plus de 90 éléments d'essai en béton, de section ronde et carrée, fut étudié [19].



Figure I- 26: Essais de compression sur des colonnes confinées [19]



Figure I-27 : Rupture d'une colonne carrée avec confinement en carbone [19]

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-28 : Rupture de colonnes renforcées par des confinements en fibres d'aramide et de carbone [19]

Un autre projet de recherche [21] traitait du problème du choc de véhicules lourds contre des colonnes élancées de ponts. 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.

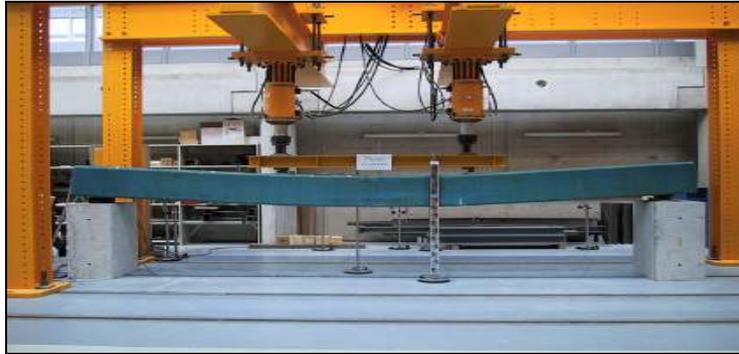


Figure I-29 : Essais de flexion sur des colonnes renforcées par des tissus de CFRP [19]

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-30 : Essais d'effort tranchant sur des colonnes en béton avec ou sans renforcements par des tissus en CFRP [19]

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, 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.

Notons aussi, que d'après des études récentes (Colom et al.) [26] sur des modèles réduits de piles en B.A (échelle : 2/3) soumises à des forces sismiques il a été établi ce qui suit :

Une relation étroite entre l'espacement des bandes de composites et la résistance au cisaillement (plus l'espacement est petit, plus grande est la résistance). En parallèle, une autre relation entre l'espacement des bandes et la dissipation d'énergie (plus l'espacement est grand, meilleur est la dissipation d'énergie).

I-7 Comportement des poutres renforcées par composites

L'utilisation des matériaux composites dans l'industrie de la construction est en plein essor. Ces matériaux présentent plusieurs avantages tels que la légèreté, la bonne résistance, le bon comportement à la fatigue et l'absorption des vibrations. Cependant l'inconvénient majeur est le coût de mise en place très élevé, qui peut à priori être compensé par des avantages tels que la courte durée d'exécution et le manque de grands aménagements et la réduction de la main d'œuvre.

Le but de cette partie est de mesurer les améliorations de la résistance et du comportement des poutres en béton renforcées à vide ou après endommagement par collage de composites de fibres de carbone, ainsi que de simuler ce comportement à l'aide d'un modèle théorique par l'application des hypothèses du BAEL.

Un travail a été mené par M.Abdesmed en 2004 [20]. Dans cette campagne, neuf (9) poutres de dimensions réduites en béton armé identiques ont été réalisées. Les poutres ont une longueur de 170cm et 110 cm de portée et de section 16×18 cm. Les armatures sont de trois barres d'acier HA12 dans la partie tendue et de deux barres HA10 dans la partie comprimée, tandis que les cadres sont des aciers doux lisse de diamètre 8mm, espacés de 20cm. Ces spécimens d'essai se distinguent essentiellement par le type du composite collé et les manières et les localisations du collage appliqué. Les deux premières sont des poutres test, elles ne sont pas renforcées, les sept autres sont réparties en deux catégories, la première est celle des poutres renforcées avant chargement par collage de trois composites différents : TFC Freyssinet, Sika Carbodur lamelle et Sika Wrap alors que la deuxième catégorie est celle de quatre poutres réparées par injection et placage des composites après le chargement et l'apparition des fissures.

I-7-1 Résultats des poutres renforcées

L'effet des différents modes de renforcement montre que les premières fissures verticales (de flexion) et inclinée (de cisaillement) sont apparues vers 75 kN pour chaque poutre de référence et 78, 85, 90 et 105 kN respectivement pour les poutres renforcées par le sika wrap, sika carbodur, TFC et le double renforcement (poutre P8). Le renforcement par composite retarde l'apparition des fissures jusqu'à 40%.

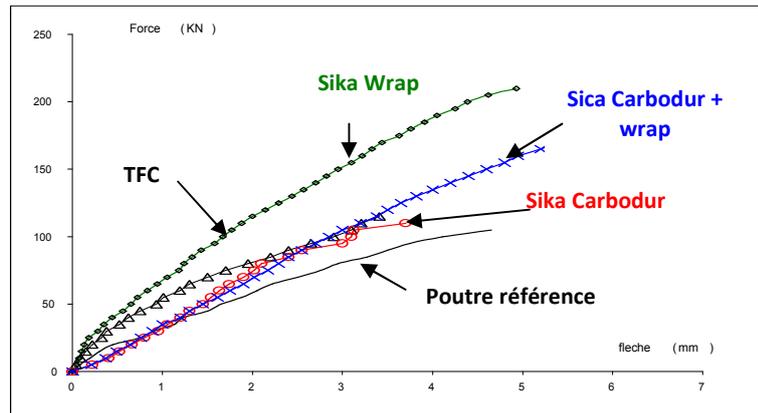


Figure I-31 Courbes force-flèche des différents renforcements [20]

Le gain de la charge le plus important (64%) est celui obtenu par le tissu sika wrap (unidirectionnel). Le mode de rupture observé est soit par effort tranchant ou délaminage (décollement du composite). Une réduction de la déformation à la rupture du béton comprimé et l'allongement des aciers de 13 à 25% a été observée sur les différentes poutres. On note que la réduction la plus élevée est obtenue par le sika wrap.

I-8 Comportement d'une dalle renforcée par composites

L'objectif de cette étude, menée par E. ROCHDI, est d'observer le comportement d'une dalle renforcée par matériaux composites sous chargement centré, et d'évaluer l'effet des différents paramètres du renforcement et notamment l'augmentation de la charge ultime et le mode de rupture. Huit dalles ont été fabriquées dont six renforcées, cette première série des essais sert de comparaison entre le comportement des dalles renforcées et non renforcées, ainsi que l'évaluation de l'effet du taux de renforcement sur le comportement des dalles renforcées.

Lors de l'essai, la dalle est retournée telle que la face renforcée se trouve en position supérieure, cette disposition permet de visualiser plus aisément la face tendue lors de l'essai. La dalle est en appui sur un cadre rectangulaire supposé infiniment rigide et servant d'appui simple, les dimensions du cadre sont de 560×560 mm et se seront les dimensions considérées [22].

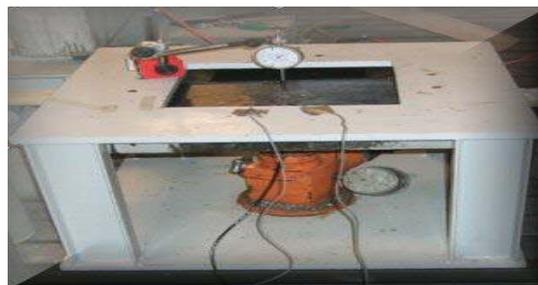


Figure I-32 : dispositif expérimental

I-8-1 Résultats expérimentaux

Trois dalles ont été prise pour le renforcement, par des plaques de composites d'épaisseur 1.0 mm, 1.6 mm et 2.0 mm. En comparaison avec une autre dalle de référence D1. Il a été remarqué que l'ajout d'une plaque de composite de 1 mm d'épaisseur permet d'augmenter la capacité ultime de la dalle de 280%. Ce gain au niveau de la charge ultime n'est pas proportionnel à l'épaisseur du composite, du fait de la limitation de la capacité ultime de la dalle, par le phénomène du poinçonnement, qui dépend des caractéristiques du béton. Aussi, cette augmentation de la charge ultime est accompagnée par une réduction en ductilité du comportement qui se traduit par une diminution de la flèche au moment de la rupture.

I-9 Quelques exemples de matériaux composites appliqués pour le renforcement des ponts

- 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'Hermite) 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'Egypte, 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, ou des bandes du TFC furent posées sur la poutraison du tablier de ce pont. 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 .

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. 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.

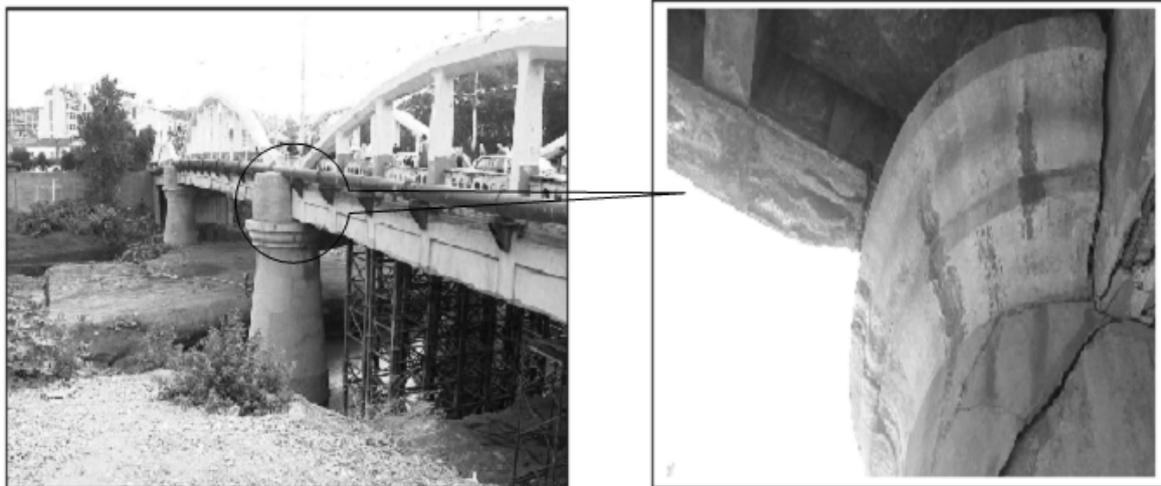


Figure I-33 : Pont blanc d'El Harrach (Alger) avec dégradation au niveau de la pile [23]

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.

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 surexploitation et l'étanchéité déficiente 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 :

- 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 ;
- Protection des bétons par un revêtement (SikaGard 680S) méthacrylates contre les agressions atmosphériques.



Figure I-34 : Pose de tissu en fibres de carbone sur les poutres du tablier [24]

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.

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, 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.



Figure I-35 : Vue des dégradations apparentes sur la pile [25]

En outre, l'analyse des désordres 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 initiaux 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 :

- Chemisage armé des piles ;



Figure I-36 : Echafaudage des appuis du pont [5]

- Injection des fissures par la résine époxydique ;

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

Afin de rénover les éléments structuraux, qu'ils puissent retrouver ainsi leurs rigidités 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.

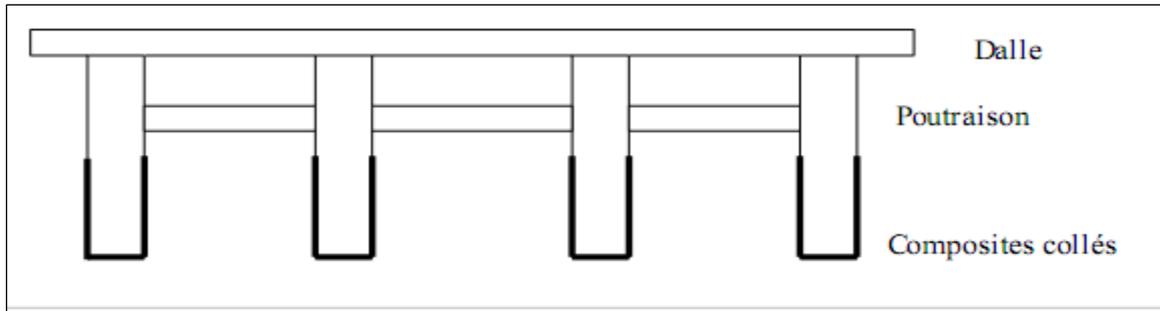


Figure I-37 : Applications des fibres de carbone CFRP sur les poutres du pont [5]



Figure I-38 : Application des CFRP sur le pont [5]

Afin de suivre le comportement de l'ouvrage, avant et après application du renforcement par composites CFRP, plusieurs tests statiques et dynamiques doivent être 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 jouent.

- 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. 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 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 :

- 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'Equipement, 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

I-10 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 en génie civil

Chapitre II

Les réseaux de neurones en génie civil

II-1 Avant-propos

Un réseau de neurones artificiels est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones biologiques. Ce dernier a connu un succès croissant dans divers domaines des sciences de l'ingénieur, et aussi du génie civil.

Pour commencer, des définitions et notations de base relatives aux réseaux de neurones seront exposées ainsi que les types et la méthodologie d'apprentissage.

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

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 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).

L'apprentissage d'un RNA est effectué tel-que : pour chaque entrée particulière présentée au réseau, on alloue une cible spécifique. Les ajustements se font par comparaison entre les réponses du réseau (ou sorties) et les cibles, jusqu'à ce que les sorties correspondent au mieux aux cibles. Afin que l'apprentissage soit le plus fiable, on se doit d'utiliser un nombre important de paires entrée/sortie.

Les RNA's permettent de réaliser des opérations de calculs relativement compliquées, ainsi qu'ils apportent des solutions simples à des problèmes encore trop complexes ne pouvant être résolus par des calculateurs conventionnels (manque de puissance ou de connaissances) [27].

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 [28] :

- 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 statiques

Un RNA statique réalise les fonctions algébriques de ses entrées par composition des fonctions réalisées par chacun de ses neurones. Dans un pareil réseau, les informations circuleront des entrées vers les sorties sans retour arrière possible (figure II-1). 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 neurones effectuant des calculs intermédiaires sont nommés « 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 aux calculs est négligeable, et de ce fait on peut le considérer comme nul (calcul 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

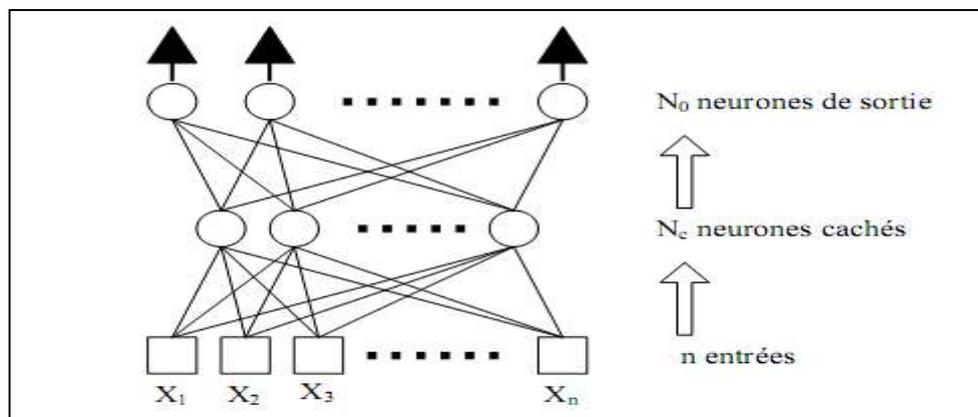


Figure II-1 : Réseau de neurones à n entrées, une couche de N_c neurones cachés et N_0 neurones de sortie [28].

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 [28]:

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. [28]

II-3-2 Les réseaux de neurones dynamiques

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-2) [28].

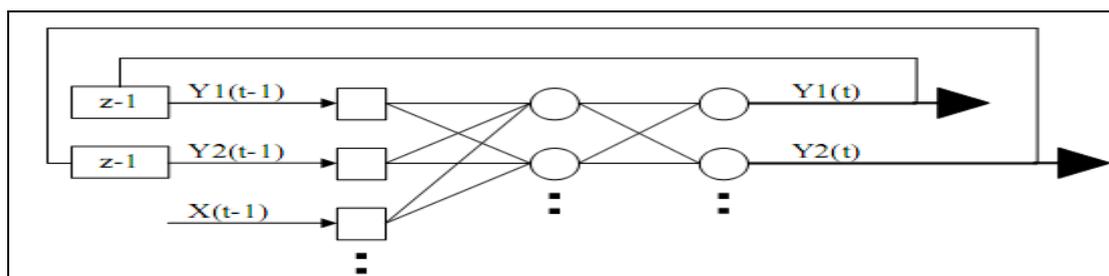


Figure II-2 : Réseau de neurone dynamique [28]

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

La plupart des réseaux de neurones apprennent par l'exemple en suivant un algorithme d'apprentissage. Il y a trois algorithmes principaux : l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé et l'apprentissage renforcé

Lors d'un apprentissage supervisé, les résultats corrects (c'est-à-dire les valeurs que l'on désire que le réseau obtienne en sortie) sont fournis au réseau, si bien que celui-ci peut ajuster ses poids de connexions pour les obtenir. Après l'apprentissage, le réseau est testé en lui donnant seulement les valeurs d'entrée mais pas les sorties désirées, et en regardant si le résultat obtenu est proche du résultat désiré.

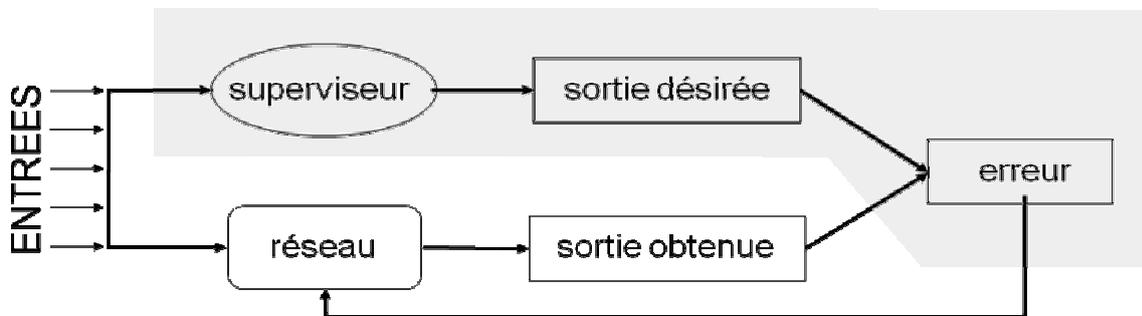


Figure II-3 : Apprentissage supervisé [29]

Lors d'un apprentissage non supervisé, on ne fournit pas au réseau les sorties que l'on désire obtenir. On le laisse évoluer librement jusqu'à ce qu'il se stabilise [29].

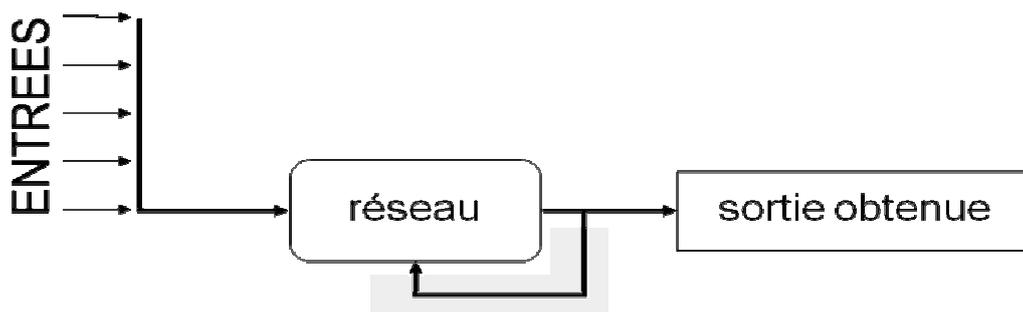


Figure II-4 : Apprentissage non supervisé [29].

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.

II-4-1 Algorithme d'apprentissage

Afin d'accomplir la tâche désirée en utilisant le réseau de neurone, L'algorithme d'apprentissage est la méthode mathématique qui va modifier les poids de connexions afin de converger vers une solution. 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) [28].

II-5 Conception d'un réseau de neurones

Les réseaux de neurones réalisent des fonctions non linéaires paramétrées. Leurs mises en œuvre nécessitent [28] :

- 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 [28].

II-5-2 Choix et préparation des échantillons

La construction d'un réseau de neurones commence toujours par la préparation de la base 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 (plusieurs 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 [28].

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 [28].

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, par ailleurs, ce n'est pas le cas pour les modèles non linéaires.

Pour n'importe quelle application à base de réseaux de neurones, il est impératif 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 [28].

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 [28].

II-5-4 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.

II-5-5 Calcul de la valeur prédite

Le calcul de la valeur prédite par un réseau de neurones se compose de quelques étapes simples. Premièrement, on calcule une série de combinaisons linéaires des variables explicatives [30].

$$v_i = \alpha_{i,0} + \sum_{j=0}^n \alpha_{i,j} x_j$$

où x_j est la j ème de n variables explicatives et $\alpha_{i,0}$ et $\alpha_{i,j}$ sont les coefficients de la i ème combinaison linéaire. Le résultat de la combinaison linéaire, v_i , représente une projection

dans une direction de l'espace des variables explicatives. Chacune de ces projections combine de l'information provenant potentiellement de plusieurs variables.

La seconde étape consiste à appliquer une transformation non linéaire à chacune des combinaisons linéaires afin d'obtenir les valeurs de ce que l'on appelle les unités cachées ou neurones qui forment ensemble la couche cachée, et pour cela on utilise une fonction de transfert avec une expansion infinie dans ses termes joue un rôle fondamental dans la capacité d'un réseau de neurones de capter les dépendances de haut niveau entre les variables explicatives.

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 [28]

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 [31].

Teh et al [32] proposent trois modèles de RPG des réseaux de neurones pour estimer la capacité statique des pieux. Nawari et al. [33] 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 [34] 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.

Saman Yaghmaei-Sabegh et Hing-Ho Tsang [35] ont dans une étude assez récente proposé quand à eux, deux types de réseaux de neurones à but de classification des sites, en se basant sur les propriétés spectrales des sols aboutissant sur une estimation des déplacements de points dans l'espace sous effet sismique.

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 [36] 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 [37, 38, 39, 40, 41] ont publié peut 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 [42] 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 [43] ont aussi confirmé la capacité des RNA et en particulier du PMC à prédire la résistance en compression et l'affaissement des bétons. Sbartaï [44] 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 [45] ont entraîné un PMC pour prédire aussi la résistance en compression et l'affaissement des bétons à hautes performances.

Plus récemment encore, Perera et al [46] ont établi une amélioration des formules de calculs des résistances partiels (acier-béton-composites) de poutres renforcées par composites FRP et soumises à des efforts de cisaillement. Mashrei [47] quand à lui, à travers une base de données expérimentales très fournis est arrivé à la conclusion que la résistance au cisaillement de poutres renforcé par des barres de polymères est augmentée avec la diminution du rapport durée de cisaillement sur profondeur.

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 [48] traite un problème d'analyse simple celui de la détermination du moment de flexion d'une poutre. Khaldoun [49] et al applique les réseaux de neurones pour le calcul de la résistance au cisaillement des poutres en béton armé. Sanad et Saka [50] 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 [51,52]. 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 [53]

D'autres parts, les réseaux de neurones peuvent être appliqués aux problèmes de diagnostic. Yeh et [54] ont établi un système expert basé sur la connaissance combiné avec un réseau de neurones pour diagnostiquer des piles de pont. Basma et al [55] ont utilisé les réseaux de neurones pour l'évaluation de l'état des trottoirs. Wong et al [56] utilisent également les réseaux de neurones pour la détection des dommages directement après un séisme. Sdhabhon [57] 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. Par exemple, l'utilisation des réseaux de neurones a permis à Liu et al [58] d'identifier et de classier 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 [59] 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 [60], 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 [61] ont utilisé un perceptron multicouche (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 [62] ont aussi utilisé un PMC pour estimer l'ancrage des armatures dans le béton. Inel [63] 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 [63] 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).

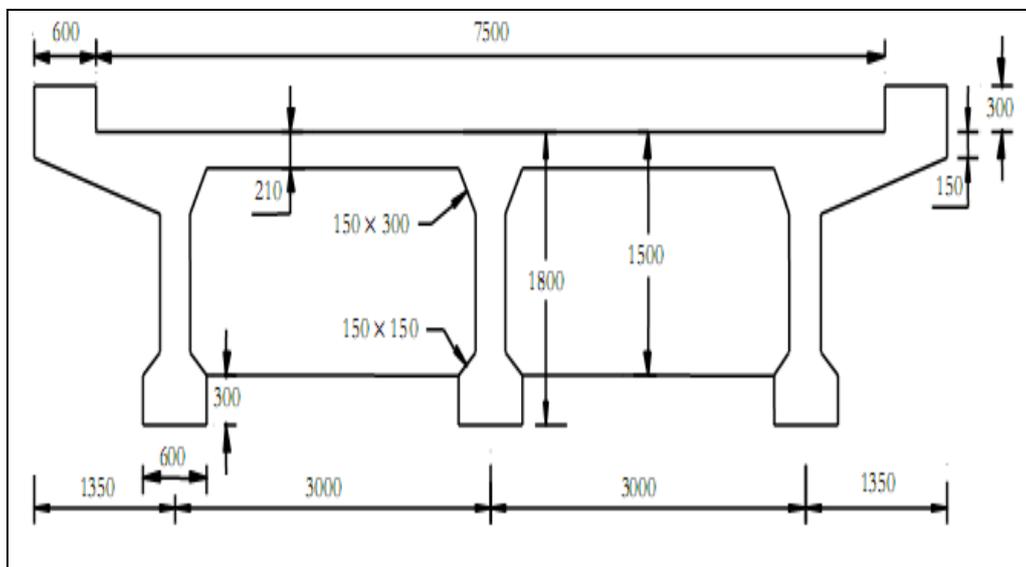


Figure II-5 : sections des poutres en T formant le tablier du pont [63]

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.

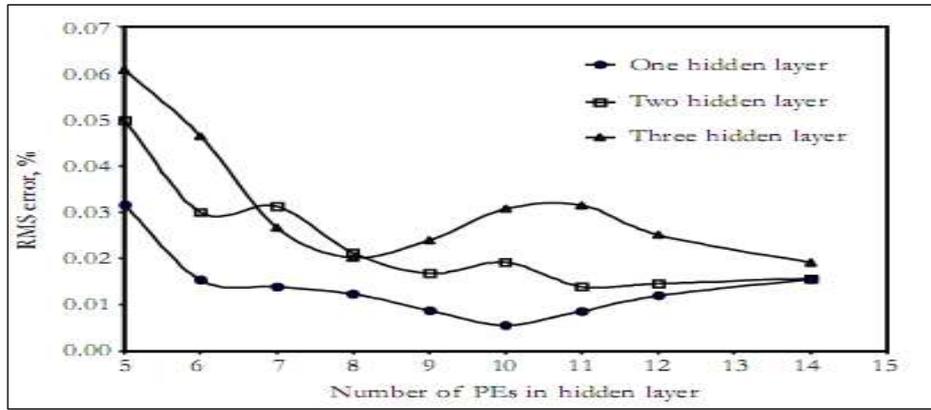


Figure II-6 : Variation de l'erreur en fonction des éléments traités dans chaque couche cachée [63]

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.

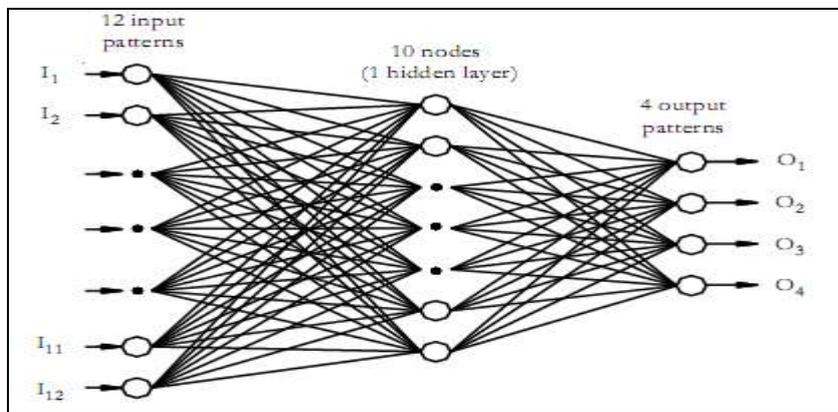


Figure II-7 : Architecture du réseau adoptée [63]

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 :

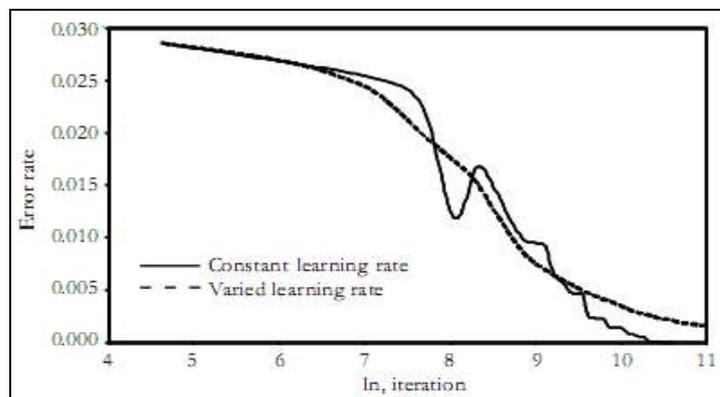


Figure II-8 : Variation de l'erreur en fonction du nombre d'itération [63].

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 testé et validé 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.

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 Avant-propos

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 dans la wilaya d'Alger (zone III), par le calcul des périodes propres de vibrations au sens longitudinal et transversal, avant et après renforcement par matériaux composites.

Cette partie de la thèse est organisée de la façon suivante : un premier paragraphe décrit l'élaboration de la base de données (premières périodes vibratoires longitudinales et transversales), un deuxième volet qui développe le réseau de neurones utilisé dans cette étude, une troisième partie présente les résultats obtenus, puis certains commentaires sont développés.

III-2 Problématique

Un pont est toujours en vibration sous l'effet de plusieurs facteurs, et en ce qui nous concerne les séismes.

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 dans les sens longitudinaux et transversaux.

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 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, de la vitesse et 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 cela dans deux paramètres, la masse du tablier (M) et la rigidité de l'appui (K).

L'avantage principal des réseaux de neurones est leur capacité d'apprentissage à partir d'un nombre consistant d'exemples, plus la base de données est consistante plus les résultats sont fiables. Pour cette raison, on a exploité les données des fiches techniques (annexe) tiré d'une étude précédemment faite [64] avec 144 cas de ponts en béton armé, ou on a sélectionné 49 ponts à deux (02) travées (se situant dans la wilaya d'Alger) pour nos recherches. L'étude précédemment faite [64], traitait les périodes propres de vibrations pour le premier mode prépondérant suivant le sens longitudinal, la notre sera complémentaire de celle-ci en traitant les périodes propres de vibrations pour le premier mode prépondérant suivant le sens transversal.

III-3 Elaboration de la base des données

Pour adapter notre réseau à la tâche qu'il doit effectuer, nous avons déterminé ce qu'il doit demander en entrées et fournir en sorties. Les entrées sont la masse M du système et la rigidité K de l'appui, et les sorties sont la période vibratoire T .

III-3-1 Au sens longitudinal

Les données concernant ce sens vibratoire, ont été obtenues à partir d'une étude précédemment faite [64], et qui est détaillé en intégralité en (annexe).

III-3-2 Au sens transversal

Les données concernant ce sens vibratoire, ont été obtenues par la méthode du spectre de réponse (méthode multimodale) [65].

La figure ci-dessous illustre la représentation transversale d'un pont :

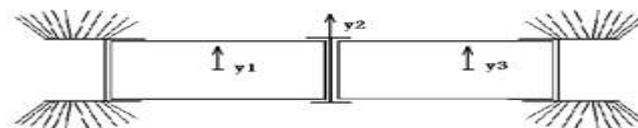


Figure III-1 Représentation transversale d'un pont

III-3-2-1 Modèle mathématique

Dans ce sens, le tablier est segmenté en trois portions correspondant à la moitié d'une travée de part et d'autre de la pile, plus la masse d'une travée concentrée en tête de pile ; à cela vient s'ajouter la masse de la moitié supérieure de la pile.

En plus de la rigidité des appareils d'appuis et des fûts sur la pile, on doit prendre en compte une rigidité rotationnelle due à la déformation de l'ensemble des appareils d'appuis sous la

composante transversale du séisme, cette déformation a pour cause la présence d'un angle de biais entre le tablier et ses appuis.

Il est à noter que la rigidité des appareils d'appuis sur culée n'est pas prise en compte du fait que le tablier est bloqué sur les culées dans le sens transversal.

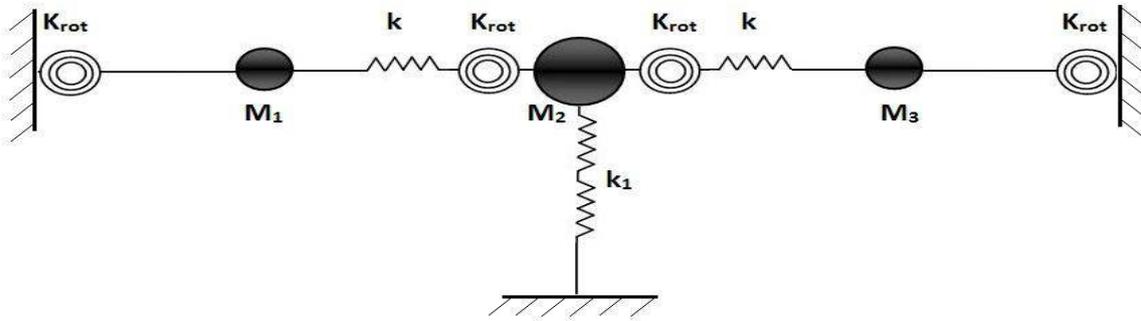


Figure III-2 Modèle dynamique de l'ouvrage "sens transversal"

Les matrices de masse et de rigidité sont évaluées comme suit :

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix} \quad [K] = \begin{bmatrix} 2K_{eff} + k & -K_{eff} - k & 0 \\ -K_{eff} - k & 2K_{eff} + 2K + K_1 & -K_{eff} - k \\ 0 & -K_{eff} - k & 2K_{eff} + k \end{bmatrix}$$

K_{eff} représente la rigidité correspondant à la portion du tablier (moitié du tablier), dont un côté est considéré encastéré tandis que l'autre est régi par la rigidité rotationnelle due à la déformation de l'ensemble des appareils d'appuis.

K_1 représente la rigidité de la pile.

K représente la rigidité du système d'appuis (produit de K_{appui} et du nombre de futs).

$$k_{eff} = \frac{EI}{h^3} \left[12 - \left(\frac{9}{1 + \frac{hk_{rot}}{4EI}} \right) \right]$$

La résolution du système d'équations $|K - M\omega^2| = 0$ est résolu moyennant un programme [71] sous MATLAB (annexe).

III-4 Application des réseaux de neurones

III-4-1 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).

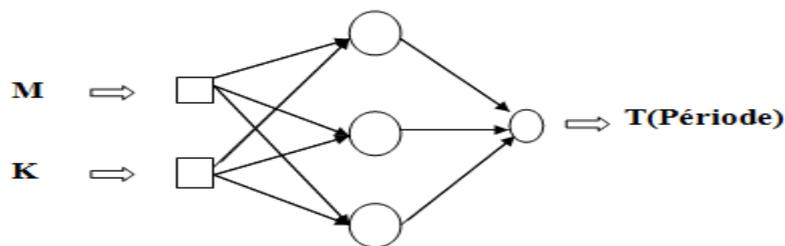


Figure III-3 : Architecture adoptée pour le 1^{er} cas.

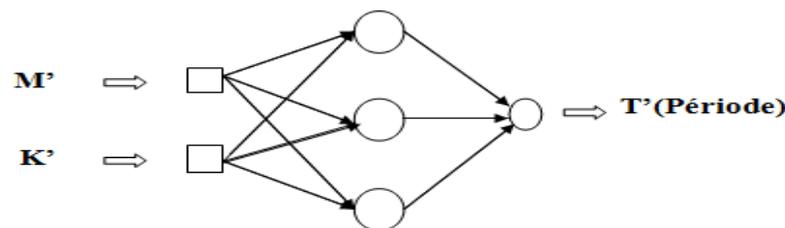


Figure III-4 : Architecture adoptée pour le 2eme cas.

III-4-2 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.

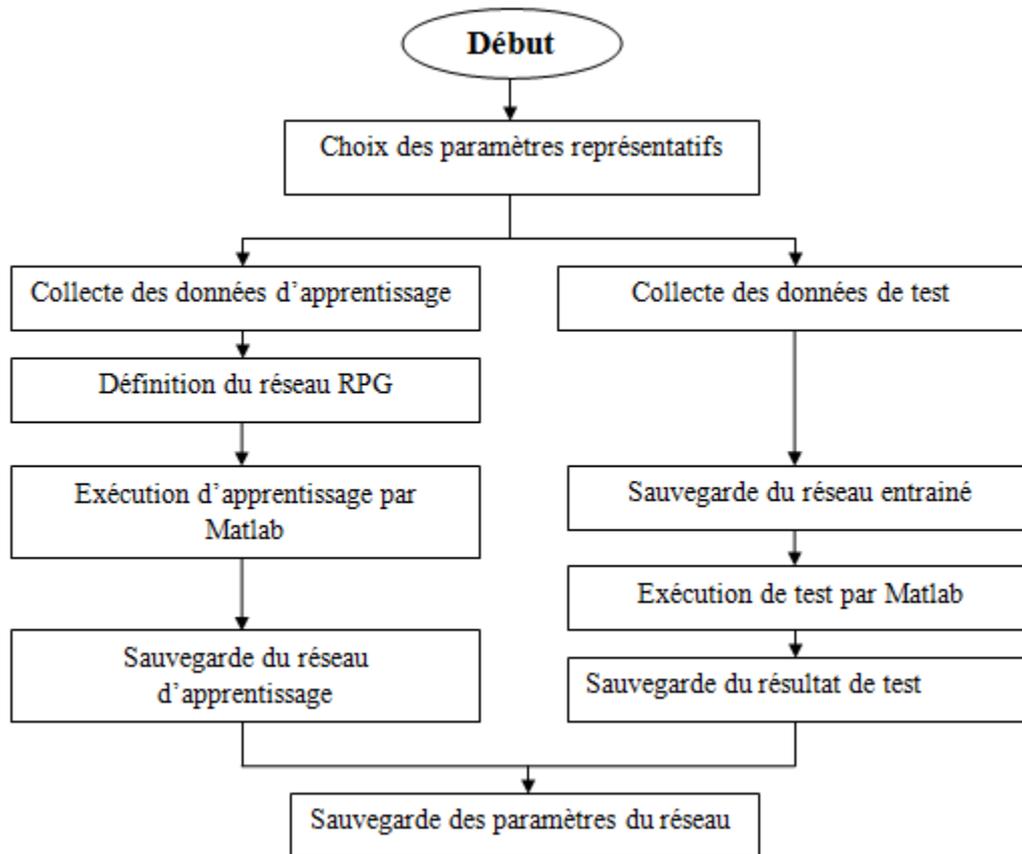


Figure III-5 : Méthodologie de développement du réseau de RPG.

III-4-3 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 plateforme et l'ergonomie de l'interface étaient les critères principaux pour évaluer chaque simulateur [65]. 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 [66].

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. [67]

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 :

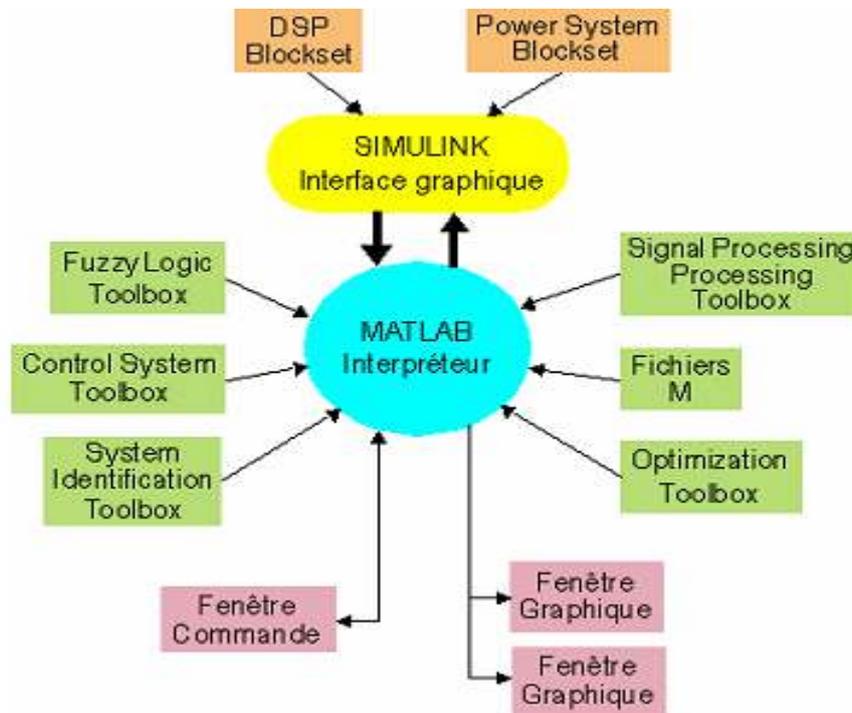


Figure III-6 : Les blocks présentés par MatLab. [67]

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

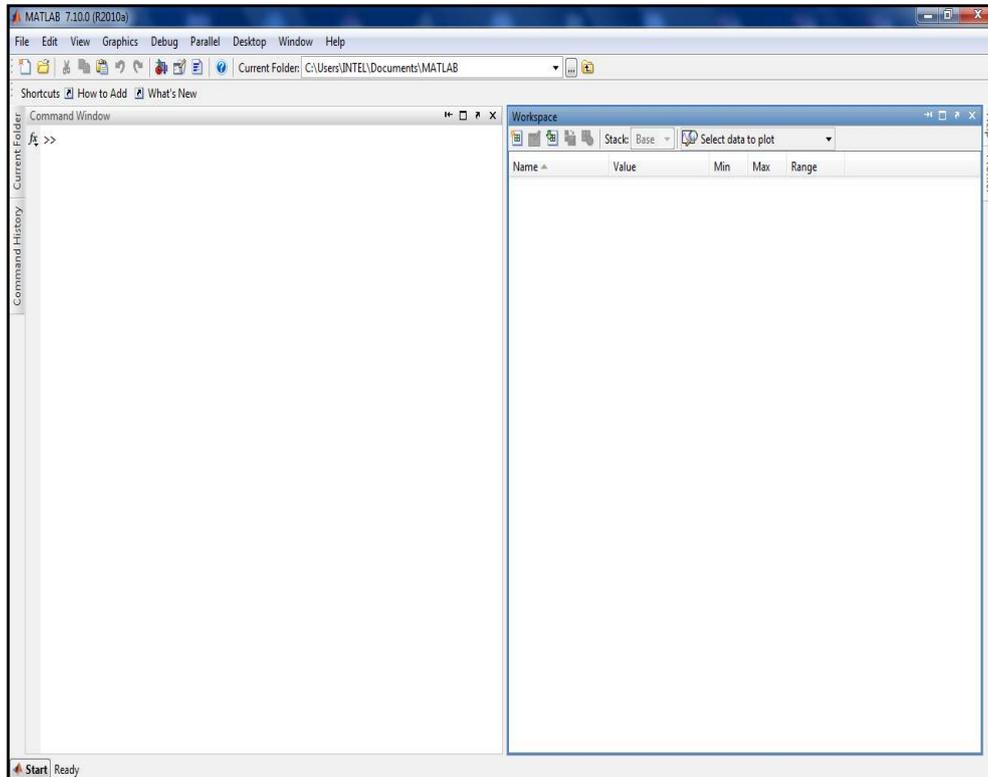


Figure III-7 : Interface du Matlab 9.

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-4-4 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.

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').

Tableau III- 1 : Architecture et paramètres du RN adopté.

III-4-5 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 [66].

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.

Tableau III-2 : Comparaison entre les algorithmes d'apprentissage.

Dans notre cas L'apprentissage a été basé sur l'algorithme de Levenberg-Marquardt à rétropropagation [67] 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.

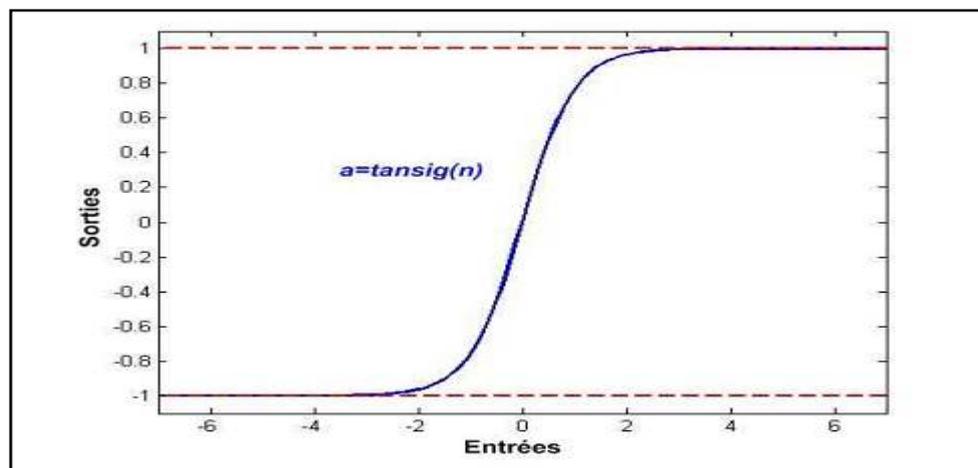


Figure III-8 : Graphe caractéristiques de la fonction tansig.

III-4-6 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 employer 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.

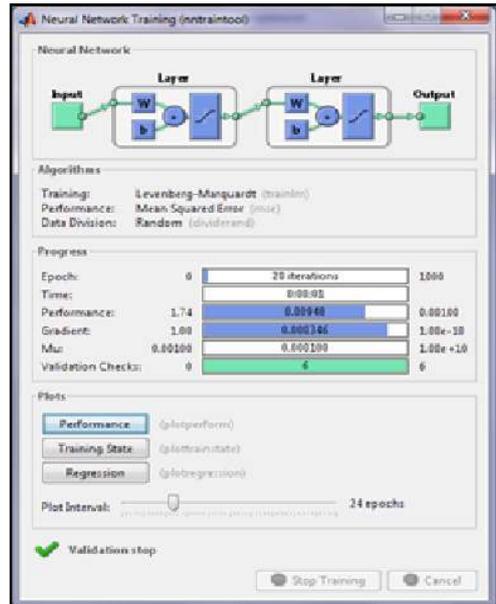


Figure III- 9 : Panneau d'apprentissage du réseau.

Chapitre IV

Résultats et Discussions

Chapitre IV

Résultats et commentaires

IV-1 Présentation des résultats

IV.1-1 Principe

La méthode paramétrée dite réseaux de neurones offre une approche très différente, que se soit de la méthode analytique (traditionnelle), ou de la méthode numérique par des éléments finis, du fait de sa capacité d'apprentissage et de la disponibilité des données. Car, ca nécessite toujours, au point de départ, pour la modélisation des ponts en béton (notre cas), un ensemble de résultats expérimentaux (base de données). Pour y arriver à cet objectif et afin de valider les résultats trouvés par la programmation par cette méthode (RNA), on a estimé les confronter, tout d'abord, au calcul déjà effectué à l'aide du règlement parasismique Algérien des ouvrages d'art (RPOA 2008), puis aux résultats trouvés expérimentalement sur un pont dont les piles ont été renforcées par confinement de composites.

IV.2 Mise en œuvre des réseaux de neurones

Les cinquante cas d'étude 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). Le travail entrepris par le bureau d'études CTTTP, d'une part, et en application du règlement parasismique Algérien des ouvrages d'art (RPOA 2008), donnait lieu à des valeurs de périodes dans le sens transversal et longitudinal.

Que se soit, avant ou après renforcement, les 50 observations faites dans les expériences de la détermination de la période primordiale de vibration du pont testé 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 [67]. 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 45 observations (90% de la base de données) a été progressé jusqu'à ce que le modèle choisi eût développé 15 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 réseaux de neurones de 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 tan-sigmoïde (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 confinement de composites au niveau des futs. Enfin, le codage des différents algorithmes a été effectué dans l’environnement Matlab [68].

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

Num	M structure (Kg)	k système (Mn/m)	k' système (Mn/m)	Période (sens longitudinal)		Période (sens transversal)	
				T (s)	T' (s)	T (s)	T' (s)
1	2 459 008	115	116,53	0,918	0,912	0,092	0,065
2	1 849 310	113	114,88	0,803	0,797	0,054	0,042
3	1 425 975	55	57,28	1,010	0,991	0,139	0,088
4	1 425 975	55	57,28	1,010	0,991	0,139	0,088
5	2 253 126	80	81,42	1,050	1,045	0,195	0,116
6	2 253 126	80	81,42	1,050	1,045	0,195	0,116
7	2 972 873	115	117,07	1,010	1,001	0,128	0,084
8	1 746 469	60	62,22	1,070	1,052	0,226	0,137
9	1 527 985	56	58,10	1,040	1,018	0,207	0,123
10	3 132 697	117	119,27	1,030	1,018	0,136	0,088
11	5 194 018	113	114,88	1,350	1,336	0,055	0,046
12	1 809 286	141	142,35	0,712	0,708	0,026	0,022
13	3 917 413	132	134,12	1,080	1,073	0,107	0,075
14	2 583 650	113	114,88	0,950	0,942	0,081	0,06
15	4 856 794	190	191,73	1,000	1,000	0,073	0,056
16	8 030 350	190	191,73	1,290	1,285	0,168	0,107
17	3 519 960	152	153,33	0,956	0,952	0,067	0,052
18	2 877 746	190	191,73	0,772	0,769	0,027	0,022
19	5 526 975	171	172,48	1,130	1,124	0,118	0,083

20	3 147 755	56	57,32	1,492	1,472	0,377	0,264
21	1 483 903	62	63,32	0,975	0,961	0,175	0,104
22	2 136 882	61	62,81	1,172	1,158	0,273	0,188
23	1 769 152	100	101,21	0,836	0,830	0,071	0,052
24	1 658 547	96	97,37	0,826	0,820	0,073	0,053
25	1 336 715	56	57,33	0,971	0,959	0,114	0,075
26	1 053 195	56	57,33	0,862	0,851	0,115	0,072
27	2 828 781	94	95,67	1,091	1,080	0,194	0,115
28	3 052 841	101	102,53	1,094	1,084	0,186	0,112
29	2 556 161	122	123,16	0,910	0,905	0,078	0,057
30	1 490 624	77	79,23	0,871	0,861	0,104	0,069
31	1 143 329	57	59,93	0,888	0,867	0,132	0,084
32	3 464 780	152	153,33	0,949	0,944	0,067	0,051
33	2 648 900	74	76,42	1,188	1,169	0,227	0,105
34	2 827 780	152	153,33	0,857	0,853	0,044	0,034
35	1 673 520	94	95,73	0,837	0,830	0,171	0,072
36	415 299	30	32,47	0,741	0,710	0,1	0,066
37	2 139 606	100	101,21	0,920	0,913	0,101	0,068
38	636 600	111	114,71	0,475	0,468	0,027	0,022
39	2 308 325	133	134,13	0,828	0,824	0,039	0,032
40	1 591 800	75	76,48	0,917	0,906	0,124	0,079
41	791 650	36	38,08	0,927	0,905	0,16	0,095
42	3 786 775	132	134,08	1,063	1,055	0,032	0,027
43	1 591 800	75	76,48	0,917	0,906	0,124	0,079
44	1 591 800	75	76,48	0,917	0,906	0,124	0,079
45	1 591 800	75	76,48	0,917	0,906	0,124	0,079
46	1 591 800	75	76,48	0,917	0,906	0,124	0,079
47	1 591 800	75	76,48	0,917	0,906	0,124	0,079
48	1 446 475	55	57,28	1,014	0,998	0,133	0,086
49	403 755	55	57,22	0,539	0,527	0,009	0,008

IV.2 Résultats trouvés

IV.2.1 Avant renforcement

Les graphes de performance ci après (figures IV.1 et IV.2) des cas de ponts avant leur renforcement, montre les trois courbes (formation du réseau neural, validation et test). Il s'agit des paramètres de calcul de la période transversale et la période longitudinale de l'ouvrage.

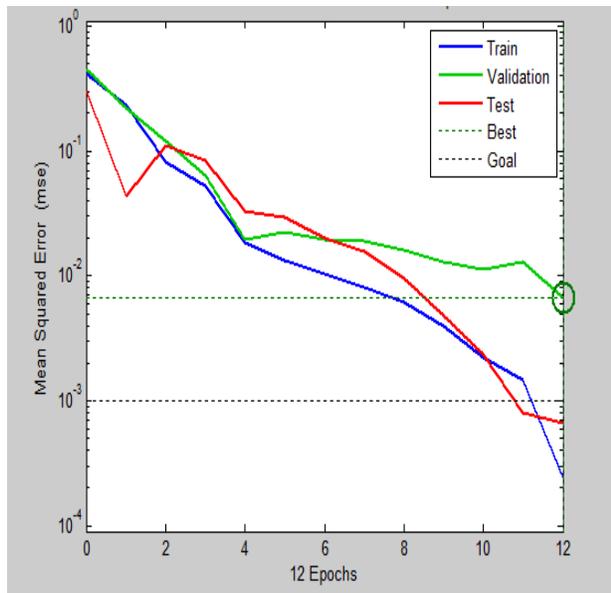


Figure IV.1 : Courbe de performances avant renforcement des ponts (sens longitudinal)

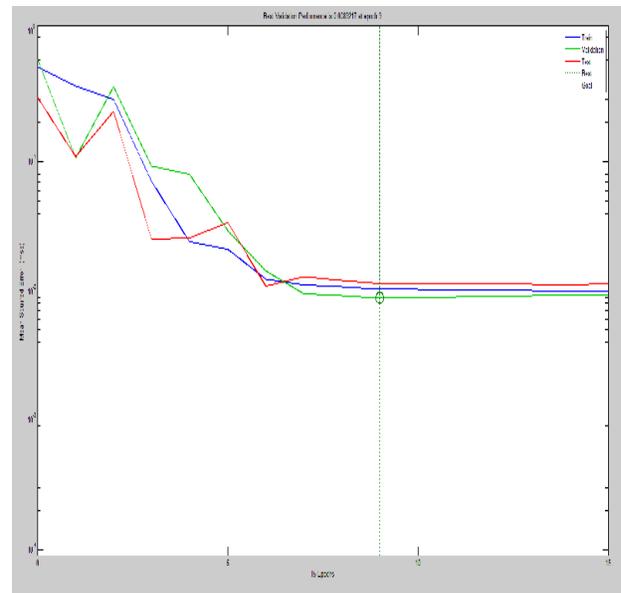


Figure IV.2 : Courbe de performances avant renforcement des ponts (sens transversal)

Pour la courbe de performance dans le sens longitudinal, et malgré plusieurs tentatives dans le but d'avoir une bonne tendance (convergence), on a distingué des écarts au niveau des trois courbes à partir de huitième neurone. La réduction dans l'erreur absolue moyenne d'approximativement 3×10^{-1} milli secondes (pour le réseau avec zéro neurone caché) à 5×10^{-4} milli secondes (pour un réseau avec 12 neurones cachés), ce qui montre une nette régression de l'erreur absolue tout le long de la formation du réseau.

Dans le sens transversal, les courbes semblent avoir une bonne tendance (meilleure convergence) avec une certaine linéarité horizontale et une convergence à partir de le septième neurone. La réduction dans l'erreur absolue moyenne d'approximativement 6×10^{-1} milli secondes (pour le réseau avec zéro neurone caché) à 1.5×10^{-2} milli secondes (pour un réseau avec 15 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 (15 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 point 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 respectivement, dans le sens longitudinal et transversal, que 12 et 15 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 [69].

Les figures IV.3 et IV.4 illustrent les corrélations entre les périodes propres des structures mesurées et celles prédites par le modèle pour la base de l'apprentissage [68]. En effet, la corrélation (pour l'apprentissage) a atteint la valeur de $R= 0.98726$ entre la valeur prédite de la sortie (output) et mesurée, pour le sens longitudinal et ce 0.9778 pour le sens transversal. L'erreur absolue de prédiction avoisine les 11.3% et 13.2% (respectivement) de la période propre. Ces résultats témoignent donc des capacités de généralisations du RNA adopté.

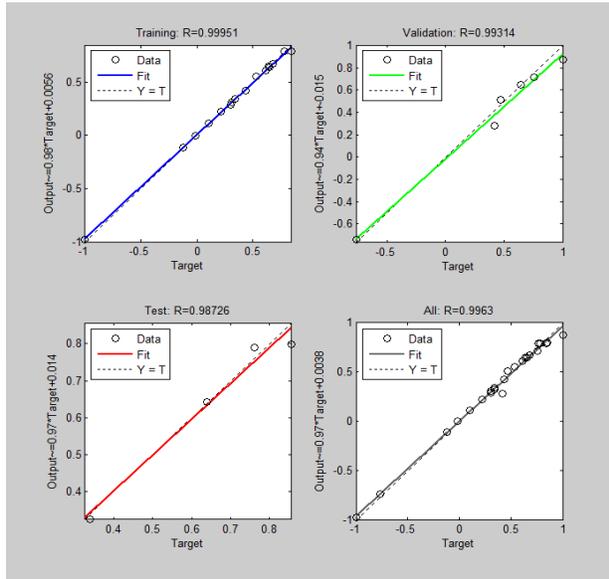


Figure IV.3 : Corrélation entre périodes mesurées et prédites par le modèle RNA (sens longitudinal)

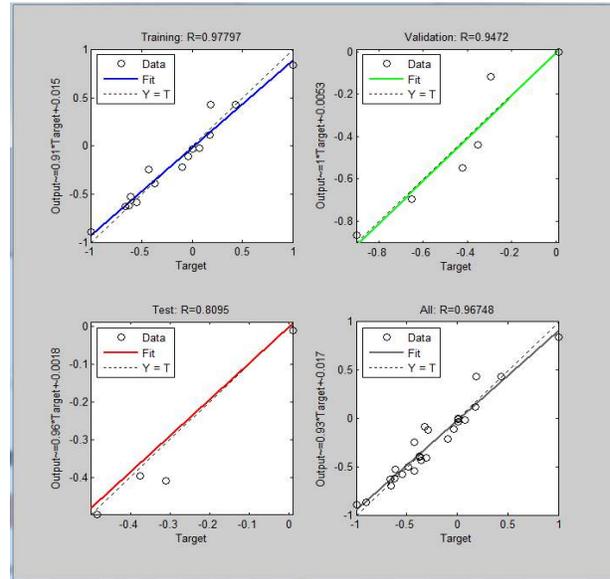


Figure IV.4 : Corrélation entre périodes mesurées et prédites par le modèle RNA (sens transversal)

Aussi, on constate dans les figures IV.5 et IV.6 que la formation du réseau s'est arrêté à la douzième et quinzième itération (respectivement dans le sens longitudinal et transversal). La meilleure performance de la validation se produit par itération 14, se situant à mi chemin de l'arrêt du processus [70].

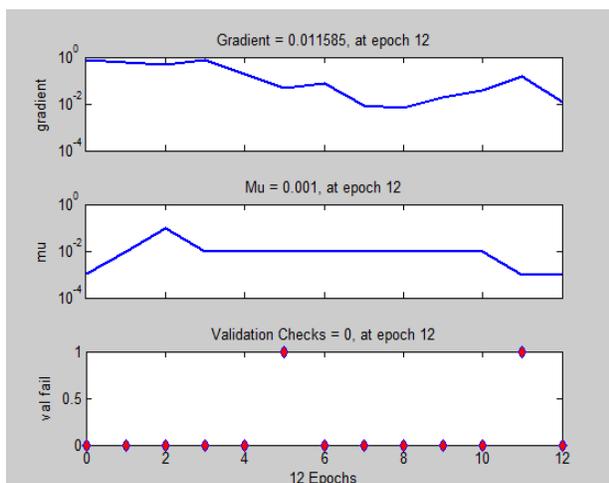


Figure IV.5 : Variation de paramètres durant la formation du réseau par RNA (sens longitudinal)

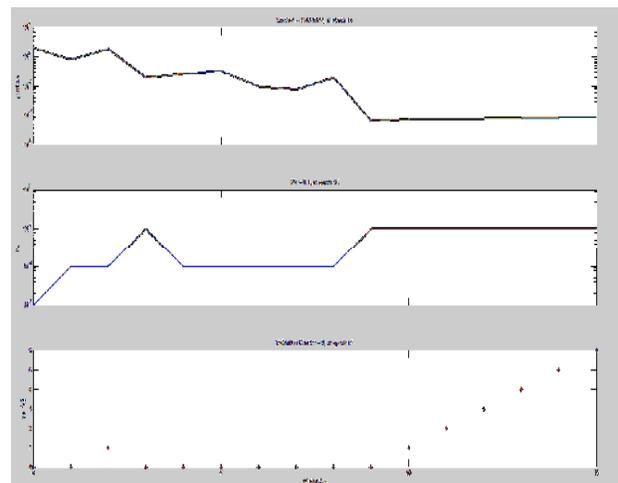


Figure IV.6 : Variation de paramètres durant la formation du réseau par RNA (sens transversal)

IV.2.2 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 déterminées 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, les courbes IV.7 et IV.8 montrent les performances du réseau. Pour le sens longitudinal, la courbe de performance indique une réduction dans l'erreur absolue moyenne d'approximativement 4×10^{-1} milli secondes (pour réseau avec zéro neurones cachés) à 3×10^{-3} milli secondes (pour un réseau avec 7 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. Pour le sens transversal, l'erreur passe de 1.08 milli secondes à 7.5×10^{-3} milli secondes.

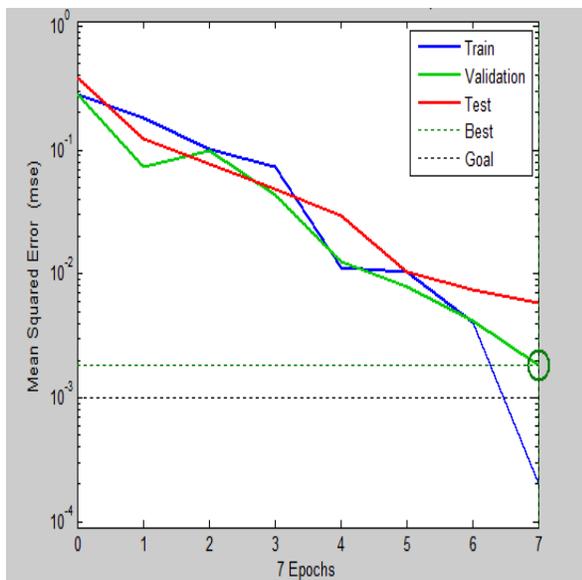


Figure IV.7 : Courbes de performances par RNA après renforcement des ponts (sens longitudinal)

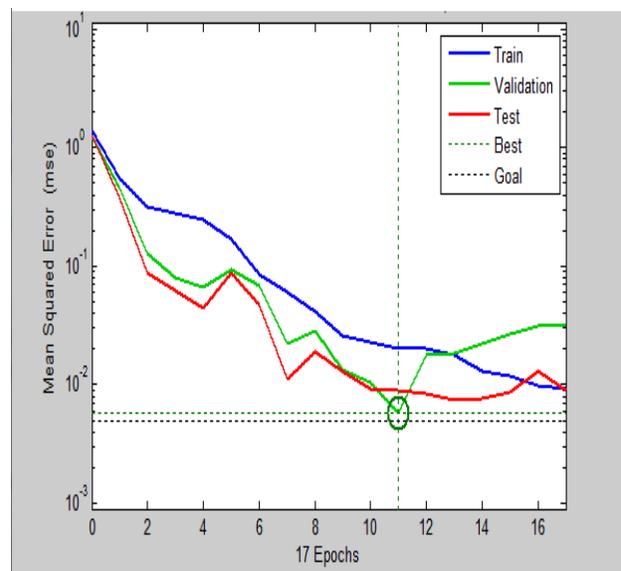


Figure IV.8 : Courbes de performances par RNA après renforcement des ponts (sens transversal)

Pour la formation du réseau, l'arrêt s'est manifesté à la septième itération (Figure IV.9) pour le sens longitudinal et à la dix-septième itération dans le sens transversal. La meilleure performance de la validation, dans cette tentative se produit à la fin des itérations (itération 17). Ce qui montre la difficulté de maîtrise 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 (2.5/1000). Soit un rapport significatif d'une valeur de 25. D'autres tentatives sont recommandées pour améliorer cette différence.

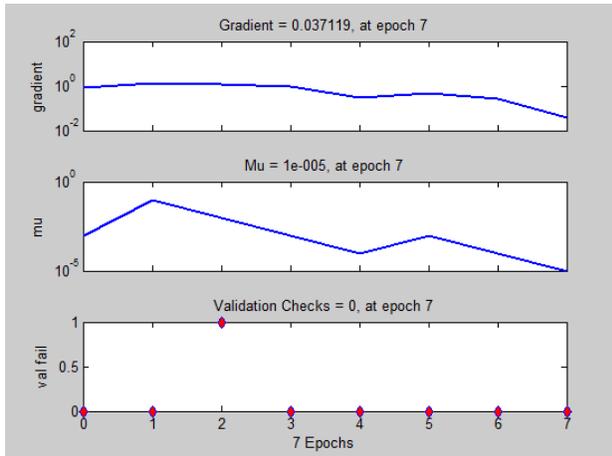


Figure IV.9 : Variation de paramètres dans la formation du réseau après renforcement (sens longitudinal)

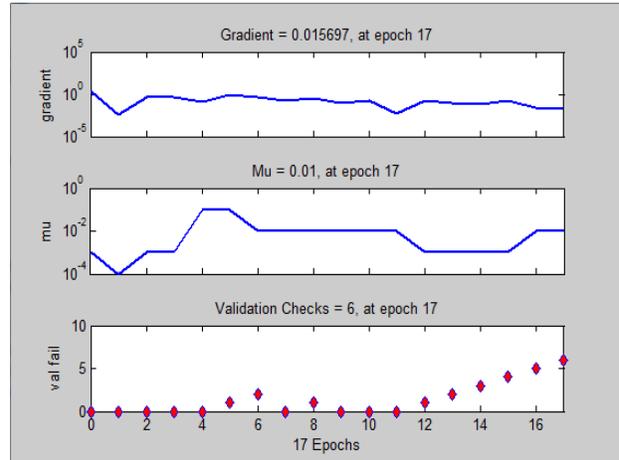


Figure IV.10 : Variation de paramètres dans la formation du réseau après renforcement (sens transversal)

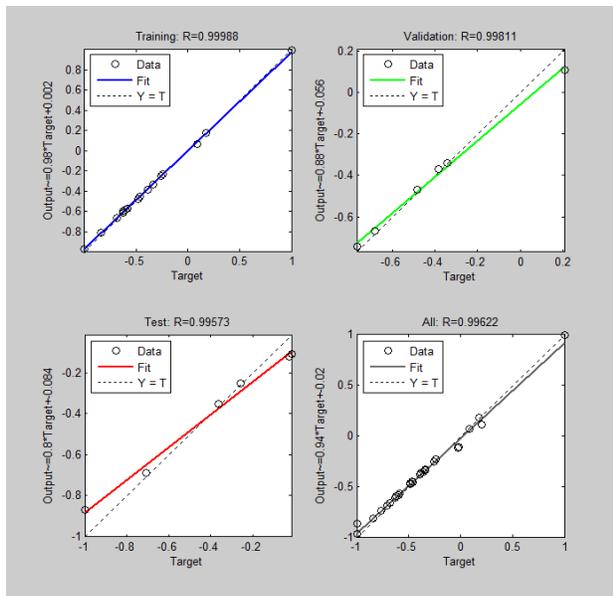


Figure IV.11 : Corrélation entre périodes mesurées et prédites par le modèle RNA (sens longitudinal)

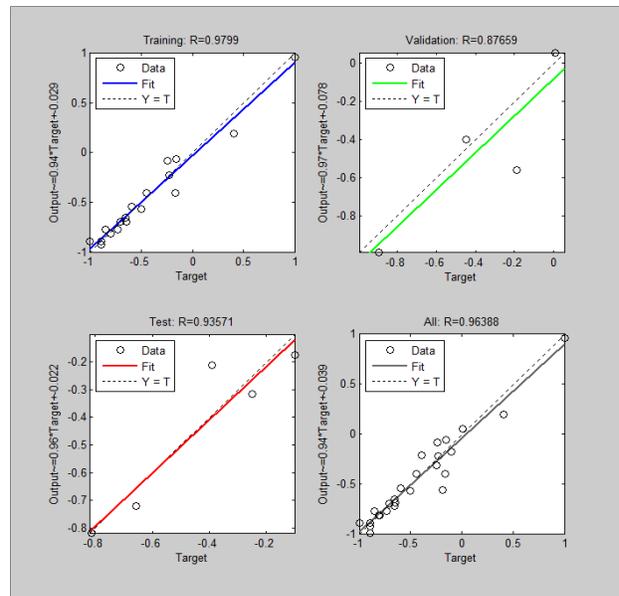


Figure IV.12 : Corrélation entre périodes mesurées et prédites par le modèle RNA (sens transversal)

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 (confinement) sur les surfaces du béton des piles de ponts qui présentait des détériorations et fissurations, avec la prédiction de leur comportement dans le temps par mesure de leur période propre (prépondérante) et ce, dans les sens transversal et longitudinal, 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 cinquante (50) 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 intense (vibrations permanentes), nous sommes arrivés 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 10% jusqu'à 20% entre l'expérimentation et le numérique (éléments finis), cette erreur a pu être maîtrisée par l'application des réseaux de neurones, vu les difficultés de trouver un modèle les convergeant, éventuellement du au nombre réduit de cas pratique, qui est avoisine les cinquante cas.

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

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] : Ministère des travaux publics, Recensements des ouvrages d'art en Algérie, Alger, 2008.
- [2] : Revue Marocaine du Génie Civil, Affouillement des ponts sur rivière : partie I : état de l'art, Avril 2010.
- [3] : 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.
- [4] : NDZANA AKONGO Grégoire & TCHOUMI Samuel, Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures, université de Douala (Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique), Mai 2007.
- [5] : 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.
- [6] : M. BOUKHEZAR, réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites, thèse de magister, département du génie civil, université de Mentouri, Constantine, 2009.
- [7] : Labo Metal, Appareils de contrôle portable pour le béton, Juin 2007.
- [8] : FABEM, Traitements des fissures par injection, guide stress.
- [9] : 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.
- [10] : L'industrie française des matériaux composites, rapport Nodal consultants, Mai 2002.
- [11] : J.M. BERTHELOT, Matériaux composites, Comportement mécanique et analyse des structures, Université de Maine, 1992.
- [12] : F. HADDOUCHE, Analyse numérique du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites, thèse de magister, université de Blida, 2007.
- [13] : Article sur les matériaux composites à base de fibres de carbone, matériau composite carbure de silicium, transport aérien, vecteur unitaire.
- [14] : J. LUYCKX, composites à fibres de carbone dans le génie civil, techniques de l'ingénieur, 2010.
- [15] : BERTHELOT J-M, matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures, université de Maine, le Mans et l'institut supérieur des matériaux de Mans, 1992.
- [16] : R. BENZAID et N.E. CHEIKH, Renforcement et réparation des structures en béton armé par matériaux composites, université de Jijel, 2004.
- [17] : 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.
- [18] : R. SUTER et J. DAC, Confinement de colonnes au moyens de tissus en matériaux composites, revue chantiers, Mai 2001.
- [19] : R. SUTER, Renforcement parasismique au moyen de matériaux composites, école d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg, Suisse.
- [20] : M. Abdessemed et S. Kenai, Comportement des poutres en béton armé renforcées par tissus et lamelles de fibres de carbone, Congrès Africain de la route, Alger, 2005.
- [21] : R. SUTER et al., Chocs de véhicules lourds, renforcement des piles de pont au moyen de tissus en Kevlar, revue chantiers, Octobre 2001.
- [22] : E. ROCHDI, Contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites, thèse de doctorat, l'université de C. BERNARD, Décembre 2004.

- [23] : Structure rénovation/ DEC, unité de réalisation, SAPTA, expertise et réparation des ouvrages d'art en béton, El Harrach, 2009.
- [24] : 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.
- [25] : 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.
- [26] : F.Colomb a, H.Tobbi b, E.Ferrier b,*, P. Hamelin b, Seismic retrofit of reinforced concrete sgort columns by CFRP materials, Science Direct, Elsevier, Journal "Composite structures", février 2007.
- [27] : M. SENOUCI et H. BAGHDADI, Réseaux de neurones, théorie et pratique, LTE, Oran ENSET, Oran, Algérie, 2005.
- [28] : 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.
- [29] : Manuel Clergue, Réseaux de Neurones Artificiels, présentation d'une thèse d'ingénieur, année 2005.
- [30] : Apstat Technologies Inc, Introduction aux réseaux de neurones, Rapport : considération actuelle, Montréal Québec, 2002.
- [31] : D. TOOL, Artificial intelligence applications in geotechnical engineering, électronique journal of geotechnical engineering, university of Durham, UK, 29p, 1996.
- [32]: CI. TEH and al, A prediction of pile capacity using neural network, journal of computing in civil engineering, 1997.
- [33] : 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.
- [34] : DN. URAL et H. SAKA, Liquefaction assessment by neural networks, électronique journal of geotechnical engineering, UK, 1998.
- [35]: Saman Yaghmaei-Sabegh et Hing-Ho Tsang, A new site classification approach based on neural networks, Science Direct, Elsevier, Journal "Soil dynamics and Earthquake engineering", Mars 2011.
- [36] : J. KASPERKIEWIEZ, J. KACZ and A.DUBRAWISKI, HPC strength prediction using artificial neural network, Journal in civil engineering, Vol 9, pp 279, 1995.
- [37]: 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.
- [38]: 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.
- [39]: S. C. Lee, « Prediction of concrete strength using artificial neural networks» Engng. Structure, Vol.25, pp. 849, 2003.
- [40]: 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.
- [41]: 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.
- [42]: Yeh IC, Modeling of strength of hight performance concrete using artificial neural network ,cement and concrete research, 1998, vol 28, n° 12, p 1797-1808.
- [43]: Dias WPS, Poolivadaa SP, Neural network for predicting propertes of concretes with admiscixtures, Construction and building materials, 2001.
- [44]: Sbartaï 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.

[45]: 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.

[46]: R.Perera, M.Barchin, A.Arteaga, A. De Diego, Prediction of the ultimate strength of reinforced concrete beams FRP-strengthened in shear using neural networks, Science Direct, Elsevier, Journal " composites: part B 41 (2010) 287-298"

[47]: Mohamed A. Mashrei, Prediction of the shear strength of concrete beams reinforced with fiber reinforced polymer bars using artificial neural networks model Thi_Qar University, journal pour "Engineering sciences, Vol, 2, No, 4"

[48]: 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

[49]: Khaldoun N., Rahal N. et Abu-Kiefa M., Neural Networks for calculation of shear strength of reinforced concrete beams, Kuwait Journal of science and envenoming, Vol 26, N°2, pp.240-251, 1999.

[50]: 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, Departement of civil and architectural engineering, University of Bahrain, pp. 69-83, 1996.

[51]: Papadrakakis N., Largos N.D et Tsompznakis Y, Structural optimization using evolution strategies and Neural Networks, Journal of computer methods in applied mechanics and engineering, N° 156, pp. 309-333, 1998.

[52]: Papadrakakis N.,Papadopoulos V. et Largos N.D., Structural reability analysis of elesto-Plastic structures using neural networks and monte Carlo Simulation, Journal of computer methods in applied mechanics and engineering, Vol.136, pp.145-163, 1996.

[53]:Hiratsuka K., Shingu K., Dynamis response of conical shell using neural networks based vibration control, 12WCEE, N° 0450, 6p, 2000.

[54]: 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.

[55]: 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, Departement of civil and architectural engineering, University of Bahrain, pp. 85-92, 1996.

[56]: Wong FS., Thint MP, et Tung AT, On line detection of damage using neural networks, weidlinger associate, CA 94022, USA, 27p, 1996.

[57]: 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.

[58]: 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.

[59] : 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.

[60]: 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.

[61]: 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.

- [62]: 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.
- [63] : INEL M. 'Modeling ultimate deformation capacity of RC columns using artificial neural networks'. Engineering Structure. 2007, vol. 29, p. 329-335.
- [64] : GHESAB.F. 'Application des réseaux de neurones dans la prévision du comportement des ponts renforcés par matériaux composites'. Université de Blida-Département de génie civil. Mémoire de master II. Oct-2011.
- [65] : Exemple de dimensionnement d'un pont, Annexe B, SAPTA.
- [66] : 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.
- [67]: R. Younes, Initiation sur Matlab, faculté de génie mécanique, Université Libanaise, Beyrouth, 2005.
- [68]: 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.
- [69]: Mostafa Jalal and Ali A Ramezani pour, Strength enhancement modeling of concrete cylinders confined with cfrp composites using artificial neural networks, Journal Composites: Part B, 43 (2012) 2990-3000, Elsevier, June 2012.
- [70]: Sbartai Z.M., Radar et réseaux de neurones artificiels 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.
- [71] : HAMMOUDA.T-CHOUIDER-A. 'Application du nouveau règlement parasismique algérien des ouvrages d'art sur un pont à poutres multiples'. Ecole National Polytechnique. Oct-2011.

Annexe I

Fiche technique :

wilaya	Daira	Nom du pont	Année livraison	Type de poutre	Nbre de travées	L pont (m)	l pont (m)	H pile (m)
Alger	Ben Aknoun	Doudou Mokhtar	-	BP	2	50,4	14,7	4,85
Alger	Ben Aknoun	Echangeur	1987	BP	2	51,2	21,3	5,25
Alger	Ben Aknoun		1987	BP	3	41	21,3	6,6
Alger	Ben Aknoun		_	BP	1	21	21,3	5
Alger	Ben Aknoun	Echangeur cité malki	_	BP	2	61,4	35,5	5
Alger	Bouzareah		_	Mixte	1	33,5	19,8	7,6
Alger	Ben Aknoun	_	_	_	1	21,3	53	5,4
Alger	Ben Aknoun	_	_	_	1	42,5	71	5,8
Alger	Ouled Fayet	_	période coloniale	_	1	31,6	7,8	5
Alger	Chéraga		1985_1990	BP	1	38	21	5,25
Alger	Chéraga	El Bahdja	1988	BP	2	50	12,5	5,25
Alger	Chéraga	Echangeur Bouchaoui	1988	BP	2	50	12,5	5,25
Alger	Chéraga	pont des dunes	_	_	2	11,5	10	5
Alger	Chéraga		_	BP	2	50	11,5	5,25
Alger	Chéraga	Echangeur club des pins	_	BP	2	50	21,5	5,25
Alger	Ain Benian	Pont de Oued Beni Messous	1951	_	1	31,6	7,8	5
Alger	Ain Benian	_	2001	_	1	9,3	11,8	_
Alger	Dely Brahim	pont de Ain Allah	_	BP	2	50	12,5	7,2
Alger	Dely Brahim	Echangeur de dely brahim	1985_1990	BP	4	75,6	14,5	10,9
Alger	Birtouta	Pont sur Pk 22+800	1999	BP	2	70,25	14,9	5,25
Alger	Birtouta	Echangeur SAPTA	1999	BP	2	70,25	14,9	5,25
Alger	Birtouta	Pont sur Pk25+500	1987	BP	2	62,4	21,4	5,25
Alger	Birtouta	Pont sur Pk 31+100	1987	BP	2	69,2	11,4	5,25
Alger	Birtouta	Pont sur Pk27+800	1985	BP	2	61,75	10,65	5,25
Alger	Birtouta	Pont sur Pk 26+700	1987	BP	2	65,45	21,8	5,25
Alger	Birtouta	Pont sur Pk 3+500	_	_	2	15,2	8,1	_
Alger	Birtouta	Pont sur Pk 24+150	_	_	2	21,65	8,15	_
Alger	Birtouta	Pont sur Pk23+100	1985	BP	2	68	16	4,6
Alger	Birtouta	Pont SNTF	_	_	2	30	13,4	5,8
Alger	Bab El Oued	_	_	Mixte	3	75,5	23,4	_

Annexe I

Alger	Bab El Oued	_	1900	Mixte	1	14	6	3,5
Alger	Barraki	_	_	_	1	8	10	_
Alger	Barraki	_	_	_	5	29,3	10	_
Alger	Barraki	_	_	BP	4	110,5	10	_
Alger	Barraki	_	_	Mixte	2	115	14	_
Alger	Barraki	_	2005	BP	8	205,6	27,75	_
Alger	Barraki	_	1996	BP	2	66,8	52	5,25
Alger	Barraki	_	1998	BP	4	102	13,75	5,25
Alger	Barraki	_	1997	BP	2	40	10	_
Alger	Barraki	_	2004	BP	1	30	26	5,25
Alger	Barraki	_	2004	BP	2	66,8	27,75	5,25
Alger	Barraki	_	1996	BP	2	50	23,2	5,25
Alger	Barraki	_	_	_	5	29,3	10	_
Alger	Barraki	_	_	Mixte	1	16,8	9	_
Alger	Barraki	_	_	_	1	14,5	10,2	_
Alger	Barraki	_	_	_	1	13,7	10	_
Alger	Bir M.Rais	Baba Ali	_	BP	2	70,2	11,6	5,2
Alger	Bir M.Rais	S Hamdine	_	_	3	43,3	11,4	_
Alger	Bir M.Rais	Gadouche AEK	_	_	1	17,5	8,2	_
Alger	Bir M.Rais	_	1995	BP	3	120	10,7	_
Alger	Bir M.Rais	_	P coloniale	_	3	98	10,2	_
Alger	Bir M.Rais	S Hamdine	1979	BP	1	60,2	37	4,85
Alger	Bir M.Rais	Echangeur Hydra	1979	BP	2	98	38	4,85
Alger	Bir M.Rais	pont cité hayet	_	BP	3	90,5	14,5	_
Alger	Bir M.Rais	_	_	Mixte	2	94	6,2	10,2
Alger	Bir M.Rais	_	_	_	9	235,6	8,4	_
Alger	Bir M.Rais	_	P coloniale	Mixte	1	20	6,8	_
Alger	Bir M.Rais	Pont de Saoula	1984	BP	4	61,3	14	4,85
Alger	Bir M.Rais	Pont de Birkhadem	1982	_	1	18,7	44	4,85
Alger	Bir M.Rais	Pont de Diar El Rahma	1982	_	6	22	45,3	4,85
Alger	Bir M.Rais	_	_	BP	2	54	11	5,2
Alger	Bir M.Rais	_	1983	Mixte	1	52	30,4	4,85
Alger	Bir M.Rais	_	1984	BP	1	34,8	36	4,85
Alger	Dar El Beida	_	1984	BP	1	52	35	_
Alger	Dar El Beida	_	1984	BP	1	50,5	27,5	_
Alger	Dar El Beida	_	1986	BP	4	114	13,25	4,85
Alger	Dar El Beida	Oued El Hamiz	1982	BP	2	68	26	_
Alger	Dar El Beida	Pont 19-1	1986	BP	10	285	27	5,75
Alger	Dar El Beida	Echangeur 20-1	1986	BP	2	75	34,3	5,25
Alger	Dar El Beida	Pont 19-2	2002	BP	2	112	13	5,25
Alger	Dar El Beida	Pont d' El	1986	BP	4	107	27	4,85

Annexe I

		Hamiz 16-1						
Alger	Dar El Beida	Pont d' El Hamiz	_	Mixte	2	80	13	_
Alger	Dar El Beida	Pont d' El Hamiz	_	_	2	58	3,8	_
Alger	Dar El Beida	Dar El Beida	_	Mixte	2	126	23,15	5,75
Alger	Dar El Beida	Pont 19-2	_	BP	1	36	15,6	4,85
Alger	Dar El Beida	Pont 20-2	1986	BP	2	58	11,6	5,25
Alger	Dar El Beida	Pont 18-1	1986	BP	2	85	11,5	4,85
Alger	Dar El Beida	Pont 15-1	1985	BP	3	82	13	4,85
Alger	Dar El Beida	Pont 15-2	1984	BP	3	74	32	4,85
Alger	Dar El Beida	Bab Ezzouar A	_	BP	1	52	15	4,85
Alger	Dar El Beida	Bab Ezzouar B	_	BP	1	52	15	4,85
Alger	Dar El Beida	Pont 3-2	_	BP	2	69,2	13,4	4,85
Alger	Dar El Beida	Pont d'El Harrach	1982	BP	7	196	25,9	5
Alger	Dar El Beida	Pont 10-6	1985	BP	3	80	16	5,25
Alger	Dar El Beida	Echangeur Safex11	1984	BP	2	42	18,5	4,85
Alger	Dar El Beida	Echangeur Safex11-2	1984	BP	2	42	17,8	4,85
Alger	Dar El Beida	Echangeur Safex 11-4	1985	BP	2	46	13	4,85
Alger	Dar El Beida	Echangeur Safex 11-5	1985	BP	2	42	10,5	4,85
Alger	Dar El Beida	Pont Safex 12-1	1984	BP	3	82	27	4,85
Alger	Dar El Beida	Oued Bouraia	1975	_	2	22,7	10	_
Alger	Dar El Beida	Oued El Hamiz	_	_	1	36	7,8	_
Alger	El Harrach	Oued Ouchaieh	_	Mixte	3	105	18,5	6,52
Alger	El Harrach	_	1987	BP	2	74,2	17,5	5,34
Alger	El Harrach	_	1987	BP	2	74,2	18,75	5,34
Alger	El Harrach	_	1987	BP	1	33	17,5	_
Alger	El Harrach	_	1987	BP	1	33	10,5	_
Alger	Hussein Dey	Pont Pénétrant des Annassers	_	BP	3	77	22	6
Alger	Hussein Dey	Echangeur salettes	1984	BP	4	60	10	6
Alger	Hussein Dey	_	1984	BP	7	188	10,9	5
Alger	Hussein Dey	_	1984	BP	7	169	9,1	6,6
Alger	Hussein Dey	_	_	BP	1	33	17,9	5
Alger	Hussein Dey	_	_	BP	4	95	9,1	6
Alger	Hussein Dey	_	1985	BP	_	390	18,5	5,9
Alger	Hussein Dey	_	1985	BP	12	240,5	18,25	_

Annexe I

Alger	Hussein Dey	_	1985	BP	2	41,41	18,25	_
Alger	Hussein Dey	_	1985	BP	7	180	17,75	6,4
Alger	Hussein Dey	_	1985	BP	_	338,5	18,5	5,9
Alger	Hussein Dey	_	1985	BP	6	136,5	11	5
Alger	Hussein Dey	_	1985	BP	6	122	11	_
Alger	Hussein Dey	_	1985	BP	6	99	8,5	6
Alger	Hussein Dey	_	1984	BP	5	186	12,35	5,2
Alger	Hussein Dey	_	_	_	1	12,4	45,3	5,2
Alger	Hussein Dey	_	_	BP	2	59	21	5,95
Alger	Hussein Dey	_	_	BP	1	32	33,45	_
Alger	Hussein Dey	_	_	BP	3	67	24,22	6
Alger	Hussein Dey	_	_	BP	3	65,8	17,25	6
Alger	Hussein Dey	_	1989	BP	2	50	22,5	4,85
Alger	Hussein Dey	_	_	BP	3	40	22,15	5,25
Alger	Hussein Dey	_	1989	BP	1	46	14,5	5,2
Alger	Hussein Dey	_	1989	BP	2	45	11	6
Alger	Hussein Dey	_	_	BP	3	76	11	6,9
Alger	Rouiba	Pk 21+955	1988	BP	2	51,4	30	4,85
Alger	Rouiba	_	1980	BP	2	76	16	5,75
Alger	Rouiba	Pk38+113	1988	BP	2	41,4	30	4,85
Alger	Rouiba	_	1990	BP	2	51,5	14,8	4,85
Alger	Rouiba	Pont de centre ville	1961	BP	4	30	7	4,85
Alger	Rouiba	Pk 30+980	1961	BP	3	31	8	5,75
Alger	Rouiba	Oued El Biar	1936	BP	1	26,8	6	5,75
Alger	Rouiba	_	1988	BP	2	51,4	18,5	4,85
Alger	Sidi M'Hamed	_	1961	BP	5	126	17	5,2
Alger	Sidi M'Hamed	_	1962	BP	8	113,6	12,5	5,75
Alger	Sidi M'Hamed	_	1958	BP	1	10	23,55	6
Alger	Sidi M'Hamed	_	1984	BP	1	37	27,3	4,8
Alger	Zeralda	_	1987	BP	2	50	14	5,25
Alger	Zeralda	_	1987	BP	2	50	7	5,25
Alger	Zeralda	_	1987	BP	2	50	50	5,25
Alger	Zeralda	PK 4+357	1987	BP	2	50	14	5,25
Alger	Zeralda	PK 5+161	1987	BP	2	50	14	5,25
Alger	Zeralda	Pk 6+398	1987	BP	2	50	14	5,25
Alger	Zeralda	Pk 7+647	1987	BP	2	50	14	5,25
Alger	Zeralda	Pk 8+755	1987	BP	4	50	14	5,25
Alger	Zeralda	Pk 5+361	1987	BP	2	50	14	5,25
Alger	Zeralda	Pk 0+380	1987	BP	2	50	13	5,25
Alger	Zeralda	Pk 25+027	1985	BP	1	12	13	5,75

Tableau A1 : fiche technique

-Avant renforcement :

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.

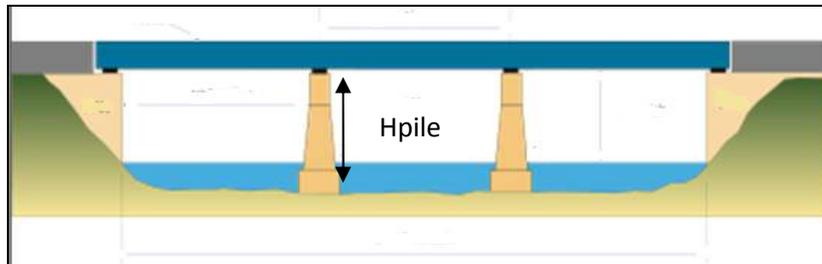


Figure A1: Coupe longitudinale d'un pont.

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.

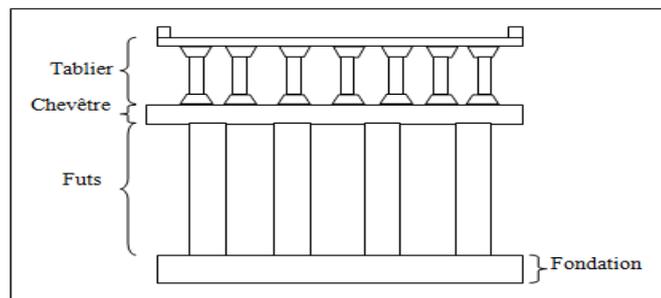


Figure A2 : Coupe transversale d'un pont.

Calcul du poids propre du tablier

Calcul des charges permanentes (Cp) [3]:

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

- $q_{dalle} = l_{pont} * e_{dalle} * \gamma_{bét}$;
avec : l_{pont} : largeur du pont ;
 e_{dalle} : épaisseur de la dalle ;
 $\gamma_{bét}$: poids volumique du béton.

- $q_{poutre} = n * S * \gamma_{bét}$;
avec : n : nombre de poutre pour chaque pont.

S : section de la poutre.

Le nombre de poutre est calculé par la formule suivante :

$$n = 1 \text{ pont} / 1.5$$

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

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

- $\text{CCP} = 35\text{à} 40\% \text{ CP}$

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

Calcul de la masse totale des piles :

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

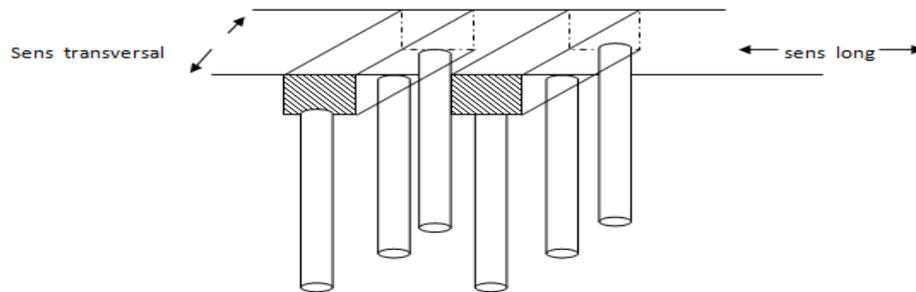


Figure A3 : Vue en plan d'une structure de pont.

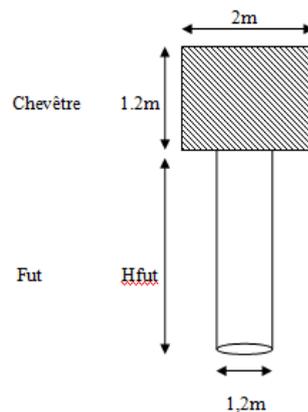


Figure A4: Dimensions du fut et du chevêtre.

$$M_{\text{pile}} = M_{\text{chevêtre}} + M_{\text{fut}}$$

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

Avec :

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

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

l : largeur du chevêtre ($l = 2m$).

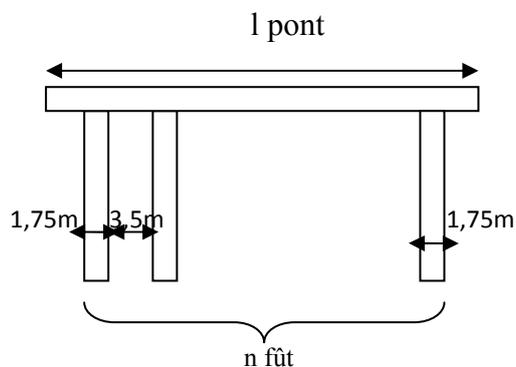
-M fûts = (fûts * $\pi D^2 / 4$ * $\gamma_{\text{bét}}$) * n appui.

Avec :

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

n appui = n travée - 1.

n fût = $l_{\text{pont}} / 3,5$



*Calcul de la raideur totale de la structure

Calcul de la raideur de la pile

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

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

Avec :

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

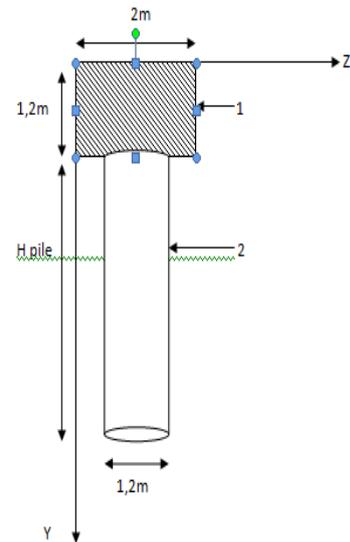
- Pour âge de pont > 30ans, $E = 24000 \text{ mPa}$.
- Pour $10 < \text{âge de pont} < 30\text{ans}$, $E = 28000 \text{ mPa}$.
- Pour âge de pont < 10ans, $E = 32000 \text{ mPa}$.

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

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

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

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



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 ;

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

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.

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

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

Calcul de la raideur totale par appui

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

Calcul de la raideur du système

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

Avec : n pile le nombre de piles.

*Calcul de la période propre T

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

-Après renforcement

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 conséquente 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 ($M_{\text{avant renforcement}} = M_{\text{après renforcement}}$).

Calcul de la raideur totale de la structure:

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

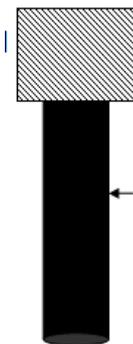
$$E' = E + n' E_{\text{CFRP}} \quad [10]$$

Avec E' : Module de déformation après renforcement.

E : Module de déformation avant renforcement.

$n'_{\text{CFRP}} = 7,5$ (coefficient d'équivalence).

E_{CFRP} : Module de déformation de CFRP.



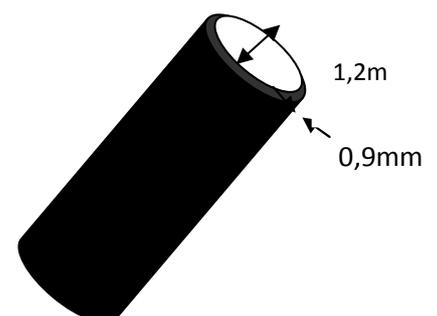
Le fut (cylindre) est Confiné extérieurement par un tissu de CFRP d'épaisseur 0,9mm.

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.

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

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 :

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

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 A2 : 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

DESCRIPTION PROGRAMME :

Le programme ci-après, permet de calculer les pulsations, les périodes propres, et les déformées modales (sur langage de programmation MATLAB) d'un système mécanique après avoir évalué sa matrice de masse et de rigidité, et quelque soit son nombre de degré de liberté, à condition que la matrice de masse soit diagonale (les masse du système sont bien concentrées aux niveaux des degrés de liberté assignées au système).

BUT DU PROGRAMME :

Vu que la résolution d'un problème en dynamique des structures demande tout d'abord l'évaluation de ses caractéristiques propres, l'ingénieur doit passer donc par un calcul relativement lourd voir même impossible, pour qu'il puisse les évaluer.

Le programme vise alors à alléger ces calculs, seulement l'utilisateur de ce programme doit injecter les matrices de masse et de rigidité de son système (M, K).

LES ENTREES DU PROBLEME SONT:

[K], [M] : Les matrices de rigidité et de masse du système.

LES RESULTATS DU PROGRAMME:

Les pulsations propres, les périodes propres, les déformées modales, la masse généralisée pour chaque mode, le facteur de contribution modale et la participation massique de chaque mode.

PROGRAMME MATLAB pour la résolution du système d'équation

$$|K - \omega^2 M| = 0$$

```
format long
M = [x 0 0 ; 0 x 0 ; 0 0 x];
K = [ x x 0 ; x x x ; 0 x x];
[V,D]=eig(K,M);
Mtot=sum (diag (M));
N=size (K);
forcetot=0;
id= [1 ; 1 ; 1 ];
for I=1: N;
Fi=V (:,I)/V(1,I);
Mgi=Fi'*M*Fi;
Valpi=sqrt(D(I,I));
Alfai=Fi'*diag (M)/Mgi;
Periodi= (2*3.14/Valpi);
if Periodi < 0.15 ;
sdii= 3.2373*(1+1.5*Periodi/0.15)/Valpi^2;
elseif 0.15 <= Periodi & Periodi <= 0.4 ;
sdii= 8.09325/Valpi^2;
else
sdii=3.2373/Periodi/Valpi^2;
end;
accii = sdii*Valpi^2;
aii = (Fi'*M*id)/(Fi'*M*Fi);
a (I) = aii ;
accelerations (I) = accii;
sdi (I) = sdii ;
ph= aii*Fi;
phi(:,I) = ph ;
ui=accii*ph/Valpi^2;
deplrelatifs (:,I) = ui;
ei (:,I) = K*deplrelatifs (:,I);
energiepot(I) = 0.5*(deplrelatifs(:,I)*K*deplrelatifs(:,I));
sommeep=sum(energiepot);
Massegeneralise (I) = Mgi;
Modespropre (:,I)=Fi;
Participatiomassiquei=100*(((Fi'*diag(M))^2)/ (Mtot*Mgi));
Participationmassique(I)=Participatiomassiquei;
```

```
Pulsations (I) =Valpi;
Periodes (I) =Periodi;
Facteurdecontributionmodal(I)=Alfai;
Facteurdeparticipationmassique(I)=Participatiomassiquei;
end;
sommecarre(I)=0;
for I=1: N;
for j = 1: N ;
sommecarre(I) =sommecarre(I)+ei(I,j)^2 ;
end;
forcei(I)=sqrt(sommecarre(I));
forcetot=forcetot+forcei(I);
pourcentageep(I)=100*energiepot(I)/sommeep;
end;
Pulsations (I)=Valpi
Periodes (I)=Periodi
Modespropre(:,I)=Fi
sdi (I) = sdii
accelerations (I) = accii
phi(:,I) = ph
deplrelatifs (:,I) = ui
energiepot(I) = 0.5*(deplrelatifs(:,I)'K*deplrelatifs(:,I))
sommeep=sum(energiepot) ;
pourcentageep(I)=100*energiepot(I)/sommeep
ei (:,I) = K*deplrelatifs (:,I)
forcei(I)=sqrt(sommecarre(I))
forcetot
Massegeneralise(I)= Mgi
Facteurdecontributionmodal(I)=Alfai
Participationmassique(I)=Participatiomassiquei
```