

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Civil
Laboratoire de Génie Sismique et Dynamique des Structures
Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie
Civil

**Méthode hybride de détection et localisation des
dommages :**
Application à un pont existant

Réalisé par :

M. Mohamed Said LAGHOUB
Melle. Hanifa KRIDI

Sous la direction de :

Mme D. CHERID

Présenté et soutenu le 09/07/2020

Composition du Jury :

| | | | |
|----------------|-------------------------|-------|-----|
| Président : | M. Nouredine BOURAHLA, | Prof. | ENP |
| Promotrice. : | Mme Djamila CHERID, | MC B | ENP |
| Examineur : | M. Saadi LAKEHAL, | MC B | ENP |
| Examinatrice : | Mme Hafida MOHABEDDINE, | MC B | ENP |

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Civil
Laboratoire de Génie Sismique et Dynamique des Structures
Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie
Civil

**Méthode hybride de détection et localisation des
dommages :**
Application à un pont existant

Réalisé par :
M. Mohamed Said LAGHOUB
Melle. Hanifa KRIDI

Sous la direction de :
Mme D. CHERID
Présenté et soutenu le 09/07/2020
Composition du Jury :

| | | | |
|----------------|-------------------------|-------|-----|
| Président : | M. Nouredine BOURAHLA, | Prof. | ENP |
| Promotrice. : | Mme Djamila CHERID, | MC B | ENP |
| Examineur : | M. Saadi LAKEHAL, | MC B | ENP |
| Examinatrice : | Mme Hafida MOHABEDDINE, | MC B | ENP |

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail tout d'abord à nos parents qui nous ont toujours soutenus et pour qui nous portons un amour indéfectible.

A nos frères et sœurs qui sont toujours là quand on a besoin d'eux.

A nos amis qui nous font sourire et nous encouragent à aller de l'avant.

LAGHOUB Mohamed Said

KRIDI Hanifa

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à adresser nos remerciements à notre promotrice **Mme Djamila CHERID** et à **Mr. Noureddine BOURAHLA** pour leur assistance, leurs conseils, leurs encouragements et leur bienveillance.

Nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance à tous nos professeurs du département de Génie Civil de l'Ecole Nationale Polytechnique qui nous ont enrichis de connaissance, de savoir et qui ont contribué à notre formation d'ingénieurs. Mais aussi à l'ensemble du personnel du département.

Nous remercions également toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de notre projet de fin d'étude notamment **Mr. Khaled HAMZAOUI** et **Mr. Riad ZYAT**.

العنوان

طرق هجينة لكشف وتحديد موقع الضرر: التطبيق على جسر موجود.

ملخص

جسر وادي ديب، ميلا هو جسر يربط بين مدن جيغل-ميلا ويعبر بحيرة أكبر سد في الجزائر، سد بني هارون. إنه ذات أهمية اقتصادية واستراتيجية كبيرة.

يعد الرصد المستمر للحالة الصحية للمنشآت العمرانية ذات أهمية حيوية حالياً وهو قطاع مزدهر يمثل تحدياً علمياً مثبتاً. كل نوع من الهياكل العمرانية له خصائصه الهيكلية، وأمراضه المتعلقة بالمواد والعناصر الهيكلية والبنية التحتية. يؤثر التلف المحتمل الناتج على السلوك الديناميكي للهيكل. تتمثل المشكلة المعاكسة في جمع الاستجابة الديناميكية المنبعثة من الهيكل عن طريق أجهزة محددة (مقاييس التسارع أو أجهزة قياس الزلازل)، وتحليل واستخراج المعلومات عن حالة الهيكل مما سيجعل من الممكن اكتشاف وتحديد وقياس شدة أي ضرر.

في هذه الدراسة نستخدم أولاً خوارزمية وراثية لتحسين مواقع أجهزة الاستشعار المتعلقة بجمع البيانات لرصد الضرر في الجسر. الخطوة التالية تتمثل في محاكاة استجابة الهيكل الخاضع للإهتزازات العادية المحيطة به وذلك باستعمال برنامج PAS2000. تقدم هذه الدراسة عمل رقمي لتحديد الضرر للجسر باستخدام دوال الاستجابة الترددية sFRF والشبكات العصبية الاصطناعية sNN. يتم استعمال طريقة التحليل للمكونات الأساسية ACP للتقليل من الأبعاد في sFRF. يتم بعد ذلك استعمال الـ sFRF المصغرة بالـ ACP كمعلومات أولية للـ sNN بغرض تحديد الضرر الموجود في الهيكل. النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام NN دقيقة للغاية في معظم الحالات.

الكلمات المفتاحية

الجسور، الأضرار، أجهزة الاستشعار، الذكاء الاصطناعي، الشبكات العصبية،

Title

Hybrid method for detecting and locating damage: Application to an existing bridge.

Abstract

The Oued Dib, Mila Bridge is a cable-stayed bridge, which connects the towns of Jijel - Mila and crosses the lake of Algeria's largest dam of Béni-Haroun. It has a huge economic and strategic importance.

Continuous monitoring of the state of health of a structure has a vital importance; it is currently a booming sector of activity and represents a proven scientific challenge. Each type of structure has its structural specificities, its pathologies relating to materials, structural elements and infrastructure. The resulting potential failures influence the dynamic behavior of the structure. The inverse problem consists in collecting the dynamic response of the structure by means of specific instrumentations (accelerometers or seismometers), analyzing and extracting information on the state of the structure, which will make it possible to detect, locate and measure the severity of any damage.

In this study, we first use a genetic algorithm to optimize the locations of the sensors relating to data collection for monitoring the bridge. The next step is to simulate the response of a structure under an ambient vibration using the SAP2000 software. This study presents a digital investigation of damage identification of the bridge using frequency response functions (FRFs) and neural networks (NNs). Principal component analysis (PCA) is pursued to the measured FRFs for dimensionality reduction, and then the PCA-compressed FRF data are used as input to NNs for damage identification. The results obtained using the trained NN are very accurate in most cases of the test dataset.

Keywords

Bridges, damage, sensors, artificial intelligence, neural networks,

Titre

Méthode hybride de détection et localisation des dommages : Application à un pont existant

Résumé

Le pont d'Oued Dib, Mila est un pont à haubans qui relie les villes de Jijel - Mila et franchit le lac du plus grand barrage d'Algérie, celui de Béni-Haroun. Il est d'une importance économique et stratégique primordiale.

Le suivi continu de l'état de santé des ouvrages d'importance vitale constitue actuellement un secteur d'activité en plein essor et représente un défi scientifique avéré. Chaque type d'ouvrage a ses spécificités structurales ses pathologies relatives aux matériaux, éléments structuraux et infrastructure. Les défaillances potentielles qui en résultent influent sur le comportement dynamique de l'ouvrage. Le problème inverse consiste à collecter la réponse dynamique émise par la structure au moyen d'instrumentations spécifiques (accéléromètres ou sismomètres), d'analyser et d'extraire des informations sur l'état de l'ouvrage qui permettront de détecter, localiser et mesurer la sévérité des dommages éventuels.

Dans cette étude, nous utilisons d'abord un algorithme génétique pour optimiser les emplacements des capteurs relatifs à la collecte de données pour le suivi du pont. L'étape suivante consiste à simuler la réponse d'une structure sous une vibration ambiante à l'aide du logiciel SAP2000. Cette étude présente une étude numérique de l'identification des dommages du pont à l'aide des fonctions de réponse en fréquence (FRF) et des réseaux de neurones (NN). L'analyse en composantes principales (PCA) est effectuée sur les FRF mesurés pour la réduction de la dimensionnalité, puis les données FRF compressées par PCA sont utilisées comme entrées dans les NN pour l'identification des dommages. Les résultats obtenus en utilisant le NN formé sont très précis dans la plupart des cas de l'ensemble de données de test.

Mots clés

Ponts, dommages, capteurs, intelligence artificielle, réseaux de neurones,

Table des matières

| | |
|--|----|
| Liste des tableaux..... | |
| Liste des figures..... | |
| Introduction générale..... | 12 |
| Chapitre I Synthèse bibliographique | 15 |
| I.1 Introduction..... | 16 |
| I.2 Surveillance des structures..... | 17 |
| I.3 Méthodes utilisées dans la SHM | 17 |
| I.3.1 La surveillance globale des structures :..... | 18 |
| I.3.1.1 Méthode basée sur les réponses fréquentielles :..... | 18 |
| I.3.1.2 Méthode basée sur l'indicateur MAC :..... | 20 |
| I.3.1.3 Méthode basée sur le changement de rigidité (matrice de flexibilité) :..... | 21 |
| I.3.1.4 Méthode cross-corrélation basée sur la transmissibilité :..... | 21 |
| I.3.1.5 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle :..... | 23 |
| I.3.2 La surveillance locale des structures :..... | 24 |
| I.4 Outils utilisés dans la SHM | 24 |
| I.4.1 Les accéléromètres :..... | 25 |
| I.4.2 Les jauges de contrainte..... | 25 |
| I.4.3 Les capteurs de déplacement..... | 26 |
| I.4.4 Capteurs d'émission acoustique..... | 26 |
| I.4.5 Capteurs à fibre optique..... | 26 |
| I.5 Essai dynamique | 27 |
| I.5.1 Essais dynamique sous excitations ambiantes :..... | 28 |
| I.6 Application de la SHM aux ponts..... | 29 |
| I.7 Conclusion | 30 |
| Chapitre II Optimisation du nombre et des emplacements des capteurs | 31 |
| II.1 Introduction :..... | 32 |
| II.2 Présentation de l'ouvrage et de sa modélisation..... | 33 |
| II.2.1 Le pont de Oued Dib, MILA | 33 |
| II.2.2 Modélisation du pont :..... | 34 |
| II.3 Hypothèses de travail..... | 38 |
| II.4 Application d'un algorithme génétique pour l'optimisation des capteurs | 39 |
| II.4.1 Définition d'un algorithme génétique (AG) :..... | 40 |
| II.4.2 Réduction du nombre des positions candidates :..... | 41 |
| II.4.3 Conception de l'algorithme génétique :..... | 44 |
| II.4.4 Résultats et interprétations..... | 48 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| II.5 | Conclusion | 51 |
| Chapitre III | Simulation d'une surveillance vibratoire basée sur les fonctions de réponses fréquentielles (FRF) | 52 |
| III.1 | Introduction : | 53 |
| III.2 | Simulation des dommages dans la structure | 54 |
| III.2.1 | Type de dommage | 54 |
| III.2.2 | Choix des zones d'endommagement | 54 |
| III.2.2.1 | Zone A : Mi-travée centrale : | 56 |
| III.2.2.2 | Zone B : Mi-travée de rive | 58 |
| III.2.2.3 | Zone C : Encastrement du tablier dans la culée : | 59 |
| III.2.2.4 | Zone D : Voisinage du pylône : | 60 |
| III.2.2.5 | Zone E : Ancrages des câbles : | 61 |
| III.2.2.6 | Zone F : L'âme du tablier au voisinage du pylône : | 61 |
| III.2.3 | Choix des degrés d'endommagement : | 62 |
| III.3 | Simulation d'une excitation ambiante | 63 |
| III.4 | Acquisition du signal de sortie | 65 |
| III.5 | Traitement des données | 66 |
| III.5.1 | Introduction du bruit | 66 |
| III.5.1.1 | Définition d'un bruit gaussien | 66 |
| III.5.2 | Analyse spectrale | 69 |
| III.5.3 | Analyse en composantes principales (ACP) | 70 |
| III.5.3.1 | Définition | 70 |
| III.5.3.2 | Application de l'ACP | 70 |
| III.6 | Conclusion | 72 |
| Chapitre IV | Identification des dommages par la méthode des réseaux de neurones artificiels | 73 |
| IV.1 | Introduction | 74 |
| IV.2 | Généralités sur les réseaux de neurones | 75 |
| IV.2.1 | Définition | 75 |
| IV.2.2 | Principe de fonctionnement | 75 |
| IV.3 | Conception du réseau | 80 |
| IV.4 | Apprentissage du réseau | 83 |
| IV.5 | Résultats et interprétations | 84 |
| IV.5.1 | Résultats de l'estimation du degré d'endommagement | 84 |
| IV.5.2 | Résultats de la détection de l'emplacement de l'endommagement | 89 |
| IV.6 | Test de la méthode sur de nouveaux cas de dommage | 92 |
| IV.7 | Conclusion: | 97 |

| | |
|--|------------|
| Conclusion et perspectives..... | 98 |
| Références bibliographiques | 100 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1- Propriétés des matériaux du tablier [26] | 35 |
| Tableau 2 – propriétés des matériaux des pylônes [26] | 36 |
| Tableau 3 - Sections et distances d'ancrages des haubans [26] | 37 |
| Tableau 4 - Caractéristiques mécaniques des haubans [26] | 38 |
| Tableau 5 - Rigidité associée à chaque degré d'endommagement..... | 63 |
| Tableau 6 - Exemples de fonctions d'activations [8]..... | 79 |
| Tableau 7 – Quelques paramètres statistiques utiles de l'erreur | 87 |
| Tableau 8 – Tableau représentant les pourcentages de précisions..... | 90 |
| Tableau 9 - Quelques paramètres statistiques utiles sur l'erreur de prédiction de la rigidité | 93 |
| Tableau 10 - tableau représentant les pourcentages de précisions | 95 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 - contexte de la SHM [3]..... | 17 |
| Figure 2 - schéma d'un réseau de neurones. [10]..... | 24 |
| Figure 3 - schéma récapitulatif des stratégies de la surveillance des structures (SHM) en génie civil [4] | 27 |
| Figure 4 – image satellite du pont de Oued Dib [25] | 33 |
| Figure 5 le pont de oued Dib à Mila [25]..... | 34 |
| Figure 6 – Vue de gauche du pont [26] | 35 |
| Figure 7 – Modèle 3D du pont (CSI bridge) [26]..... | 35 |
| Figure 8 - schéma général d'un algorithme génétique [28] | 41 |
| Figure 9 - Emplacements candidats après la première étape de réduction | 42 |
| Figure 10 - Positions candidates suivant l'axe x (longitudinal)..... | 43 |
| Figure 11 - Positions candidates suivant l'axe Y (transversal)..... | 43 |
| Figure 12 - Positions candidates suivant l'axe Z (vertical)..... | 43 |
| Figure 13- : Diagramme circulaire représentant la probabilité de sélection de chaque individu selon son rang..... | 47 |
| Figure 14 - Evolution du nombre de capteur du meilleur individu au cours des générations..... | 49 |
| Figure 15 - Evolution de la qualité du meilleur individu au cours des générations | 49 |
| Figure 16 - Position des capteurs suivant l'axe 'x' | 50 |
| Figure 17 - positions des capteurs suivant l'axe 'y' | 50 |
| Figure 18 - position des capteurs suivant l'axe 'z' | 51 |
| Figure 19 – Tablier du pont étudié | 54 |
| Figure 20 - Contrainte de cisaillement sur le tablier du pont soumis à son poids propre | 55 |
| Figure 21 - Contrainte de traction sur le tablier du pont soumis à son poids propre, vue de dessous | 56 |
| Figure 22 - Contrainte de traction sur le tablier du pont soumis à son poids propre, vue de dessus .. | 56 |
| Figure 23 - Zone A dans son intégralité..... | 57 |
| Figure 24 - Subdivisions de la zone A | 57 |
| Figure 25 – La zone B dans son intégralité | 58 |
| Figure 26 – Subdivisions de la zone B..... | 58 |
| Figure 27 – La zone C dans son intégralité | 59 |
| Figure 28 – Subdivisions de la zone C..... | 59 |
| Figure 29 – La zone D dans son intégralité..... | 60 |
| Figure 30 – Subdivisions de la zone D | 60 |
| Figure 31 – Zone E | 61 |

| | |
|--|----|
| Figure 32 – Zone F | 62 |
| Figure 33 – Spectre ciblé | 64 |
| Figure 34 – La forme de l’enveloppe | 64 |
| Figure 35 – les 200 premières secondes des accélérogrammes générés | 65 |
| Figure 36 - Exemples d'accélération subie par quelques points de mesure | 66 |
| Figure 37 - Exemple de loi gaussienne [8]..... | 67 |
| Figure 38 – Signal non bruité (original) | 68 |
| Figure 39 – Signal bruité..... | 68 |
| Figure 40 – Zoom sur un signal bruité trois fois | 69 |
| Figure 41 - Exemples de transformations du domaine temporel au domaine fréquentiel | 69 |
| Figure 42 - Erreur relative en fonction du nombre d’axes principaux considérés | 71 |
| Figure 43 - schéma représentant un neurone artificiel [30] | 77 |
| Figure 44 - Exemple de réseaux de neurones [31]..... | 78 |
| Figure 45 - Schéma du réseau adopté..... | 81 |
| Figure 46 – Schéma représentatif des inputs de l’algorithme | 82 |
| Figure 47 - Sous ensemble de la base de données initiales | 83 |
| Figure 48 - Courbe montrant l'évolution de la précision sur les données d'apprentissage et les données de validation en fonction des itérations..... | 84 |
| Figure 49 - Histogramme montrant l'erreur de l'estimation de la rigidité sur les données d'apprentissage | 85 |
| Figure 50 - Histogramme montrant l'erreur de l'estimation de la rigidité sur les données de test | 86 |
| Figure 51 - Histogramme montrant l'erreur de l'estimation de la rigidité sur les données de validation | 86 |
| Figure 52 - Courbe de régression de l’estimation de la rigidité sur données d'apprentissage..... | 87 |
| Figure 53 - Courbe de régression de l’estimation de la rigidité sur données de test | 88 |
| Figure 54 - Courbe de régression de l’estimation de la rigidité sur données de validation..... | 88 |
| Figure 55 – Précision sur les données d’apprentissage..... | 90 |
| Figure 56 – Précision sur les données test | 90 |
| Figure 57 – Précision sur les données de validation | 91 |
| Figure 58 - Histogramme montrant l'erreur de l'estimation de la rigidité sur les données avec bruits..... | 92 |
| Figure 59 - Histogramme montrant l'erreur de l'estimation de la rigidité sur les données sans bruits..... | 93 |
| Figure 60 - Courbe de régression de l’estimation de la rigidité sur données sans bruits | 94 |
| Figure 61 - Courbe de régression de l’estimation de la rigidité sur données avec bruits..... | 94 |
| Figure 62 – Précision sur les données sans bruits..... | 95 |
| Figure 63 – Précision sur les données avec bruits..... | 95 |

Introduction générale

L'étude de conception de grands ouvrages comme les ponts à haubans peut s'avérer laborieuse, la construction de ce genre d'ouvrage est également coûteuse et très complexe. Economiquement et stratégiquement, l'apport d'un pont est d'une importance primordiale c'est pourquoi l'entretien et la préservation de ce genre de construction est très importante. Ceci est justement l'enjeu de la SHM (structure health monitoring) qui consiste à surveiller de manière constante ces ouvrages afin de prolonger leur durée de vie.

Problématique

Les ponts sont soumis à des charges importantes (charges d'exploitation, vent, séismes et charges accidentelles...etc). Ces charges peuvent dégrader la structure de manière progressive, jusqu'à la ruine. Si on ne met pas des dispositifs capables de détecter les dommages afin de les réparer à temps, cela risque de provoquer des catastrophes autant sur le plan économique que sur le plan humain. Cela dit, une surveillance continue de la structure est essentielle afin d'éviter cela.

Objectif

L'objectif de cette étude est de mettre en œuvre les méthodes de la SHM afin d'élaborer un processus de surveillance de l'état de santé du pont de Oued Dib à Mila et ce à l'aide de l'outil informatique. Le but final étant de parvenir à détecter les dommages, leurs intensités et leurs emplacements à l'aide du signal vibratoire de la structure.

Organisation de la thèse

Ce travail commence par une introduction générale suivie de quatre chapitres.

Le premier chapitre consiste à une synthèse bibliographique sur la SHM, ses méthodes, ses outils et son application aux ponts.

Le deuxième chapitre porte sur l'optimisation des capteurs, et leurs emplacements à l'aide des algorithmes génétiques.

Le troisième chapitre porte sur la simulation du signal vibratoire du pont essentiellement à l'aide du logiciel SAP2000.

Introduction générale

Le dernier chapitre consiste à l'élaboration d'un réseau de neurones qui permettra la localisation des dommages.

Enfin, ce travail sera achevé par une conclusion.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1 Introduction

Les structures de Génie Civil sont confrontées pendant leur durée de vie à différentes charges susceptibles de provoquer leur dégradation ou leur ruine telles que les catastrophes naturelles ou les conditions d'exploitation. Dans le but de prolonger leur durée de vie, d'anticiper leurs défaillances, de renforcer leurs performances, et de garantir la pérennité des biens et la sécurité des personnes, la surveillance en temps réel ou à intervalles réguliers de l'intégrité des structures est devenue essentielle. Pour ces raisons, la surveillance de la santé des structures (SHM) a attiré beaucoup d'attention et a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche au cours des dernières décennies.

Avant, le suivi de l'intégrité des structures a été largement basé sur des inspections visuelles, effectuées par des techniciens qualifiés, ou réalisés à l'aide de moyens de surveillance d'une façon ponctuelle. Ces moyens de surveillance n'offrent généralement qu'une vision limitée et partielle de l'état de dégradation des ouvrages et permettent difficilement d'apprécier le système dans son intégralité.

Au cours des dernières années, les avancées technologiques dans le Génie Civil et dans les disciplines connexes ont favorisé l'émergence de la surveillance continue comme outil d'aide à la gestion des infrastructures civiles. Bien que relativement limitée, la surveillance en continue des structures intéresse de plus en plus les organismes gestionnaires. [1]

1.2 Surveillance des structures

L'approche SHM est à la fois un ensemble de procédés et une stratégie de contrôle. Elle consiste à surveiller en continu ou à intervalles réguliers l'intégrité d'une structure en détectant les fissures ou les altérations, comme un délaminage de matériaux composites. Les solutions proposées intègrent généralement des réseaux de capteurs. [2]

Les questions à poser en SHM sont : [3]

- Détection : la structure est-elle endommagée ?
- Localisation : où sont les dégâts ?
- Quantification : quelle est l'étendue des dommages ?
- Prédiction de vie restante

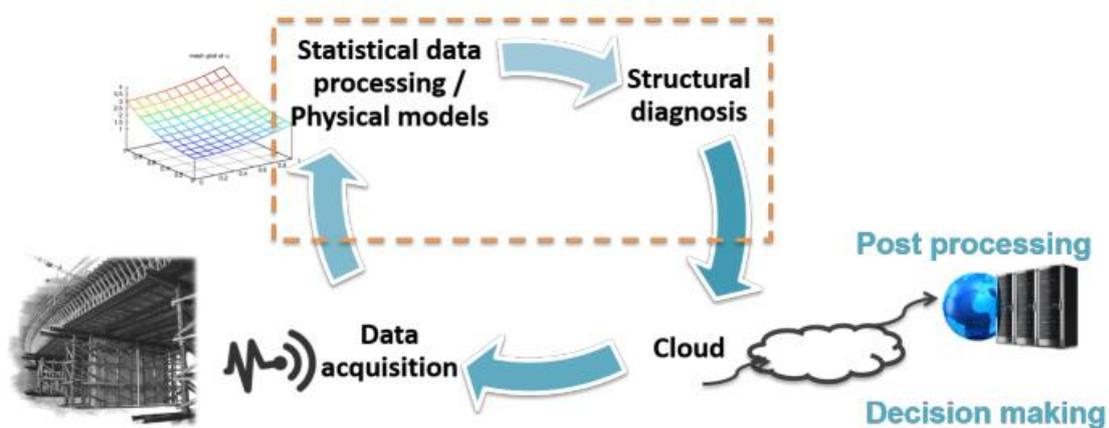


Figure 1 - contexte de la SHM [3]

1.3 Méthodes utilisées dans la SHM

Les stratégies de SHM peuvent être largement classées en deux groupes : global et local. Ces deux types de stratégies donnent différents types d'informations et sont la base de différentes analyses. [4]

1.3.1 La surveillance globale des structures :

Le concept de base de la surveillance globale des structures est que l'existence d'un endommagement changera forcément la rigidité, la masse ou les propriétés d'amortissement de la structure et ainsi altérera ses propriétés dynamiques globales. L'avantage principal de ce type de méthode est qu'il n'est pas nécessaire de connaître l'emplacement de l'endommagement avant l'installation du système, ce qui est souvent impossible à déterminer pour les structures complexes. Les méthodes de surveillance globale peuvent être basées sur différentes propriétés modales d'une structure. [5]

Il existe plusieurs méthodes essentiellement pour la SHM globale basées sur différentes approches, qui peuvent être combinées donnant des méthodes hybrides efficaces afin de déterminer les dommages éventuels d'une structure et leurs emplacements. Citons :

- La méthode basée sur les réponses fréquentielles
- La méthode basée sur l'indicateur MAC (Modal Assurance Criterion)
- Méthode basée sur le changement de rigidité
- Méthode cross- corrélation basée sur la transmissibilité
- Méthode basée sur l'intelligence artificielle

1.3.1.1 Méthode basée sur les réponses fréquentielles :

Les fonctions des réponses fréquentielles (FRF) d'une structure sont obtenues par la décomposition d'accélérogrammes. La signature vibratoire (FRF) d'une structure étant un indicateur sensible à l'intégrité de la structure peut être utilisée dans la détection des dommages et leurs emplacements. [6]

La mesure des FRF donne des données brutes très importantes, très difficile à interpréter. Compacter ces données peut être difficile en raison de : La densité modale importante, l'amortissement et les effets non linéaires. N'importe quelle réduction hasardeuse de ces données peut aboutir à une perte d'importantes informations.

C'est pourquoi il est préférable de passer par une analyse des composantes principales.

L'analyse en composantes principales (ACP), ou principal component analysis (PCA) en anglais, permet d'analyser et de visualiser une base de données contenant des individus décrits par plusieurs variables quantitatives. C'est une méthode statistique qui permet d'explorer des données dites multivariées (données avec plusieurs variables). Chaque variable pourrait être

considérée comme une dimension différente. Si vous avez plus de 3 variables dans votre jeu de données, il pourrait être très difficile de visualiser les données dans un “hyper-espace” multidimensionnelle. L’analyse en composantes principales est utilisée pour extraire et de visualiser les informations importantes contenues dans une table de données multivariées. L’ACP synthétise cette information en seulement quelques nouvelles variables appelées composantes principales. Ces nouvelles variables correspondent à une combinaison linéaire des variables originels. Le nombre de composantes principales est inférieur ou égal au nombre de variables d’origine. L’information contenue dans un jeu de données correspond à la variance ou l’inertie totale qu’il contient. L’objectif de l’ACP est d’identifier les directions (i.e., axes principaux ou composantes principales) le long desquelles la variation des données est maximale. En d’autres termes, l’ACP réduit les dimensions d’une donnée multivariée à deux ou trois composantes principales, qui peuvent être visualisées graphiquement, en perdant le moins possible d’information. [7]

L’analyse en composantes principales (ACP ou PCA en anglais pour principal component analysis) est une méthode de la famille de l’analyse des données et plus généralement de la statistique multivariée, qui consiste à transformer des variables liées entre elles (dites « corrélées » en statistique) en nouvelles variables décorrélées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées « composantes principales », ou axes principaux. Elle permet au praticien de réduire le nombre de variables et de rendre l’information moins redondante. [8]

Il s’agit d’une approche à la fois géométrique (les variables étant représentées dans un nouvel espace, selon des directions d’inertie maximale) et statistique (la recherche portant sur des axes indépendants expliquant au mieux la variabilité / la variance des données). Lorsqu’on veut compresser un ensemble de N variables aléatoires, les n premiers axes de l’analyse en composantes principales sont un meilleur choix, du point de vue de l’inertie ou de la variance.

L’outil mathématique est appliqué dans d’autres domaines que les statistiques et est parfois appelé décomposition orthogonale aux valeurs propres ou POD (anglais : proper orthogonal decomposition). [9]

L'ACP est donc une technique de compression des données qui peut servir à compresser les données des FRF afin de mieux les interpréter. [10]

1.3.1.2 Méthode basée sur l'indicateur MAC :

Le coefficient MAC (Modal Assurance Criterion) est un indicateur statistique qui permet en SHM de déterminer les dommages d'une structure en évaluant la corrélation entre les modes propres de la structure saine et ceux de la structure endommagée.

Plus il tend vers 1, plus le risque de présence de dommage est petit. Et plus il tend vers 0 plus le risque d'endommagement est grand.

$$MAC = \frac{(\phi_S^T \phi_D)^2}{(\phi_S^T \phi_S)(\phi_D^T \phi_D)}$$

Avec ϕ_S vecteur propre de la structure saine et ϕ_D vecteur propre de la structure endommagée.

Cette méthode permet également d'indiquer le degré de corrélation entre les modes propres d'un système et donc de donner la possibilité de déterminer les points où il faut placer des capteurs afin de s'assurer que les produits intérieurs entre les vecteurs de forme ont des cosinus relativement petits. C'est aussi l'un des outils les plus utilisés pour la comparaison quantitative des vecteurs modaux.

$$MAC = \frac{(\phi_i^T \phi_j)^2}{(\phi_i^T \phi_i)(\phi_j^T \phi_j)}$$

Les éléments dans la matrice MAC sont inclut entre 0 et 1.

0 → Pas (ou peu) de corrélation entre les éléments hors diagonale

1 → grand degré de similitude entre les modes (presque impossible à distinguer)

[11]

Il est utile également pour :

- Mesurer les formes modales à partir des vecteurs déterminés par un modèle analytique.
- Estimations du même vecteur modal de test obtenues à partir de différents emplacements d'excitation.
- Estimations du même vecteur modal obtenues à partir de différents processus d'identification des paramètres modaux en utilisant le même test des données.
- Une forme de mode de test avant et après un changement de structure physique provoqué par une modification souhaitée. [12]

1.3.1.3 Méthode basée sur le changement de rigidité (matrice de flexibilité) :

Le principe de cette méthode est simple. Sachant que tout endommagement de structure induit une diminution de la rigidité de celle-ci, on peut employer cette méthode qui consiste à comparer les deux matrices de flexibilité de la structure saine et endommagée.

$$F_0 = \sum_{K=1}^N \frac{1}{w_{0,K}^2} \phi_{0,K} \phi_{0,K}^T$$

$$F_d = \sum_{K=1}^N \frac{1}{w_{d,K}^2} \phi_{d,K} \phi_{d,K}^T$$

Trouver l'emplacement de l'endommagement consiste à calculer les max des colonnes de ΔF . [13]

$$|\Delta F| = |F_0 - F_d|$$

En sachant que F_0 est la matrice de flexibilité de la structure saine et F_d la matrice de flexibilité de la structure endommagée. ΔF représente donc la variation de la flexibilité.

1.3.1.4 Méthode cross-corrélation basée sur la transmissibilité :

En considérant un système structurel élastique vibré, la transmissibilité peut être extraite directement de la réponse vibratoire sans tenir compte de l'excitation. Comme la transmissibilité détient une corrélation sensible avec les caractéristiques structurelles, c'est-à-dire les dommages, des indicateurs sensibles aux dommages peuvent être définis en utilisant la transmissibilité structurelle.

La transmissibilité d'un système élastique pour une force harmonique appliquée est la suivante :

$$T_{(i,p)}(\omega) = \frac{X_i(\omega)}{X_p(\omega)}$$

Où X_i and X_p sont les amplitudes complexes des réponses du système $x_i(t)$ and $x_p(t)$.

On peut aussi exprimer la transmissibilité en (FRF)

$$T_{(i,p)}(\omega) = \frac{X_i(\omega)/F_b(\omega)}{X_p(\omega)/F_b(\omega)} = \frac{H_{i,b}(\omega)}{H_{p,b}(\omega)}$$

Où b est le point d'excitation et H représente la FRF.

La méthode consiste à évaluer la corrélation entre la transmissibilité de base et celle obtenue sous les conditions de test.

$$cor(Y, Z) = \frac{cov(Y, Z)}{\sigma_Y \sigma_Z}$$

$$CDI(T^d, T^u) = abs\left(\frac{cov(T^d, T^u)}{\sigma_{T^d} \sigma_{T^u}}\right) = abs\left(\frac{\sum_{t=1}^n (T_t^d - \bar{T}^d)(T_t^u - \bar{T}^u)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (T_t^d - \bar{T}^d)^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (T_t^u - \bar{T}^u)^2}}\right)$$

Où CDI est the Correlation-based Damage Indicator, T^d et T^u sont respectivement la transmissibilité de la structure endommagée et celle de la structure saine. $CDI \in [0, 1]$, et quand CDI approche '1', cela veut dire qu'il n'y a pas de dommages ; si CDI approche '0', cela signifie qu'il y a un endommagement.

On peut aussi y appliquer le critère MAC pour faire l'identification :

$$TAC = \frac{((T^d)^T (T^u))^2}{((T^d)^T (T^d))((T^u)^T (T^u))}$$

[14]

1.3.1.5 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle :

Avec l'avancée des technologies, des algorithmes de l'intelligence artificielle sont employés dans la détection des dommages des structures. Ils permettent l'identification des dommages car ces algorithmes peuvent résoudre de manière optimale des problèmes complexes.

Le réseau de neurones est un algorithme qui permet de trouver des relations pour des problèmes non linéaire comme ceux qu'on peut rencontrer dans la SHM.

C'est un système composé de plusieurs éléments de calcul simples fonctionnant en parallèle et dont la fonction est déterminée par la structure du réseau, les poids des connexions, et le traitement effectué sur les éléments de calcul ou nœuds. [15]

Propriétés des réseaux de neurones

- Beaucoup d'unités semblables aux neurones ; commutations basées sur des seuils
- Beaucoup d'interconnexions pondérées entre les unités.
- Processus distribué hautement parallèle.
- L'accent est mis sur le réglage automatique des poids. [15]

Les réseaux de neurones artificiels fournissent une cartographie paramétrisée non linéaire générale entre un ensemble d'entrées et un ensemble de sorties. Un réseau avec trois couches de poids et des fonctions d'activation sigmoïdales peut approximer toute cartographie fluide et un tel type sera également utilisé ici. Un réseau neuronal multicouche à rétroaction supervisée typique, connu sous le nom de réseau neuronal BP, est illustré schématiquement sur la figure 2. [10]

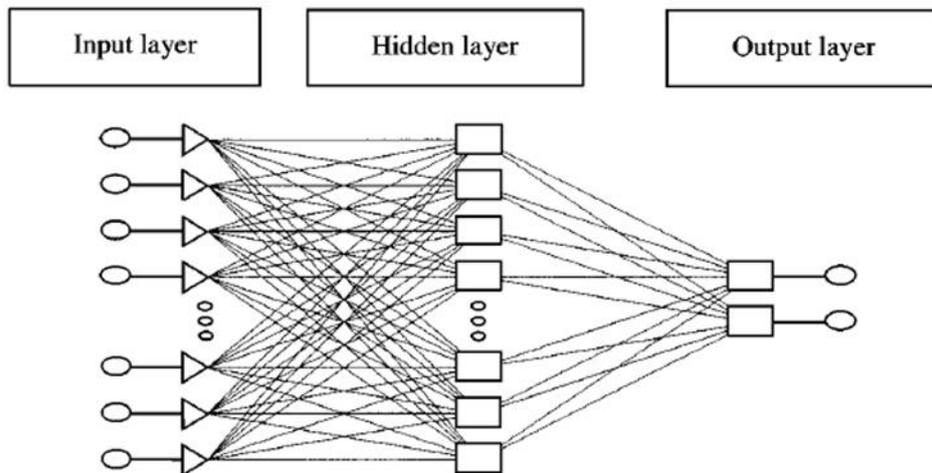


Figure 2 - schéma d'un réseau de neurones. [10]

1.3.2 La surveillance locale des structures :

Une fois que l'emplacement de l'endommagement potentiel est déterminé par les méthodes de la surveillance globale, ou si les zones critiques sont initialement connues, des méthodes locales de surveillance de structures sont effectuées pour évaluer l'étendue des dommages et suivre toute progression des dommages. Il existe de nombreuses techniques pour effectuer la détection et l'évaluation locales des dommages, mais elles sont toutes centrées sur quelques concepts de base [5]. Citons la méthode visuelle qui consiste simplement dans l'inspection de la structure par des ingénieurs ou des techniciens expérimentés essayant ainsi de détecter des anomalies (fissures, corrosions...etc) . Les inspections visuelles prennent énormément de temps et leurs résultats sont très influencés par la subjectivité de la personne qui inspecte la structure. Il y a aussi des méthodes qui impliquent l'observation et l'évaluation des déplacements des matériaux sur les points faibles préalablement estimés avec la surveillance globale ou encore sur les points les plus chargés de la structure.

1.4 Outils utilisés dans la SHM

Toutes les méthodes de surveillance de la santé structurelle globale connues nécessitent des valeurs de données de la structure afin d'effectuer une analyse et de déterminer si des dommages se sont produits ou si des dommages sont probables. Bien que quelques-unes des méthodes présentées ne nécessitent que des données d'inspection visuelle ou manuelle, ce type de données est fastidieux et coûteux à obtenir. En raison de ce problème, la plupart des

recherches dans le domaine de la surveillance de la santé structurelle sont axées sur l'utilisation de systèmes de capteurs pour recueillir les informations nécessaires à l'analyse. [5]

Les approches de la surveillance globale des structures impliquent le déploiement d'un ensemble de capteurs pouvant inclure des accéléromètres, des inclinomètres et des appareils de mesure de déformation sur site. Ces capteurs peuvent être déployés de façon permanente ou déplacés sur et hors site chaque fois qu'un nouvel ensemble de données est requis. [16]

1.4.1 Les accéléromètres :

Les accéléromètres mesurent l'accélération que connaît un emplacement particulier d'une structure due à la gravité ou à des charges appliquées. Des versions différentes d'accéléromètres ont été utilisées comme appareil de mesure pendant plusieurs années car les données d'accélération peuvent fournir des informations de valeur concernant les caractéristiques dynamique d'une structure. Grâce aux procédures de post-traitement, les mesures d'accélération peuvent être utilisées pour calculer la fréquence, l'amortissement et les formes modales d'une structure. Comme cité précédemment, ces propriétés vibratoires sont utiles dans les méthodes de surveillance de la santé globale. [5] On distingue quatre types d'accéléromètres :

- **Accéléromètres piézoélectriques**
- **Accéléromètres piézorésistifs**
- **Accéléromètres de capacité**
- **Servo- accéléromètre**

1.4.2 Les jauges de contrainte

Les jauges de contrainte sont couramment utilisées dans la pratique de la surveillance de la santé structurelle pour un certain nombre de raisons. Le plus grand avantage de ces capteurs est qu'ils sont peu coûteux et faciles à installer. Bien que les jauges ne peuvent mesurer la déformation d'une structure qu'à un seul endroit, les informations obtenues à partir de ces capteurs peuvent être utilisés en combinaison avec un modèle d'éléments finis pour aider à détecter les dommages. L'utilisation de jauges de contrainte dans ce type de méthode repose sur le principe que les dommages à un emplacement critique entraîneront un changement dans le chemin de charge et donc une différence détectable dans la distribution des

contraintes. Il existe des jauges de contraintes résistives et des jauges de contraintes à fil vibrant. [5]

1.4.3 Les capteurs de déplacement

Le déplacement est un autre paramètre de mesure qui présente souvent un intérêt dans la pratique de Surveillance de la santé des structures. La surveillance des déplacements est couramment utilisée pour évaluer les emplacements critiques, par exemple les joints de dilatation ou sur la longueur d'un câble de suspension dans un pont. Il en existe plusieurs sortes dont : les potentiomètres linéaires et les transformateurs différentiels variables linéaires. [5]

1.4.4 Capteurs d'émission acoustique

Le type de capteur d'émission acoustique le plus courant utilise des matériaux piézoélectriques similaires à ceux d'un accéléromètre piézoélectrique. Ce type de capteur s'est avéré plus durable et sensible que d'autres capteurs dont les techniques sont basées sur la capacité ou l'optique laser. Les meilleurs avantages des capteurs d'émission acoustique sont leur capacité de détecter les dommages lorsqu'ils surviennent et le fait que les dommages ne sont pas forcément à l'emplacement du capteur pour qu'ils soient détectés. L'acier est le meilleur matériau pour l'utilisation de capteurs d'émission. [5]

1.4.5 Capteurs à fibre optique

Les capteurs à fibre optique sont une technologie relativement nouvelle qui a de nombreuses applications prometteuses. Les bases le fonctionnement de ces capteurs implique l'envoi de faisceaux lumineux sur un câble à fibres optiques à intervalles réguliers et mesure les changements qui se produisent lorsque cette lumière est réfléchi. Quatre principes différents sont couramment utilisés pour interpréter ces changements dans les signaux lumineux : interférométrie, polarisation, spectroscopie et intensité lumineuse. Le principal inconvénient de l'utilisation de capteurs à fibre optique provient de leur coût élevé qui est un obstacle majeur dans leur processus d'utilisation. D'autres recherches et développements sont constamment menés dans le domaine des capteurs à fibre optique pour la surveillance de la santé des structures afin de découvrir de nouvelles applications. [5]

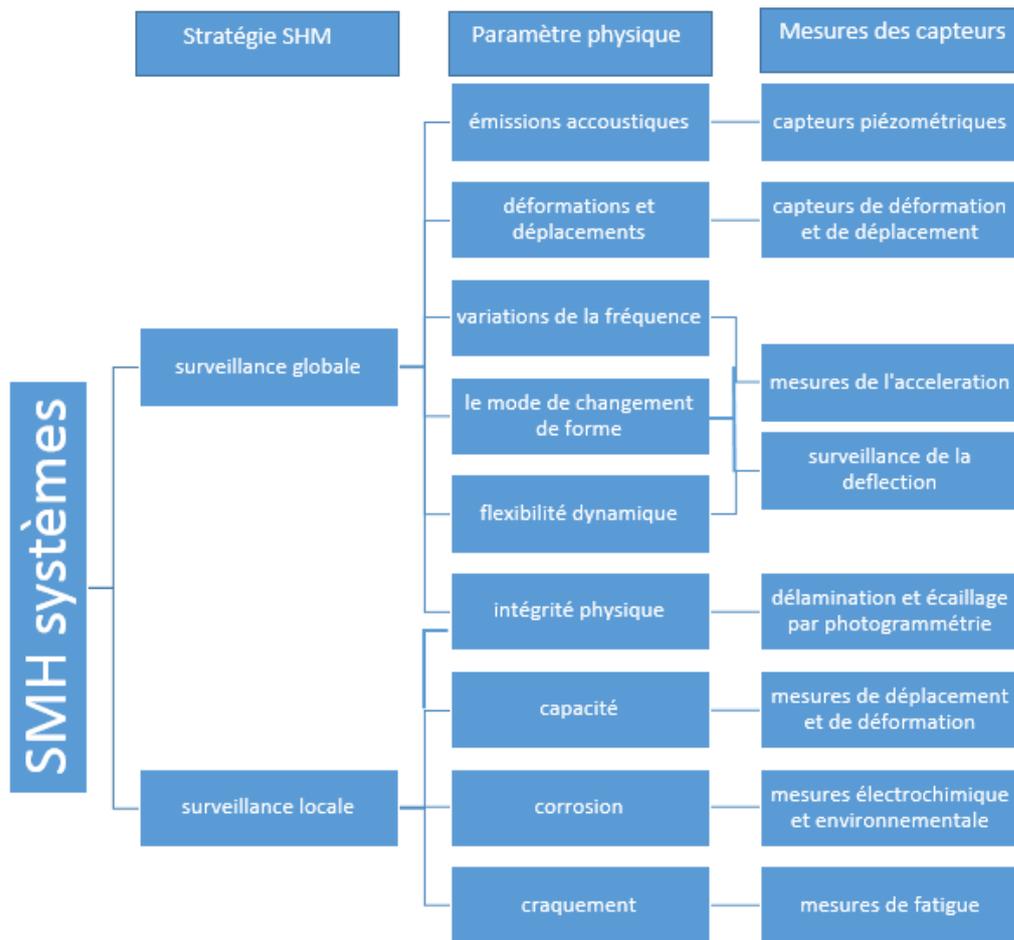


Figure 3 - schéma récapitulatif des stratégies de la surveillance des structures (SHM) en génie civil [4]

1.5 Essai dynamique

Les essais dynamiques se basent essentiellement sur les capteurs dont on a parlé dans la section précédente. Ils visent à effectuer des mesures de grandeurs physiques comme des accélérations, des déplacements, des vitesses, des déformations variant rapidement au cours du temps afin d'évaluer l'état de santé d'un ouvrage ou d'une partie d'ouvrage. Ils servent à :

- vérifier la performance structurale en phase de construction, de réception, ou de service ;
- apprécier l'aptitude au service (comportement structural, confort, etc.) ;
- détecter des endommagements ;

– déterminer les caractéristiques vibratoires pour calibrer un modèle numérique. Le type d'essais dynamiques à mettre en œuvre dépend fortement des objectifs recherchés. [17]

Les essais dynamiques dans le Génie Civil peuvent se faire in situ ou en laboratoire à l'aide de tables vibrantes et d'autres dispositifs. Dans le domaine de la SHM on surveille des structure déjà existantes c'est pourquoi on s'intéresse aux essais dynamique in situ, il en existe trois sortes qui sont différenciées par la manière dont la structure est excitée :

- Excitation périodique :

Dans ce cas, une force harmonique est appliquée au moyen d'un actionneur. Ce dernier peut être hydraulique, électro-mécanique, mécanique – comme exciteur à masse excentrée – ou simplement un pendule inversé attaché au tablier de l'ouvrage.

- Excitation à large bande :

Des actionneurs hydrauliques ou électro-mécaniques sont utilisés afin d'exciter la structure sur une bande de fréquences assez large. Les signaux d'excitation peuvent être des bruits blancs ou des signaux multi-harmoniques. De même que pour l'excitation périodique, ce type d'excitation est défini par l'expérimentateur et est donc contrôlable.

- Excitation ambiante.

Dans ce dernier cas, l'excitation assurant la mise en vibration de l'ouvrage provient du trafic ou du vent. Cette excitation ne peut ni être contrôlée ni être mesurée avec confiance. Elle reste donc le plus souvent indéterminée ou connue au travers de quelques statistiques. [18]

I.5.1 Essais dynamique sous excitations ambiantes :

Le recours à des essais sous excitation ambiante est aujourd'hui de plus en plus populaire parce qu'ils permettent de replacer la structure dans ses conditions de service. L'augmentation des capacités des systèmes d'acquisition et de stockage de données ont également largement favorisé le développement de ces essais. L'excitation peut être causée par le vent, le trafic de piétons ou de véhicules ou par toute autre charge d'exploitation. Dans ce cas, des méthodes d'identification ne nécessitant pas la mesure de l'excitation doivent être utilisées. [19] Aussi, on y a recours parce que ce choix est plus proche des préoccupations des ingénieurs soucieux d'appréhender le comportement des ouvrages dans leur fonctionnement courant. En effet, l'utilisation de balourds ou d'excitateurs spéciaux, s'ils permettent de mieux

contrôler la source d'excitation, la reproductibilité des essais ainsi que les essais eux-mêmes, peuvent être très contraignants et conduire à fermer l'ouvrage à la circulation. L'étude sous charges d'exploitation contourne ce handicap mais nécessite une instrumentation et une chaîne de traitement appropriées. [20]

Des sources d'excitation possibles, les essais dynamiques sous excitation ambiante sont plus simples à conduire puisque la réponse vibratoire peut être mesurée lorsque l'ouvrage est en service. Les systèmes d'excitation artificiels sont généralement complexes et coûteux. Un désavantage de l'utilisation d'essais sous excitation ambiante réside dans l'erreur qui peut être commise dans l'estimation des amortissements puisque leurs valeurs peuvent dépendre de l'amplitude et donc du niveau d'excitation (inconnu par définition). [20]

L'avantage de cet essai est qu'il n'a pas besoin d'input (excitation par des dispositifs parfois coûteux) mais il donne l'output, permettant de faire l'identification des paramètres nodaux de la structure.

1.6 Application de la SHM aux ponts

Les actions environnementales (vent, température, pluie, tremblement de terre, etc.) et l'utilisation du pont (charges de trafic) peuvent modifier le comportement et provoquer la détérioration des ponts dans leur durée de vie à long terme. Ainsi, la recherche et l'application de la surveillance de la santé des structures sont des exigences inévitables pour le développement durable de l'ingénierie des ponts. Au début des années 1990, des systèmes de surveillance de la santé des structures ont été installés dans d'importants ponts à de grande portée, dans le monde, pour surveiller non seulement des réponses structurelles mais aussi des actions environnementales. De nombreux systèmes de surveillance ont une capacité puissante de mesure, transmission et stockage de données d'identification et de grande capacité. [21]

Beaucoup d'études ont été mené dans le domaine de la surveillance des ponts notamment celle de Erhan Saracoglu et Sten Bergstrand pour un pont en bois à haubans de longue portée [22], celle sur le pont du fleuve de Nanjing Yangtze par une entreprise d'auteurs HUANG Fang-lin, HE Xu-hui, CHEN Zheng-qing et ZENG Chu-hui [23] et également l'étude de Sungkon Kimpour un pont suspendu [24]. On peut en déduire que ce domaine est en plein essor.

Il existe des solutions pratiques pour la surveillance d'un pont, l'utilisation des essais en vibrations ambiantes permet de garder l'ouvrage en service et de ne pas gêner la circulation. Une fois les données obtenues, il existe plusieurs stratégies afin de détecter les dommages comme cité plus haut.

Grace à ces informations, l'ingénieur peut :

- Estimer les charges et leurs effets
- Estimer l'état de fatigue ou tout autre état limite
- Prévoir l'évolution probable de la santé du pont

1.7 Conclusion

Les ponts sont des ouvrages stratégiques qui ont une valeur économique primordiale. Leur durabilité est un facteur économique important. C'est pourquoi la surveillance de ces structures est un enjeu important. La SHM permet de prévoir les dommages et de prolonger la durée de vie de la structure en permettant de détecter les détériorations et ainsi de faire son entretien. Dans le chapitre suivant nous allons parler de notre démarche d'optimisation du nombre et de l'emplacement des capteurs à placer sur la structure à surveiller.

Chapitre II

Optimisation du nombre et des emplacements
des capteurs

II.1 Introduction :

Dans la réalité, une structure à une infinité de degrés de liberté, il est donc impossible de s'imaginer placer une infinité de capteurs et ce pour des raisons pratiques et économiques. C'est pourquoi toute surveillance de santé d'une structure doit être précédée par une étude visant à optimiser le nombre de capteurs utilisés et leurs emplacements afin de récolter des données utiles et suffisantes pour une surveillance assez précise de la structure.

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'ouvrage étudié, le pont de Mila. Puis nous allons aborder sa modélisation et les hypothèses de travail sur lesquels se basera l'étude. Ensuite, une application des algorithmes génétiques afin d'optimiser les emplacements des capteurs pour une surveillance du pont sera faite. Nous finirons par l'interprétation des résultats obtenus.

II.2 Présentation de l'ouvrage et de sa modélisation

II.2.1 Le pont de Oued Dib, MILA

Le pont de oued Dib à Mila est un pont haubané en semi harpe avec un tablier en caisson et des pylônes en béton, sa portée principale est de 280m, sa longueur totale de 502m, et la largeur de son tablier est de 13,3m. [25]

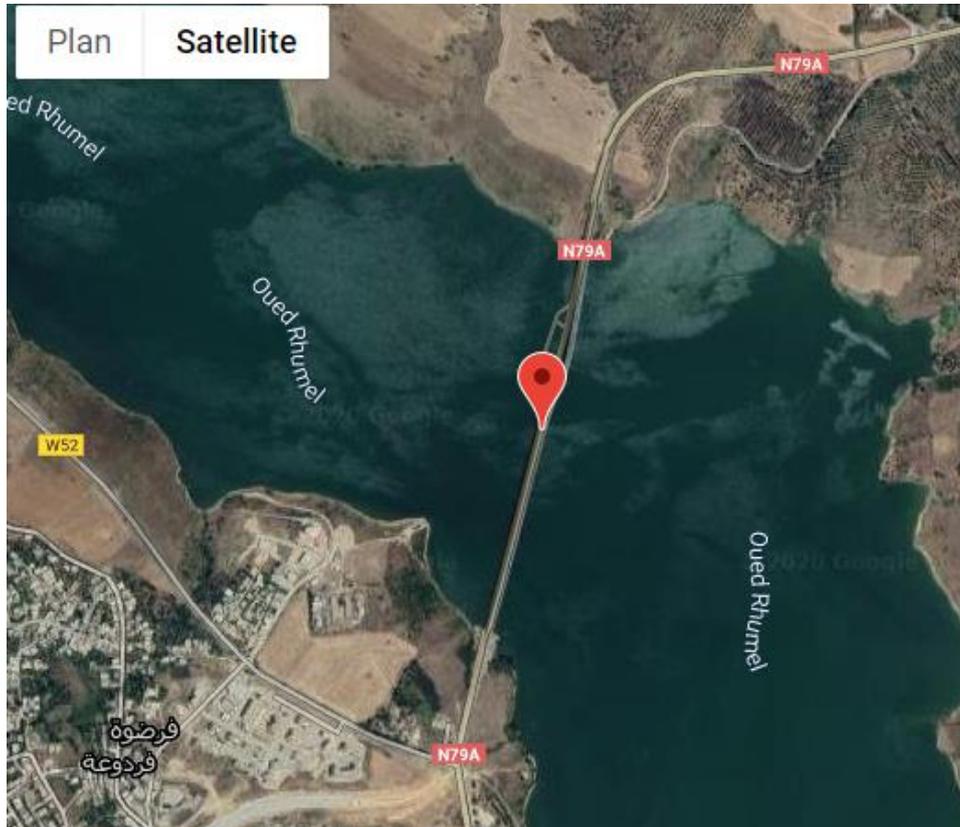


Figure 4 – image satellite du pont de Oued Dib [25]

Le pont à haubans sur l'Oued Dib qui se situe à l'Est algérien est le premier pont de ce type en Algérie, il relie les villes de Mila et Jijel. Il franchit le lac du plus grand barrage d'Algérie : Beni-Haroun.



Figure 5 le pont de oued Dib à Mila [25]

II.2.2 Modélisation du pont :

Modéliser une structure en éléments finis consiste à élaborer un modèle représentatif de la structure réelle afin d'analyser d'une manière approchée et avec un volume de calcul raisonnable le comportement de l'ouvrage sous différentes conditions.

Dans notre cas, le pont a été modélisé à l'aide du logiciel CSI Bridge v20, le modèle représenté dans la Figure II.12 comprend 6079 nœuds, 20 éléments frame, 6384 Area, 1 Câble de précontrainte et 46 éléments Link tel que :

- Le tablier : modélisé par les éléments de type « Shell ».
- Les piles et les mats : modélisés par les éléments de type « Frame ».
- Les haubans : modélisés par les éléments de type « Câble ».
- Les appareils d'appuis : modélisés par les éléments de type « Links ». [26]

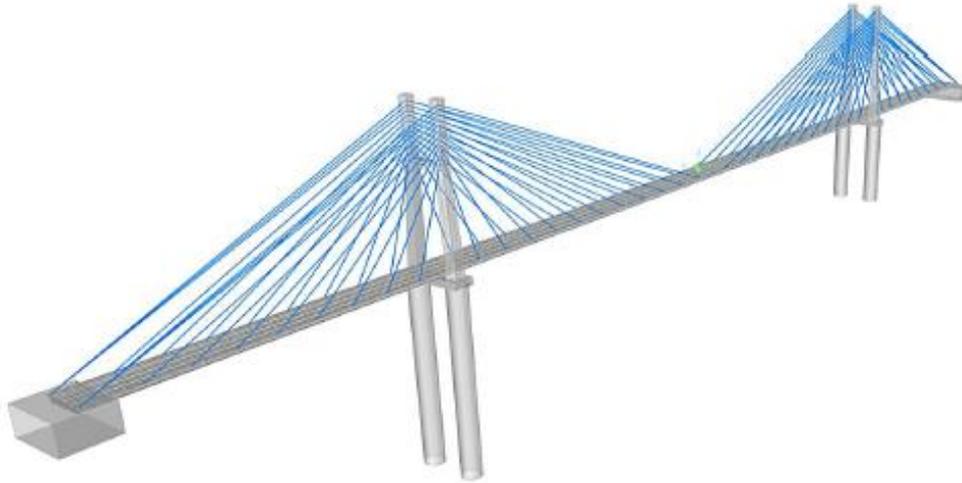


Figure 7 – Modèle 3D du pont (CSI bridge) [26]



Figure 6 – Vue de gauche du pont [26]

- **Le tablier :**

Les propriétés des matériaux du tablier sont :

| | |
|---|----------------------|
| Module d'élasticité du béton précontraint (E) KN/m ² | 39 x 10 ⁶ |
| Coefficient de poisson (ν) | 0.2 |
| Poids volumique (γ) KN/m ³ | 25 |

Tableau 1- Propriétés des matériaux du tablier [26]

- **Les pylônes :**

Les propriétés des matériaux des pylônes (futs + mats) sont :

| | |
|--|----------------------|
| Module d'élasticité du béton précontraint (E) KN/m ² | 39 x 10 ⁶ |
| Coefficient de poisson (ν) | 0.2 |
| Poids volumique (γ) KN/m ³ | 25 |

Tableau 2 – propriétés des matériaux des pylônes [26]

- **La précontrainte :**

La valeur de la force de précontrainte est égale à **129,697 MN**, Nous avons choisis de n'utiliser qu'un seul câble de précontrainte. [26]

- **Les conditions d'appuis :**

- Les deux culées sont encastrées au sol.

- Liaison culée – tablier (Coté Jijel) : Appuis fixe.

- Liaison culée – tablier (Coté Constantine) :

(U_x, U_y, R_z) : bloqués.

(U_z, R_x, R_y) : libres.

- Pieds des pylônes : Encastrés dans le sol.

- Liaison Tablier-Pylônes est assurée par les appareils d'appuis :

(U_x, U_y, U_z) : bloqués.

(R_x, R_y, R_z) : libres. [26]

Où les U_i et R_i sont les degrés de liberté.

- **Les haubans :**

Les câbles du pont ont été modélisés en élément de type câble, avec une rigidité qui dépend seulement du module d'élasticité idéalisé du câble (E_c), de la section transversale (A_{net}) et de la longueur de câble (L). [26]

Le tableau suivant montre les sections transversales des haubans et leurs distances de fixation :

| Numéro de Hauban | Distance ancrage bas (m) | Distance ancrage haut (m) | Aire de la section de hauban (m ²) |
|------------------|--------------------------|---------------------------|--|
| 1 | 132 | 57 | 0.00550 |
| 2 | 120 | 55 | 0.00525 |
| 3 | 108 | 53 | 0.00495 |
| 4 | 96 | 51 | 0.00465 |
| 5 | 84 | 49 | 0.00435 |
| 6 | 72 | 47 | 0.00405 |
| 7 | 60 | 45 | 0.00360 |
| 8 | 48 | 43 | 0.00330 |
| 9 | 36 | 41 | 0.00300 |
| 10 | 24 | 39 | 0.00255 |
| 11 | 12 | 37 | 0.00225 |

Tableau 3 - Sections et distances d'ancrages des haubans [26]

Le comportement d'un câble incliné est non linéaire à cause de la tension et la flexion dans ce câble. Ce comportement non linéaire est souvent pris en considération en utilisant un module d'élasticité sécant équivalent $E_{c,s}$ inférieur au véritable module d'élasticité E_c . Les caractéristiques mécaniques des haubans sont résumées dans le Tableau 4 : [26]

| | |
|--|-----------------------|
| Module d'élasticité idéalisé (sécant) $E_{c,s}$ KN/m ² | 190 x 10 ⁶ |
| Coefficient de poisson (ν) | 0.3 |
| Poids volumique (γ) KN/m ³ | 80 |

Tableau 4 - Caractéristiques mécaniques des haubans [26]

II.3 Hypothèses de travail

Certaines hypothèses simplificatrices ont été nécessaires et sont :

- Comportement élastique de la structure :

Le modèle de comportement le plus simple et le plus couramment utilisé est le modèle élastique. Pour des matériaux ayant un comportement élasto-plastique tels que le béton et l'acier, ce modèle convient parfaitement, pourvu que l'on ne dépasse pas le seuil de plasticité. [27]

- Considération des 30 premiers modes uniquement :

Le nombre de modes de vibration dans une structure de Génie Civil est généralement très grand c'est pourquoi il est nécessaire de ne considérer qu'une partie de ces modes qu'on juge représentatifs et qui décrivent au mieux la réponse de notre structure réel. Que cela soit pour les calculs des déformations modales pour l'optimisation des emplacements des capteurs ou pour la simulation numérique des endommagements on a considéré uniquement les 30 premiers modes propres de la structure (fréquence < 3,5 Hz)

- Sollicitations ambiantes :

- L'hypothèse de base reste que les sollicitations sont des processus stochastiques stationnaires avec une densité spectrale de puissance d'une bande de fréquence suffisamment large pour que toutes les fréquences propres pertinentes de la structure soient excitées.

- On néglige aussi le phénomène de couplage qui peut survenir entre la structure et la source d'excitation (vent ou trafic) [18]

- l'excitation ambiante est simulée dans le modèle par un mouvement de support.

- le rapport des amplitudes d'excitation entre les trois directions spatiales (x,y,z) est supposé invariant .

II.4 Application d'un algorithme génétique pour l'optimisation des capteurs

Le placement optimal des capteurs est essentiel dans les systèmes de surveillance de santé des structures, car la configuration des capteurs a un impact direct sur la qualité des données collectées utilisées pour le diagnostic de la santé des structures. Les méthodologies de détermination de la configuration des capteurs varient selon les différentes structures. Pour les structures simples et régulières ayant un petit nombre de degrés de libertés des capteurs physiques (câblés ou sans fil) peuvent être installés pour les données collecter et valider différentes configurations de capteurs. Cependant, la SHM est plus couramment appliquée dans les structures grandes et complexes pour la détection des dommages ou la surveillance de l'état structurel. Pour ces structures, comme que les grands bâtiments, les tours de forme irrégulière et les ponts de grande portée, les essais numériques sont préférables, car la configuration illimitée des capteurs peut être testée efficacement et économiquement. Les modèles d'éléments finis (FE) tridimensionnels doivent généralement être construits pour les essais numériques afin d'optimiser le placement des capteurs. Les modèles en éléments finis générés peuvent avoir des milliers de degrés de liberté vue la complexité et la dimension des structures.

Étant donné que l'optimisation de l'emplacement des capteurs vise principalement à déterminer les degrés de libertés qui vont recevoir les capteurs, le problème peut être résumée comme suit : « étant donné un ensemble de n positions candidates, trouver m positions, où $m < n$, Qui devra maximiser ou minimiser la valeur du critère d'évaluation proposé pour la configuration des capteurs. » Le problème est ensuite converti en une sorte de problème d'optimisation combinatoire. Le nombre total de toutes les configurations potentielles de capteurs contenant m capteurs peut être obtenu en utilisant l'équation (1) :

$$C = \frac{n!}{m!(n-m)!} \dots(1)$$

Où n désigne le nombre de positions candidates et m est le nombre total de capteurs à placer.

Il convient de souligner que m n'est pas une constante dans de nombreuses situations car m est également un paramètre à optimiser (la plupart du temps doit être minimisé) pour minimiser le coût total des capteurs et de leur installation.

II.4.1 Définition d'un algorithme génétique (AG) :

Les algorithmes génétiques appartiennent à la famille des algorithmes évolutionnistes. Leur but est d'obtenir une solution approchée à un problème d'optimisation, lorsqu'il n'existe pas de méthode exacte (ou que la solution est inconnue) pour le résoudre en un temps raisonnable. Les algorithmes génétiques utilisent la notion de sélection naturelle et l'appliquent à une population de solutions potentielles au problème donné.

Un algorithme génétique va faire évoluer une population dans le but d'en améliorer les individus. Et c'est donc, à chaque génération, un ensemble d'individus qui sera mis en avant et non un individu particulier. Nous obtiendrons donc un ensemble de solutions pour un problème et pas une solution unique. Les solutions trouvées seront généralement différentes, mais seront d'une qualité équivalente. [28]

Le déroulement d'un algorithme génétique peut être découpé en cinq parties :

1. La création de la population initiale
2. L'évaluation des individus
3. La création de nouveaux individus
4. L'insertion des nouveaux individus dans la population
5. Répétition du processus

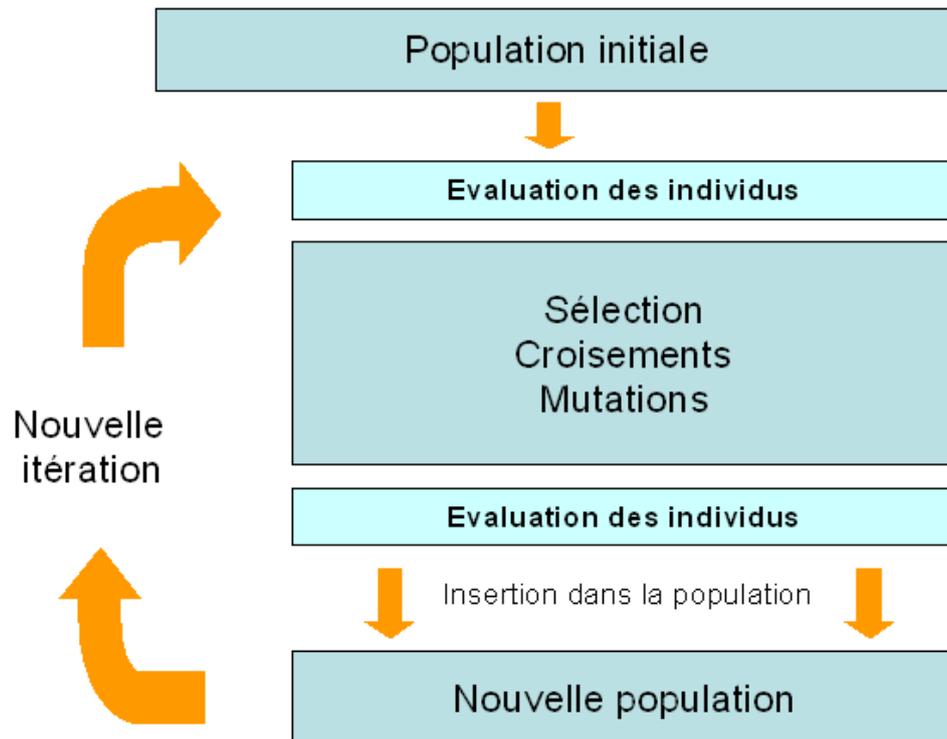


Figure 8 - schéma général d'un algorithme génétique [28]

II.4.2 Réduction du nombre des positions candidates :

Afin de choisir les emplacements candidats à mettre en input dans notre algorithme génétique nous avons initialement pris tous les nœuds du modèle du pont en éléments finis (revoir la section II.2) et qui sont au nombre de 6079 et qu'on a ensuite réduit en deux étapes.

Étape 1 :

Cette étape consiste à réduire le nombre d'emplacements candidats selon leurs positions, il est en effet plus commode de prendre des points de l'ouvrage qui sont facilement accessibles et assez espacés les uns des autres. Pour ce fait on considère uniquement les points qui sont sur les trottoirs de notre pont et espacés entre eux d'une distance d'environ 12m.

Ceci nous permet de passer à 86 points (candidats : 258 DDL) (figure 9)

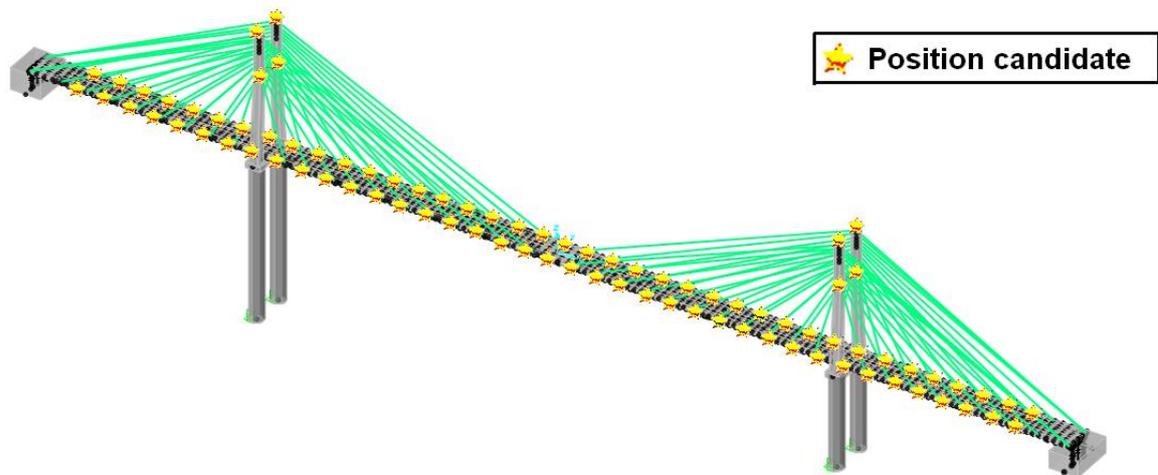


Figure 9 - Emplacements candidats après la première étape de réduction

Étape 2 :

Cette étape consiste à réduire le nombre de degrés de liberté en calculant l'information de Fisher (FIM) [11] associée à chacun des degrés de libertés pris individuellement dont l'expression est donnée par l'équation (2)

$$\varphi^i = \varphi^{iT} \varphi^i \dots\dots\dots (2)$$

Avec φ correspondant à la ième ligne de la matrice des déplacements nodaux associée au ième degré de liberté.

On ne sélectionne par la suite les 50 % des degrés de liberté ayant obtenu la valeur la plus grande de φ^i . Cette opération nous permet de considérer uniquement les degrés de libertés ayant une quantité d'informations mesurées élevées. On élimine de ce fait les degrés de liberté ayant un déplacement négligeable dans la direction considérée (comme le déplacement vertical au voisinage d'un appui ou le déplacement longitudinal sur le tablier).

Ceci nous permet de passer de 258 degrés de libertés à 129 degrés de liberté candidats pour le placement d'un capteur (figures suivantes)

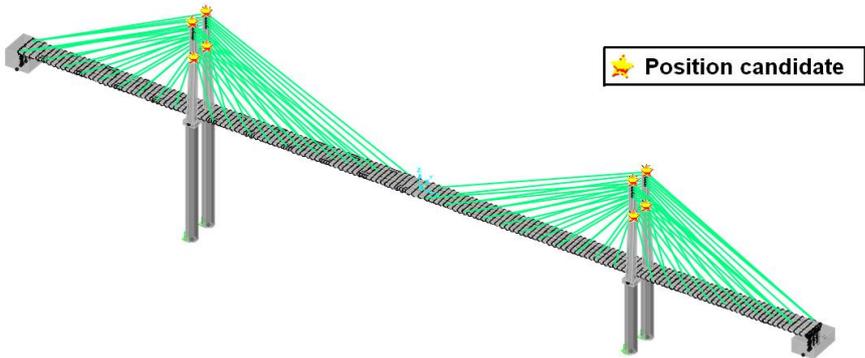


Figure 10 - Positions candidates suivant l'axe x (longitudinal)

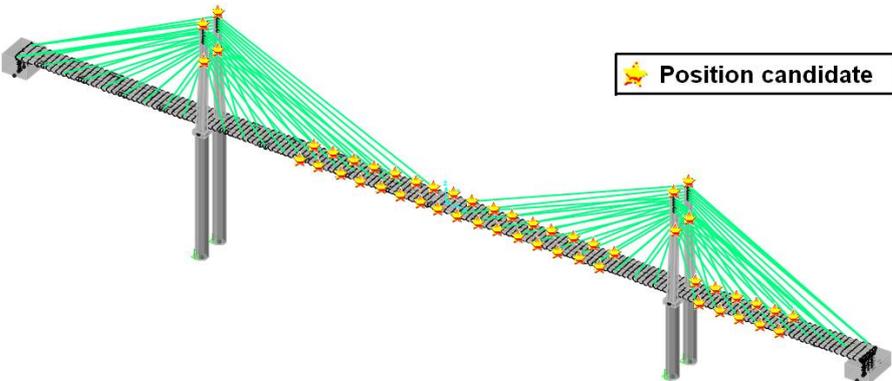


Figure 11 - Positions candidates suivant l'axe Y (transversal)

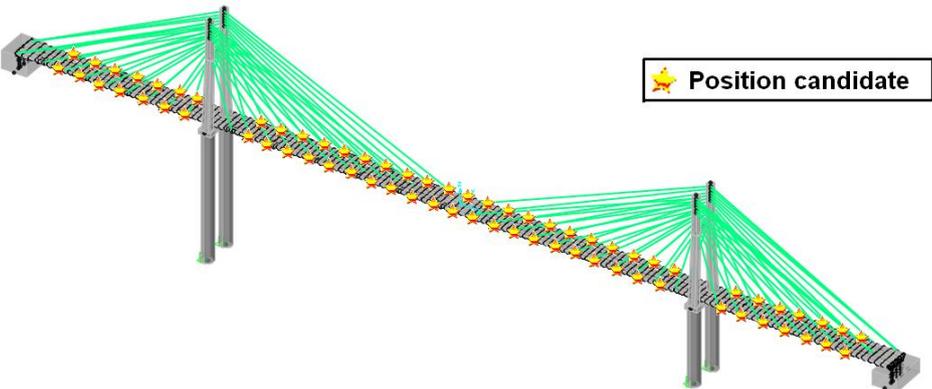


Figure 12 - Positions candidates suivant l'axe Z (vertical)

II.4.3 Conception de l'algorithme génétique :

Définitions :

Un gène : est défini comme étant une partie d'une solution. Dans notre cas c'est un degré de liberté qui accueillera un capteur (accéléromètre).

Un individu : est défini comme une solution potentielle à notre problème. Dans notre cas c'est un ensemble de degré de liberté ou une certaine configuration spatiale de nos capteurs qui solutionne notre problème.

Une population : est un ensemble d'individus.

Une génération : est une itération de notre algorithme.

Croisement des individus :

Les croisements permettent de simuler des reproductions d'individus dans le but d'en créer des nouveaux. Pour croiser un individu i avec un individu j , on regroupe l'ensemble de tous les points constituant les deux individus dans un même ensemble puis on prend aléatoirement un sous ensemble dont la taille est comprise entre celle des deux individus en évitant la répétition d'un même gène.

Par exemple : on prend par exemple deux individus « A » et « B » qu'on définit comme suit :

A = [901, 332, 279, 562]

B = [887, 943, 161, 920, 947, 436, 80, 786]

Les individus sont définis comme un ensemble de nombre et chaque nombre correspond à un degré de liberté dans notre modèle.

Le croisement de ces individus (« A » et « B ») peut nous donner ces résultats

$(A \oplus B) = [332, 80, 943, 161, 901, 947, 786]$

Ou bien : $(A \oplus B) = [332, 901, 436, 279, 947]$

Ou bien ...

Mutation génétique :

Une autre solution que le croisement pour créer de nouveaux individus est de modifier ceux déjà existants. Une fois de plus, le hasard va nous être d'une grande utilité. Il peut s'avérer efficace de modifier aléatoirement quelques individus de notre population en modifiant un gène ou un autre. Rien ne nous dit que l'individu muté sera meilleur ou moins bon, mais il apportera des possibilités supplémentaires qui pourraient bien être utiles pour la création de bonnes solutions. Généralement, on ne modifie qu'un gène pour passer d'une solution à une autre solution de forme similaire, mais qui peut avoir une évaluation totalement différente.

On distingue dans notre cas trois types de mutation :

1- Mutation en changeant un chromosome aléatoirement a un individu :

Exemple :

$B = [887, 943, 161, 920, 947, 436, 80, 786]$

$B^* = [887, 943, 161, 300, 947, 436, 80, 786]$

2- Mutation en enlevant un chromosome aléatoirement a un individu :

Exemple :

$B = [887, 943, 161, 920, 947, 436, 80, 786]$

$B^* = [887, 943, 161, 920, 947, 80, 786]$

3- Mutation en ajoutant un chromosome aléatoirement a un individu :

Exemple :

$B = [887, 943, 161, 920, 947, 436, 80, 786]$

$B = [887, 943, 161, 920, 947, 546, 436, 80, 786]$

Fonction objective :

Le terme « fonction objective » désigne une fonction qui sert de critère pour déterminer la meilleure solution à un problème d'optimisation. Concrètement, elle associe une valeur à un

problème d'optimisation. Le but du problème d'optimisation est alors de minimiser ou de maximiser cette fonction jusqu'à l'optimum. [8]

Le MAC [11] couramment utilisé pour évaluer le carré de cosinus entre les vecteurs de forme est défini comme suit :

$$MAC = \frac{(\phi_i^T \phi_j)^2}{(\phi_i^T \phi_i)(\phi_j^T \phi_j)}$$

On l'utilise pour garantir que tous les produits internes entre les vecteurs de forme ont des cosinus relativement petits, où les vecteurs de forme sont facilement reconnaissables. Les valeurs des éléments dans la matrice MAC se situent entre 0 et 1, où 0 indique qu'il existe peu ou pas de corrélation entre l'élément hors diagonale MAC_{ij} (c'est-à-dire le vecteur modal facilement reconnaissable) et 1 indique un degré élevé de similitude entre les vecteurs modaux (c'est-à-dire le vecteur modal assez indiscernable). Par conséquent, la fonction objective peut être formulée en utilisant la racine carrée de la somme des carrés des éléments non diagonaux de la matrice MAC. Qui est représenté comme suit :

$$fitness = \sqrt{\sum_{i \neq j} MAC_{i,j}^2}$$

Cette fonction est à minimiser c'est-à-dire que plus la fonction objective d'un individu est faible plus on le considère de meilleur qualité.

Démarrage processus génétique :

Population initiale :

Pour initialiser notre algorithme génétique, on a généré aléatoirement 50 individus (solutions potentielles) comportant chacun 7 chromosomes (capteurs)

Classement :

Après la création de la population initiale, nous avons évalué chacun de ces individus par la fonction objective et nous les avons classés du meilleur au pire.

Croisement des individus :

On a choisi d'utiliser une sélection par rang pour sélectionner les individus qui seront croisés entre eux, c'est-à-dire : après avoir trié la population en fonction de la qualité des individus, on leur a attribué à chacun un rang. Les individus de moins bonne qualité obtiennent un rang faible (à partir de 1). Et ainsi en itérant sur chaque individu on finit par attribuer le rang N au meilleur individu (où N est la taille de la population). La suite consiste uniquement en l'implémentation d'une roulette [Figure 22] basée sur les rangs des individus. L'angle de chaque secteur de la roue sera proportionnel au rang de l'individu qu'il représente. Donc on va prendre aléatoirement deux individus de notre population pour un croisement en donnant plus de chance de sélection pour les individus d'un meilleur rang (de meilleure qualité). De cette manière on va créer 100 nouveaux individus, et on obtiendra ainsi une population de 150 individus.

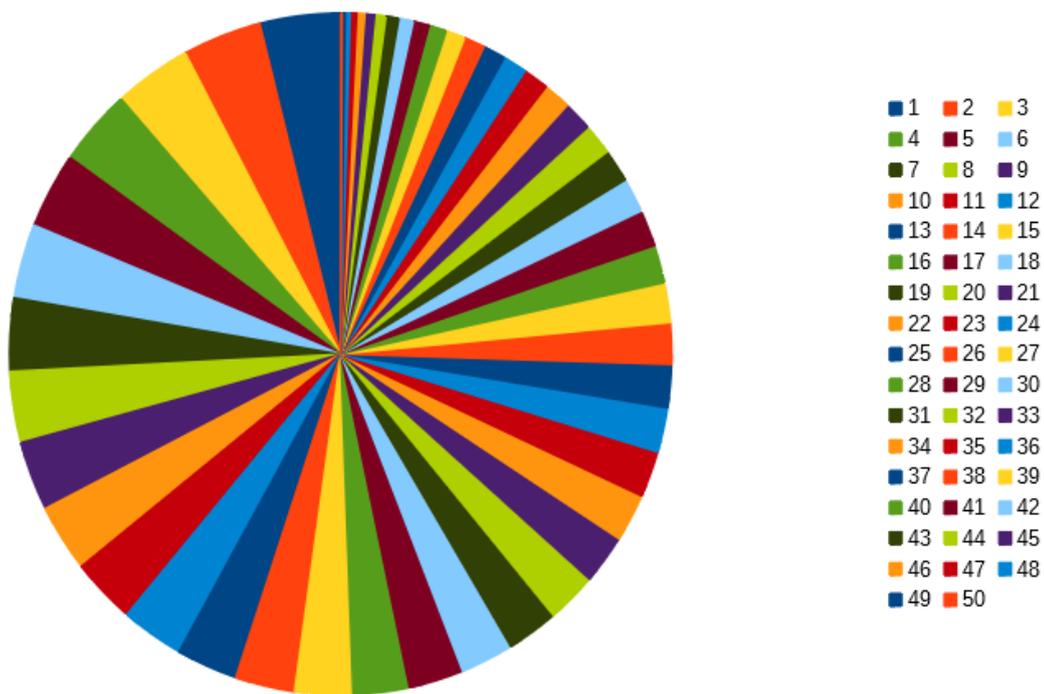


Figure 13- : Diagramme circulaire représentant la probabilité de sélection de chaque individu selon son rang

Mutation génétique :

- On introduit des mutations qui feront changer un chromosome en moyenne pour chaque individu et demi. C'est-à-dire que deux individus sur trois ($2/3$) en moyenne seront touchés par un changement de chromosomes.
- On ajoute un chromosome à trois individus sur dix ($3/10$)
- Et on retire un chromosome de trois individus sur dix ($3/10$)

Les chances de croissance et de décroissance du nombre de chromosome dans un individu de notre population sont donc égales.

Tous les individus de la population sont concernés par ces mutations à l'exception de l'individu 1 (le meilleur individu)

Classement :

On classe les 150 individus selon leur qualité du meilleur au pire.

Passage à la génération suivante :

On prend les 50 meilleurs individus de la population et on passe à la génération suivante.

II.4.4 Résultats et interprétations

Après près de 200.000 générations nous avons obtenu les résultats suivants :

1- Nombre de capteur :

Le nombre initial de capteur par individu était de 7 capteurs, mais il s'est avéré qu'il n'était pas optimal et il a donc augmenté progressivement avant de se stabiliser à 47 (figure 14)

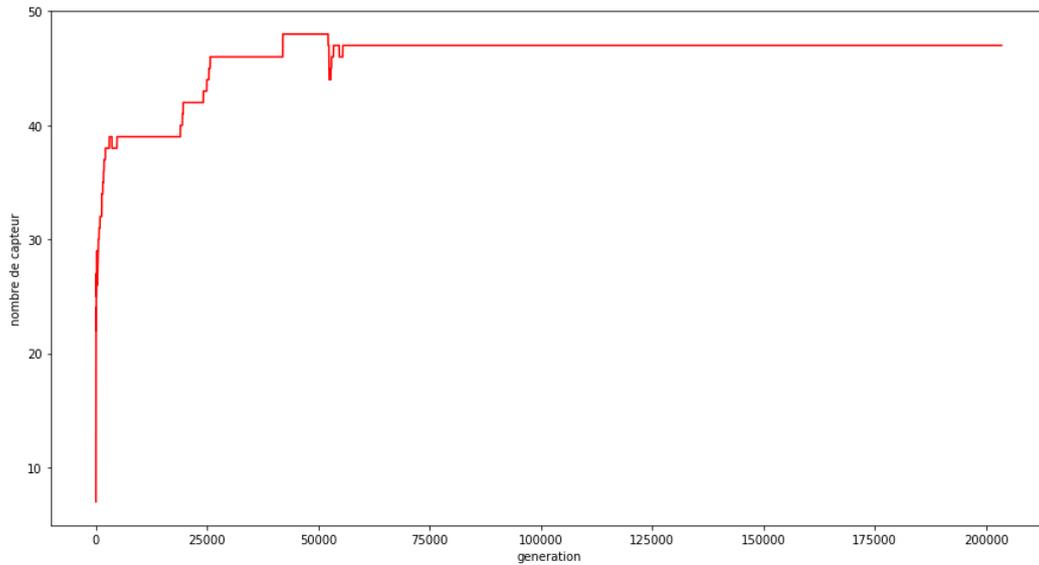


Figure 14 - Evolution du nombre de capteur du meilleur individu au cours des générations

2- Qualité de la population :

La qualité de la population évolue très rapidement au début puis de moins en moins vite avant de prendre une valeur fixe. (Figure 15)

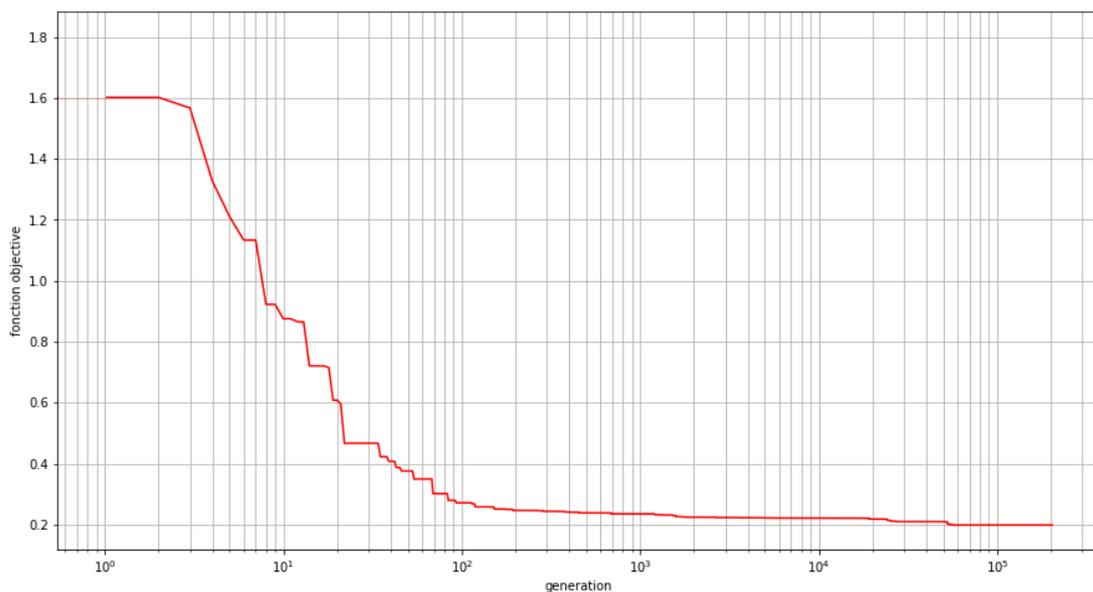


Figure 15 - Evolution de la qualité du meilleur individu au cours des générations

3- Emplacement final des capteurs :

On considère le meilleur individu de la population final comme étant la solution la plus optimale à notre problème, la configuration des capteurs adoptée est :

Suivant l'axe 'x' (longitudinal) :

Nombre de capteurs égal à 5, situés aux extrémités supérieures des pylônes (figure 16)

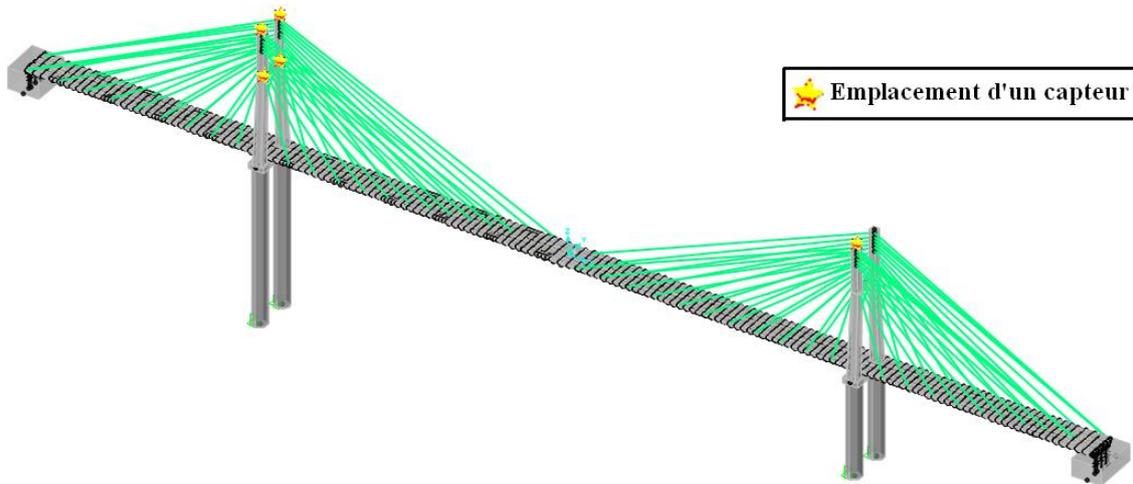


Figure 16 - Position des capteurs suivant l'axe 'x'

Suivant l'axe 'y' (transversal) :

Nombre de capteurs égal à 16, situés aux extrémités supérieures des pylônes (figure suivante) et au niveau du tablier.

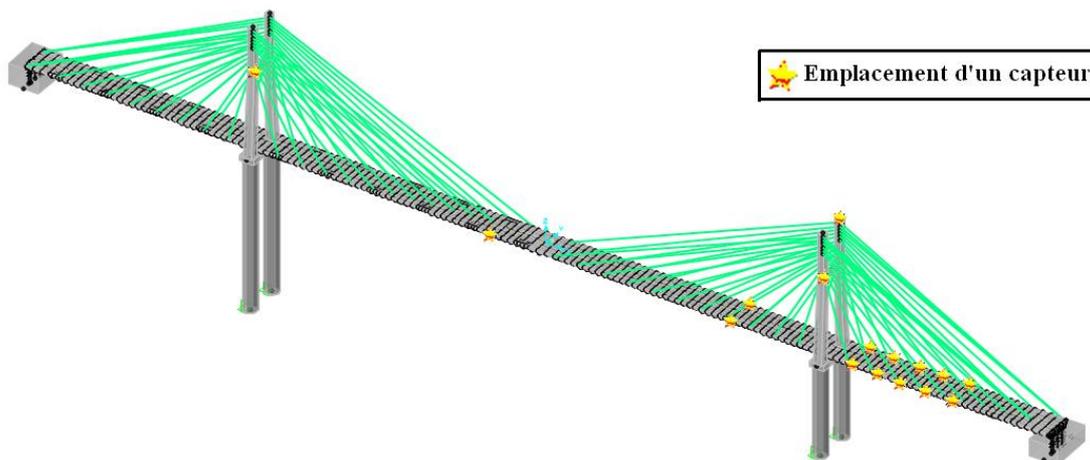


Figure 17 - positions des capteurs suivant l'axe 'y'

Suivant l'axe 'z' (vertical) :

Nombre de capteurs égal à 26, situés au niveau du tablier.

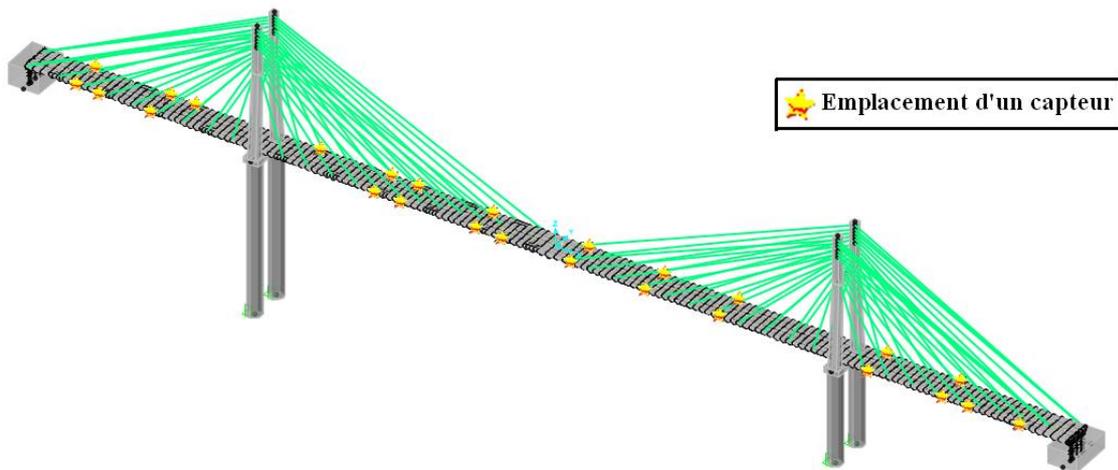


Figure 18 - position des capteurs suivant l'axe 'z'

II.5 Conclusion

Grace à cette méthode hybride basée sur les algorithmes génétiques et le critère d'identification MAC, on a pu faire une optimisation du nombre et des emplacements des capteurs, ce qui est une première étape cruciale dans le cheminement qui mène à l'identification des dommages du pont.

Cependant, cette méthode pourrait être améliorée en associant un autre critère que le critère MAC à la fonction objective par exemple : le nombre de capteurs utilisés pour introduire le facteur économique (coût) à notre fonction objective

Chapitre III

Simulation d'une surveillance vibratoire basée
sur les fonctions de réponses fréquentielles
(FRF)

III.1 Introduction :

Dans la pratique de la SHM, on enregistre les réponses dynamiques par les capteurs [voir section I.4] mis en place directement sur la structure et ce avec des emplacements précis et optimisés [voir le chapitre III] ce qui donne des accélérogrammes représentant l'excitation ambiante. La simulation numérique est uniquement utilisée pour illustrer l'efficacité de la méthode proposée dans ce travail. C'est une série de calculs effectués sur un ordinateur et reproduisant un phénomène physique. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène, comme s'il s'était réellement déroulé.

Dans ce chapitre on va présenter la manière avec laquelle nous avons effectué la simulation de l'analyse vibratoire de notre structure. Et qui est défini en quatre étapes : Simulation de dommage dans la structure, Simulation d'une excitation ambiante, acquisition du signal de sortie, traitement de signal.

Cette simulation est réalisée à l'aide du logiciel SAP2000 qui est un logiciel de calcul basé sur la méthode des éléments finis.

III.2 Simulation des dommages dans la structure

III.2.1 Type de dommage

Le pont étudié dans le cadre de ce projet est un pont Haubané constitué de trois éléments principaux et qui sont : les Pylônes, les Haubans et le Tablier. Dans cette étude on s'intéresse uniquement au dommage survenu sur le tablier du pont.

La corrosion et la fatigue sont les causes principales de détériorations dans un pont. Dues généralement aux conditions climatiques extrêmes (vent, humidité, gel-dégel...) et aux charges cycliques auxquelles est soumis le pont (trafic routier, vent).

Le phénomène de Fatigue se caractérise par une baisse de rigidité du béton et donc une diminution du module de Young (E) du béton constitutif du tablier.

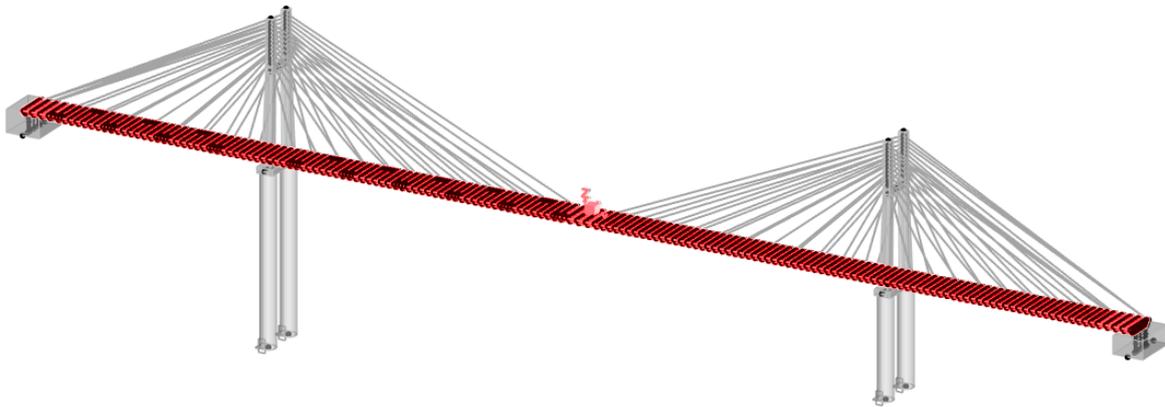


Figure 19 – Tablier du pont étudié

III.2.2 Choix des zones d'endommagement

Notre cas d'étude portera sur la partie sud du tablier du pont, on suppose que la partie nord du tablier ainsi que les pylônes, les câbles et les appuis sont totalement sains. Les endommagements créés et décrits dans ce qui suit sont localisés uniquement sur cette partie du pont.

Pour le choix des zones d'endommagement on se base sur le fait que les zones les plus susceptibles d'être détériorées sont aussi celles qui subissent les plus grandes contraintes. Les zones choisies sont celles où les baisses de rigidité causées par le phénomène de fatigue sont généralement localisées.

On choisit 6 zones principales d'endommagement de « A » à « F » et chaque zone est divisée en plus petites zones pour un total de 39 zones. Les figures suivantes montrent la distribution des contraintes dans le pont en prenant en compte uniquement le poids propre. Les zones les plus sollicitées en cisaillement sont représentées dans la Figure 20 et les zones les plus sollicitées en traction situées sur les appuis, les pylônes, la culée et à mi travée sont montrées sur la Figure 21 et la Figure 22.

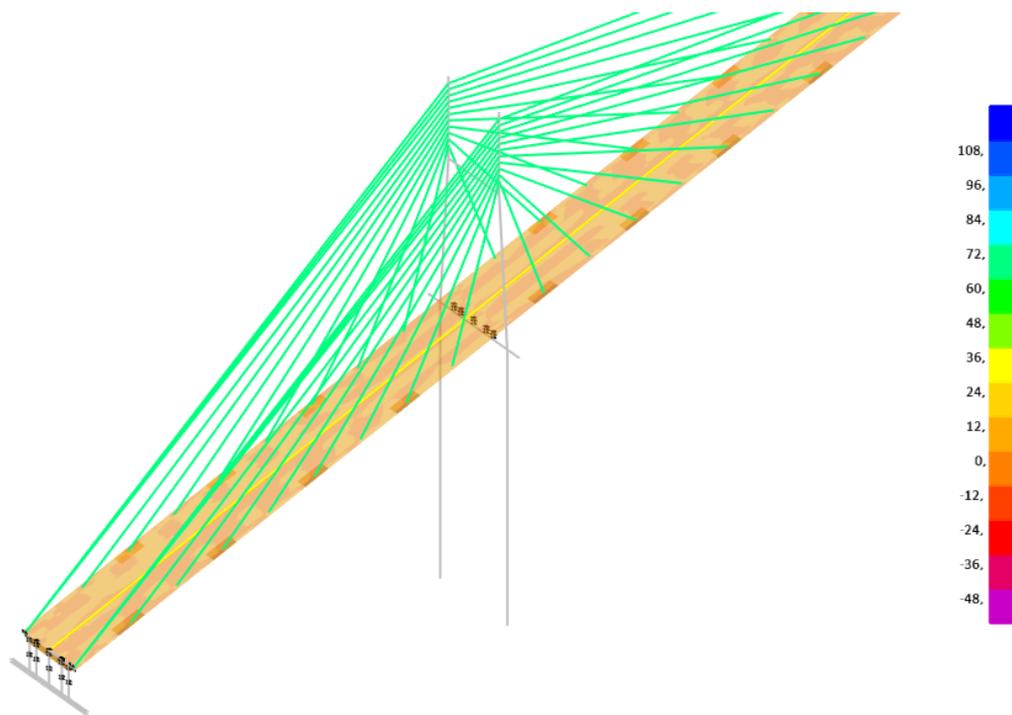


Figure 20 - Contraintes de cisaillement sur le tablier du pont soumis à son poids propre

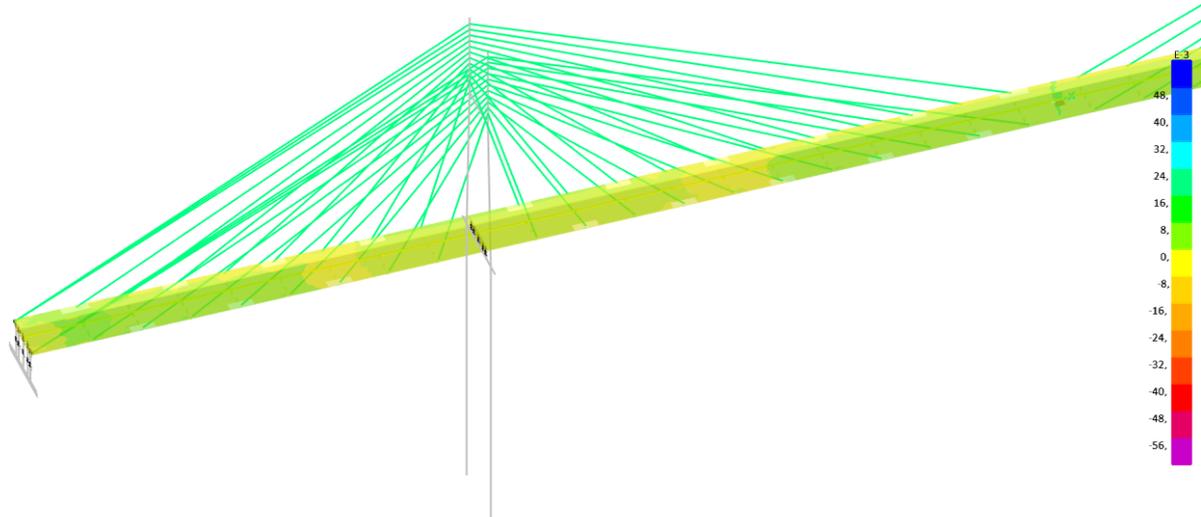


Figure 21 - Contraintes de traction sur le tablier du pont soumis à son poids propre, vue de dessous

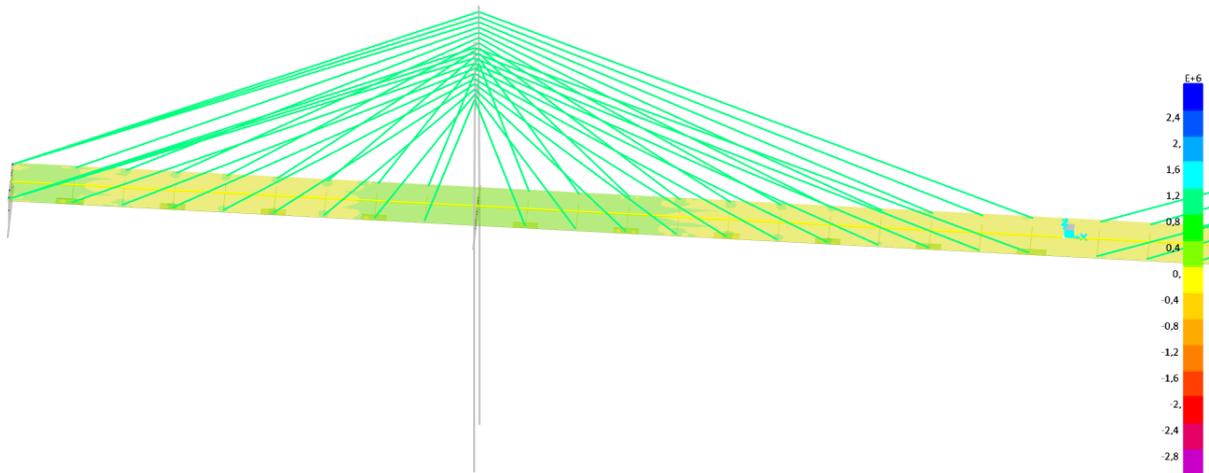


Figure 22 - Contraintes de traction sur le tablier du pont soumis à son poids propre, vue de dessus

III.2.2.1 Zone A : Mi-travée centrale :

La partie inférieure de la mi-travée centrale du tablier peut être sujette à de fortes contraintes de traction qui peuvent induire un endommagement. On affecte la lettre « A » à cette zone (figure 23) et on la subdivise en 6 plus petites zones désignées par : A1, A2, A3, A4, A5 et A6 (figure 24).

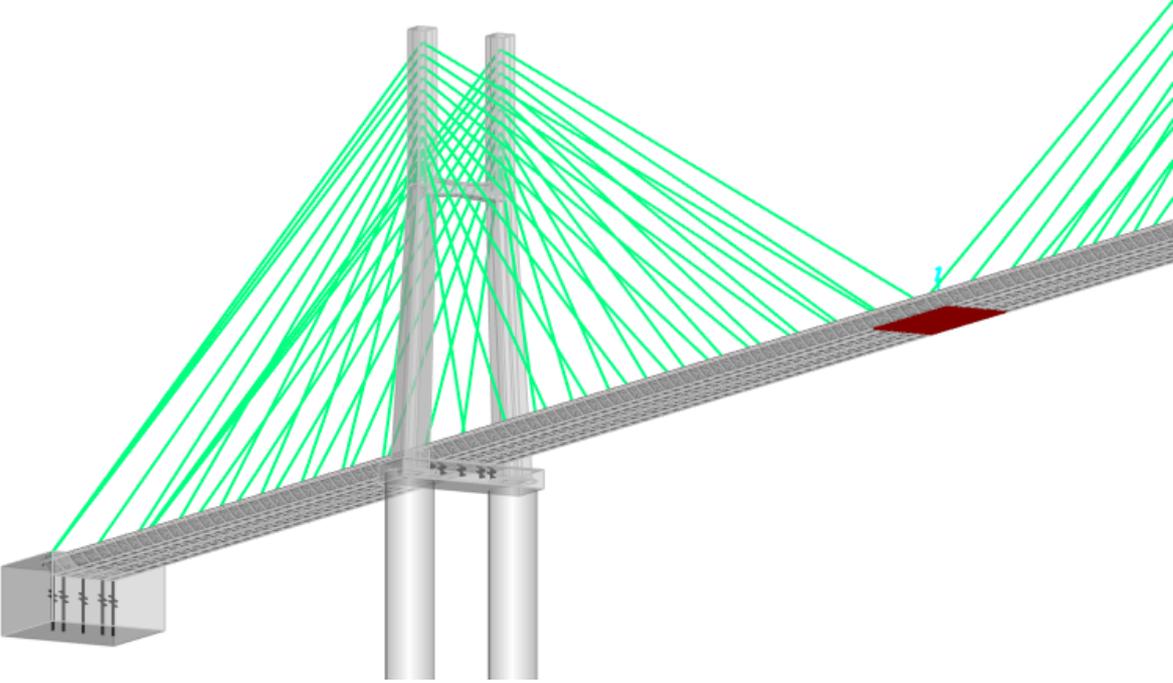


Figure 23 - Zone A dans son intégralité

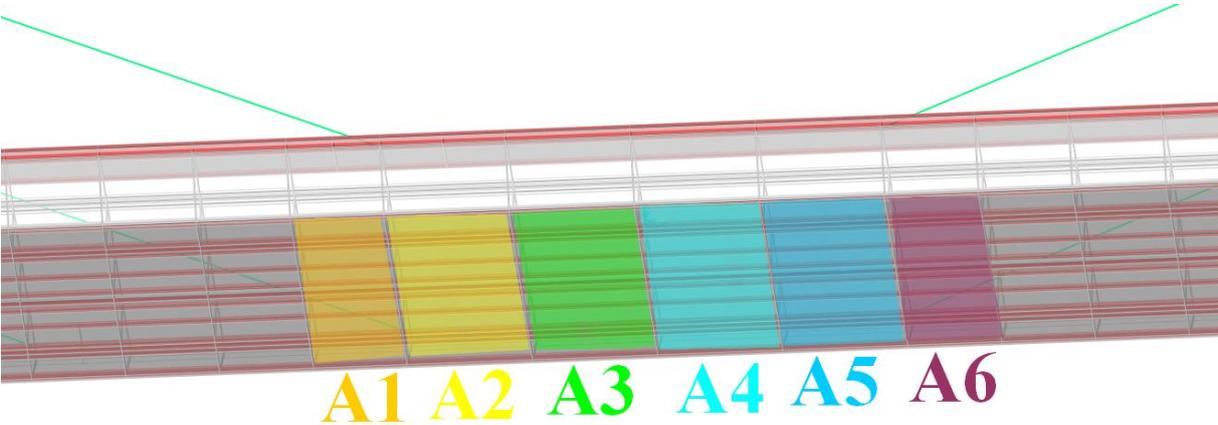


Figure 24 - Subdivisions de la zone A

III.2.2.2 Zone B : Mi-travée de rive

La partie inférieure de la mi-travée de rive du tablier est elle aussi sujette à de fortes contraintes de traction qui peuvent induire un endommagement, et de la même manière que dans la zone A, on affecte la lettre « B » à cette zone (figure 25) et on la subdivise en 4 petites zones qu'on désigne par : B1, B2, B3 et B4 (figure 26).

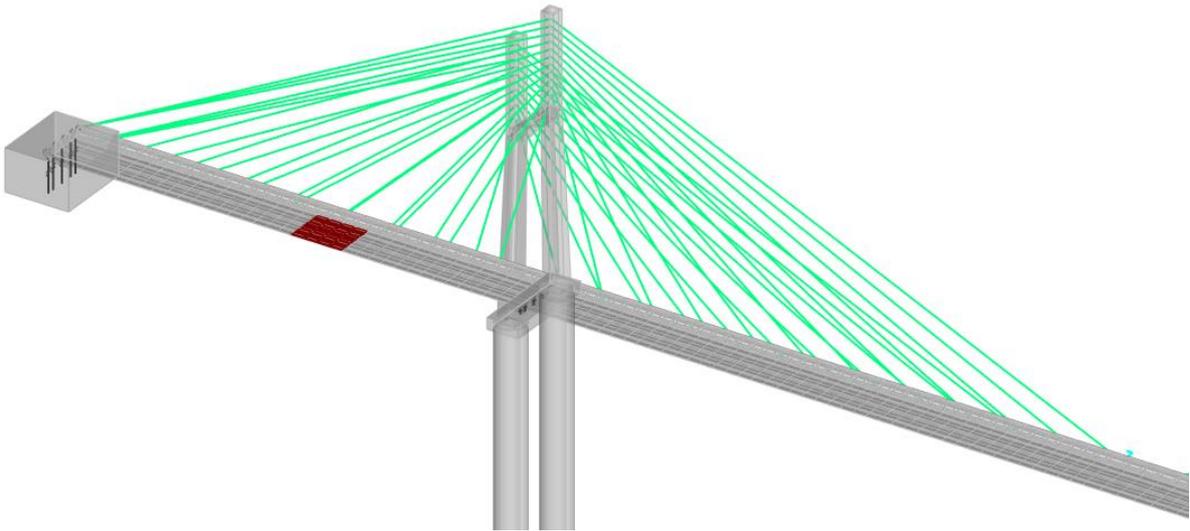


Figure 25 – La zone B dans son intégralité

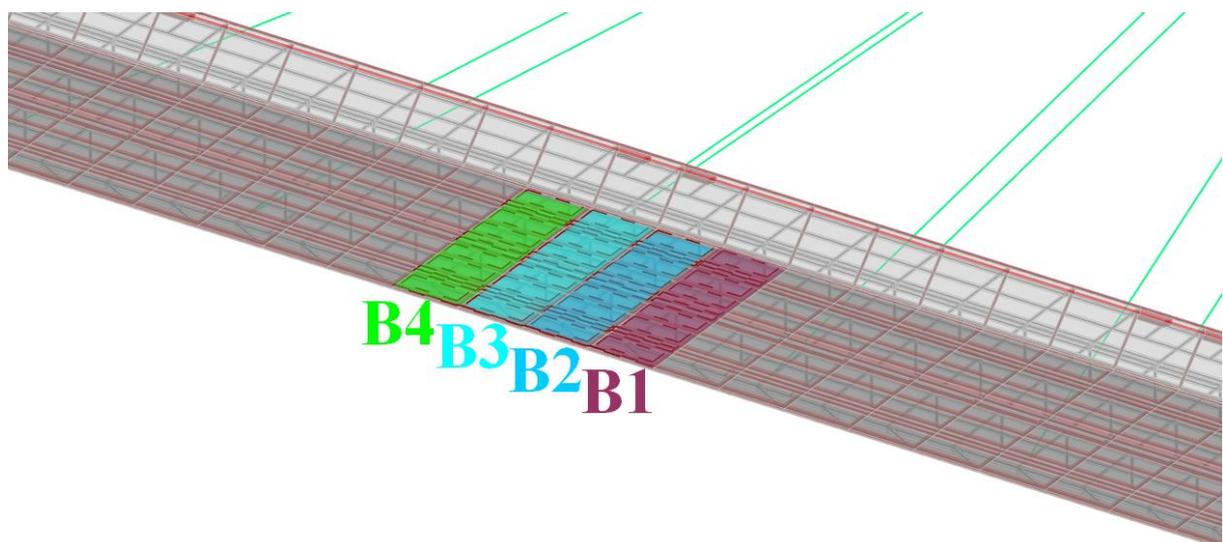


Figure 26 – Subdivisions de la zone B

III.2.2.3 Zone C : Encastrement du tablier dans la culée :

Tout comme la zone A et la zone B on définit la zone C comme étant la partie du tablier encastrée dans la culée (Figure 27), et on la subdivise en 3 zones : C1, C2 et C3. (Figure 28).

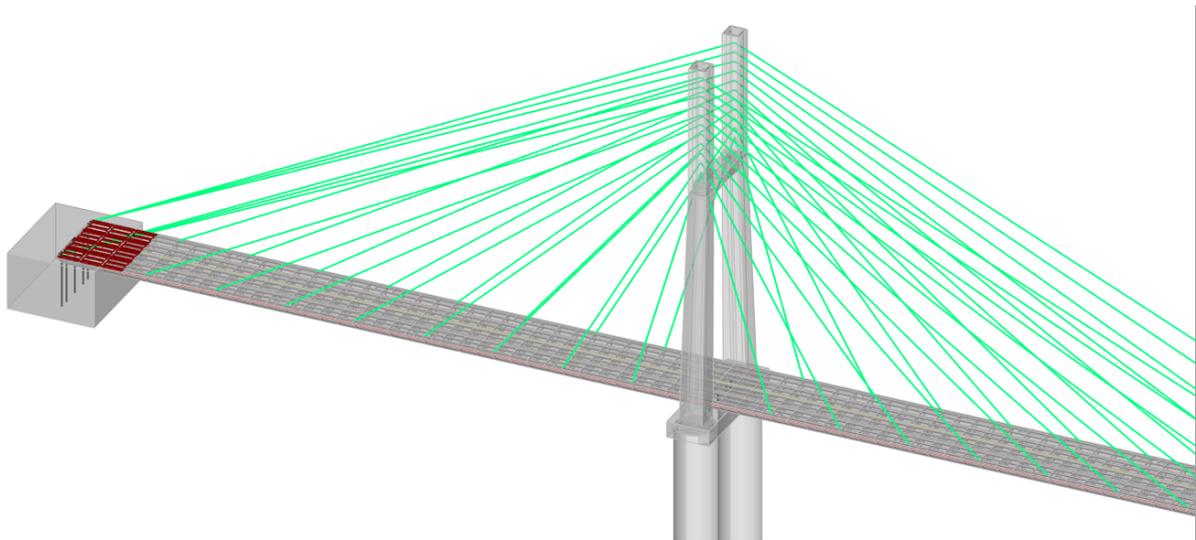


Figure 27 – La zone C dans son intégralité

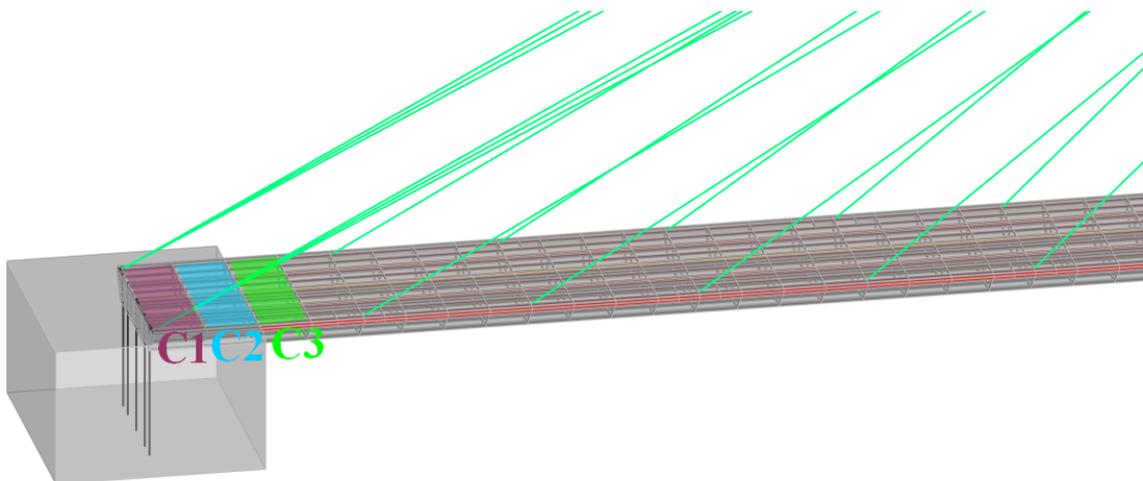


Figure 28 – Subdivisions de la zone C

III.2.2.4 Zone D : Voisinage du pylône :

La zone supérieure du tablier au niveau du pylône est sujette à de fortes contraintes de traction. On définit la zone D comme étant cette dernière (Figure 29) et on la subdivise en 6 parties : D1, D2, D3, D4, D5 et D6. (Figure 30)

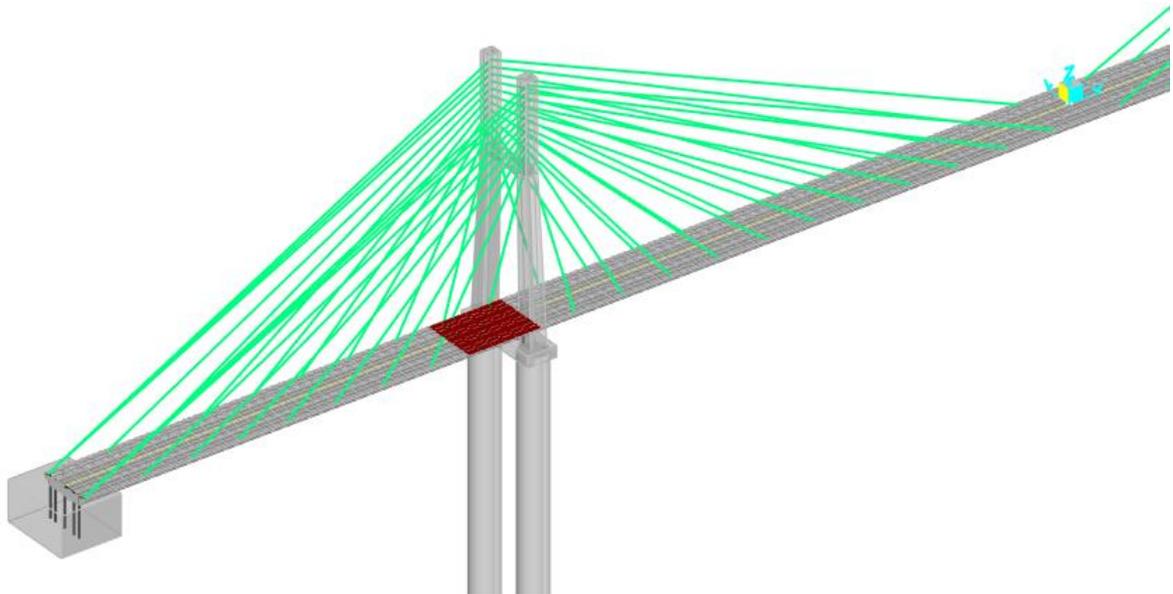


Figure 29 – La zone D dans son intégralité

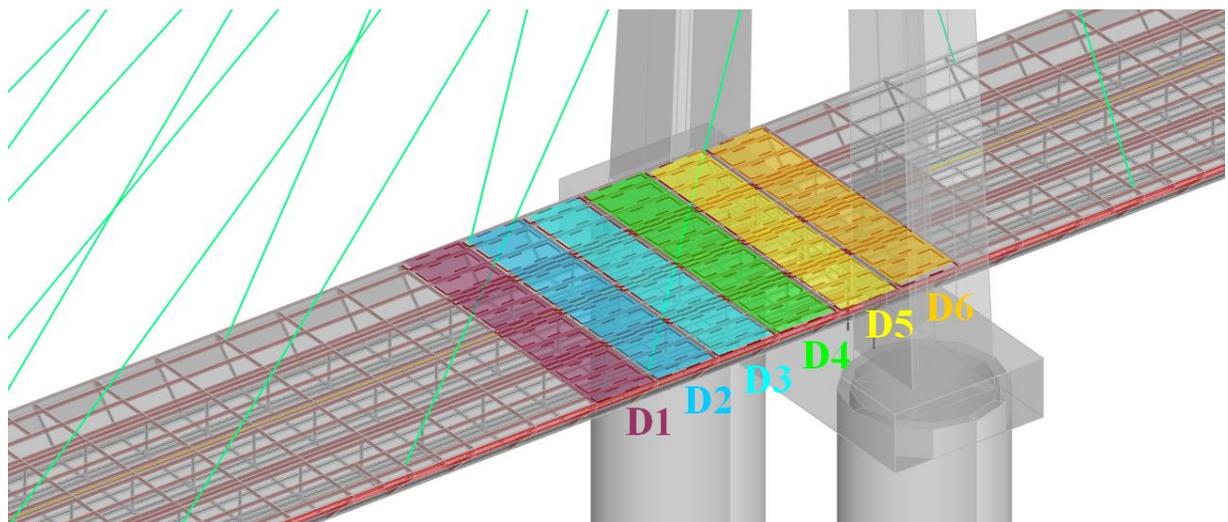


Figure 30 – Subdivisions de la zone D

III.2.2.5 Zone E : Ancrages des câbles :

Les tabliers des ponts à haubans peuvent présenter dans les zones d'ancrage des câbles des concentrations de contraintes, ce qui nous a poussé à considérer ces parties comme susceptibles d'être endommagées. On les désigne ici par la zone E.

La zone E est subdivisée en 18 parties comme il est montré dans la (figure 31).

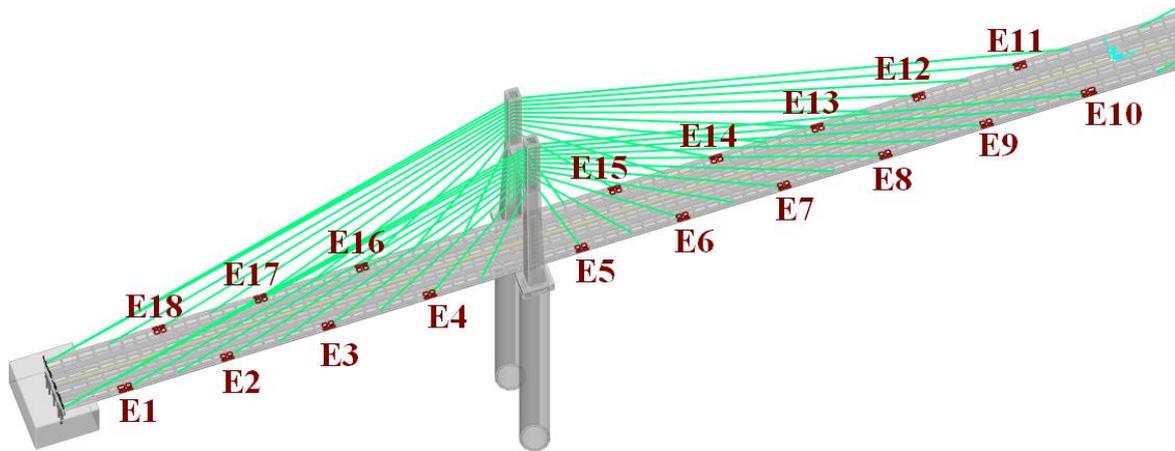


Figure 31 – Zone E

III.2.2.6 Zone F : L'âme du tablier au voisinage du pylône :

Le tablier au voisinage du pylône est soumis à un grand effort tranchant supporté en grande partie par les âmes. En partant de ce principe on définit la zone F comme étant l'âme du tablier au voisinage du pylône, et on la subdivise en deux petites zones F1 et F2 comme il est montré dans la figure 32.

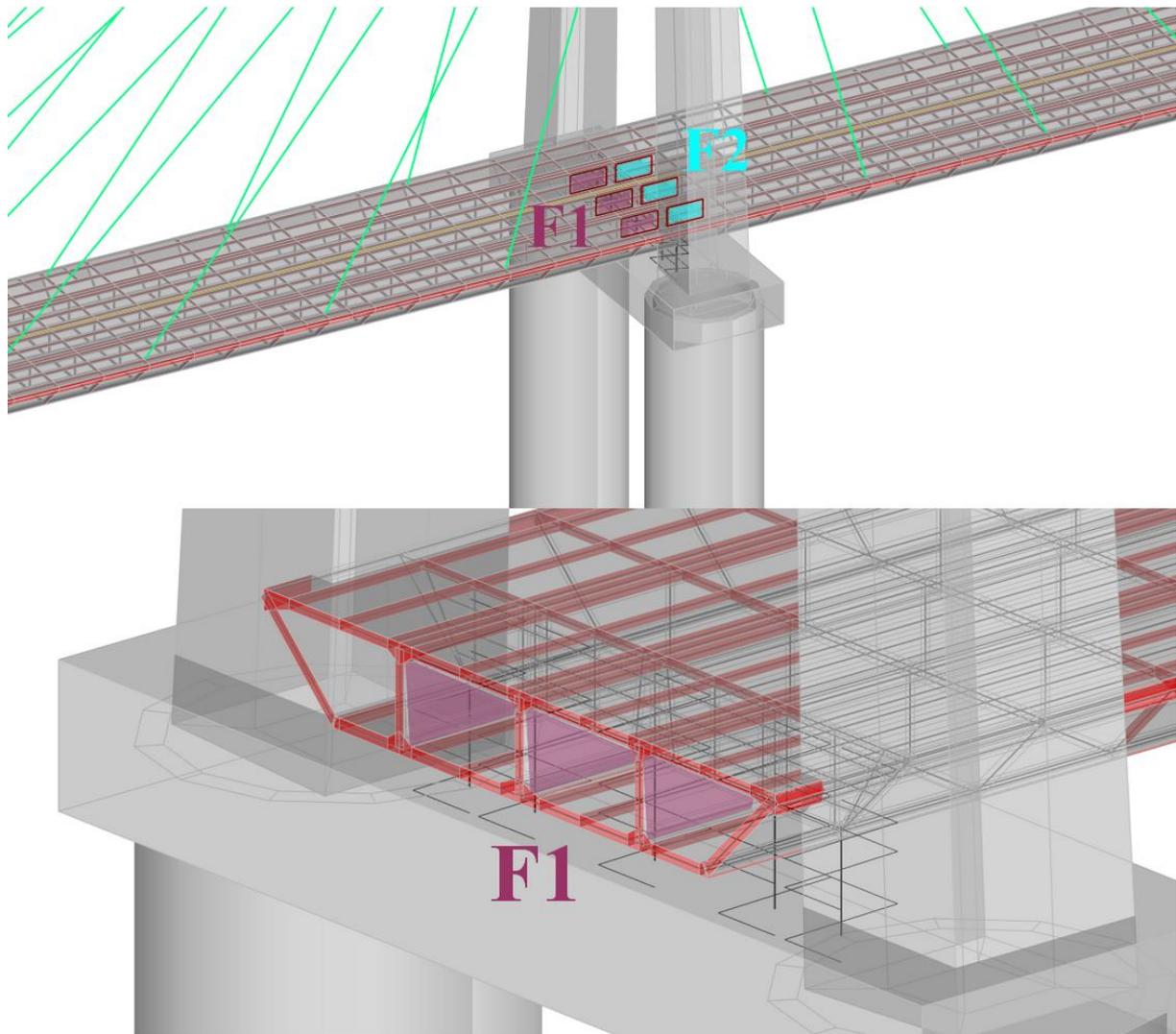


Figure 32 – Zone F

III.2.3 Choix des degrés d'endommagement :

Pour la création de la base de données qui servira par la suite à l'apprentissage de notre réseaux de neurones, on choisit de prendre une baisse de rigidité variant de 5 % à 60 % avec un pas de 5 % pour chaque zone de dommages. C'est à dire si la rigidité initiale de notre matériau est égale à E_0 , on prendra dans un premier temps la rigidité de la zone endommagée égale à $0,95 * E_0$ puis égale à $0,90 * E_0$... jusqu'à $0,4 * E_0$ comme nous le montrons dans le tableau suivant :

| Sévérité du dommage | Rigidité |
|---------------------|--------------|
| 1 | $0,95 * E_0$ |
| 2 | $0,90 * E_0$ |
| 3 | $0,85 * E_0$ |
| 4 | $0,80 * E_0$ |
| 5 | $0,75 * E_0$ |
| 6 | $0,70 * E_0$ |
| 7 | $0,65 * E_0$ |
| 8 | $0,60 * E_0$ |
| 9 | $0,55 * E_0$ |
| 10 | $0,50 * E_0$ |
| 11 | $0,45 * E_0$ |
| 12 | $0,40 * E_0$ |

Tableau 5 - Rigidité associée à chaque degré d'endommagement

III.3 Simulation d'une excitation ambiante

Pour simuler une excitation ambiante, nous avons généré trois accélérogrammes artificiels à l'aide du logiciel « SeismoArtif » [29], chaque accélérogramme sera associé à une direction spatial (x,y ou z).

Pour créer ces accélérogrammes nous avons donné comme entrée au logiciel les paramétrés suivant :

- Un spectre ciblé plat (figure 33)
- Une forme d'enveloppe stationnaire (figure 34)
- Un pas de temps égal à 0,01 secondes
- Une durée de l'accélération égale à 1000 secondes
- Un amortissement égal à 5 %

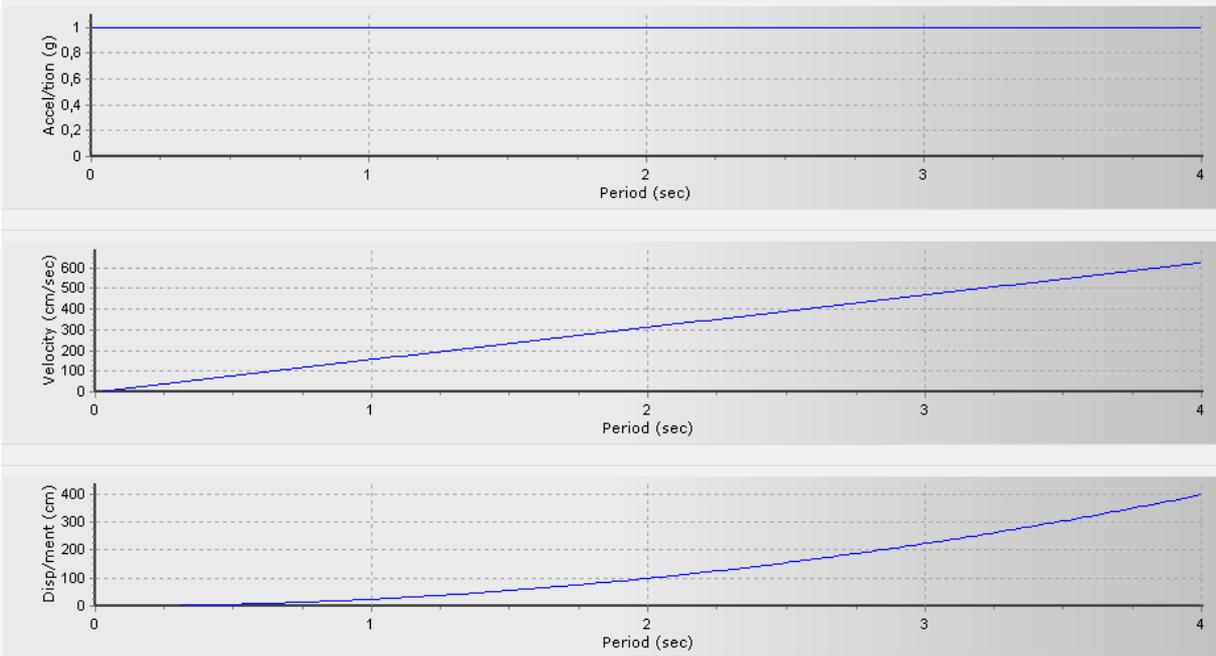


Figure 33 – Spectre ciblé

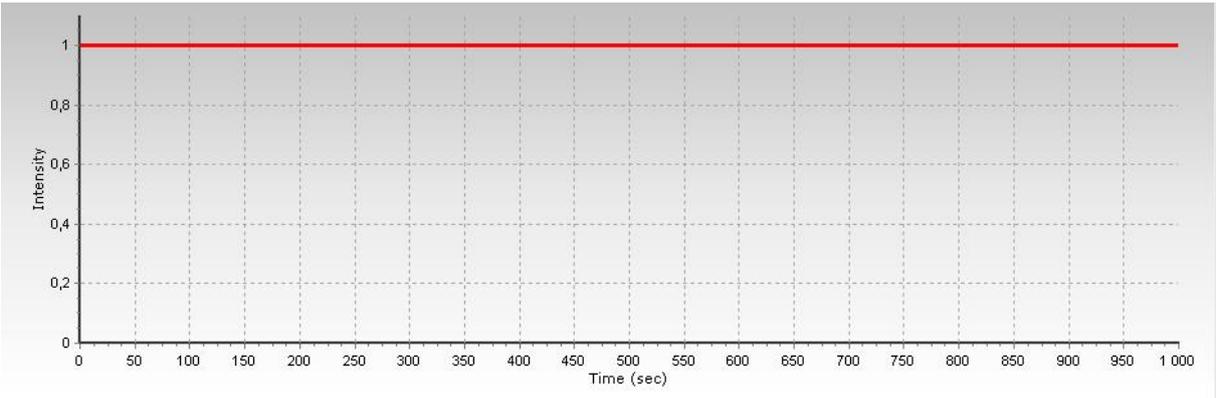


Figure 34 – La forme de l'enveloppe

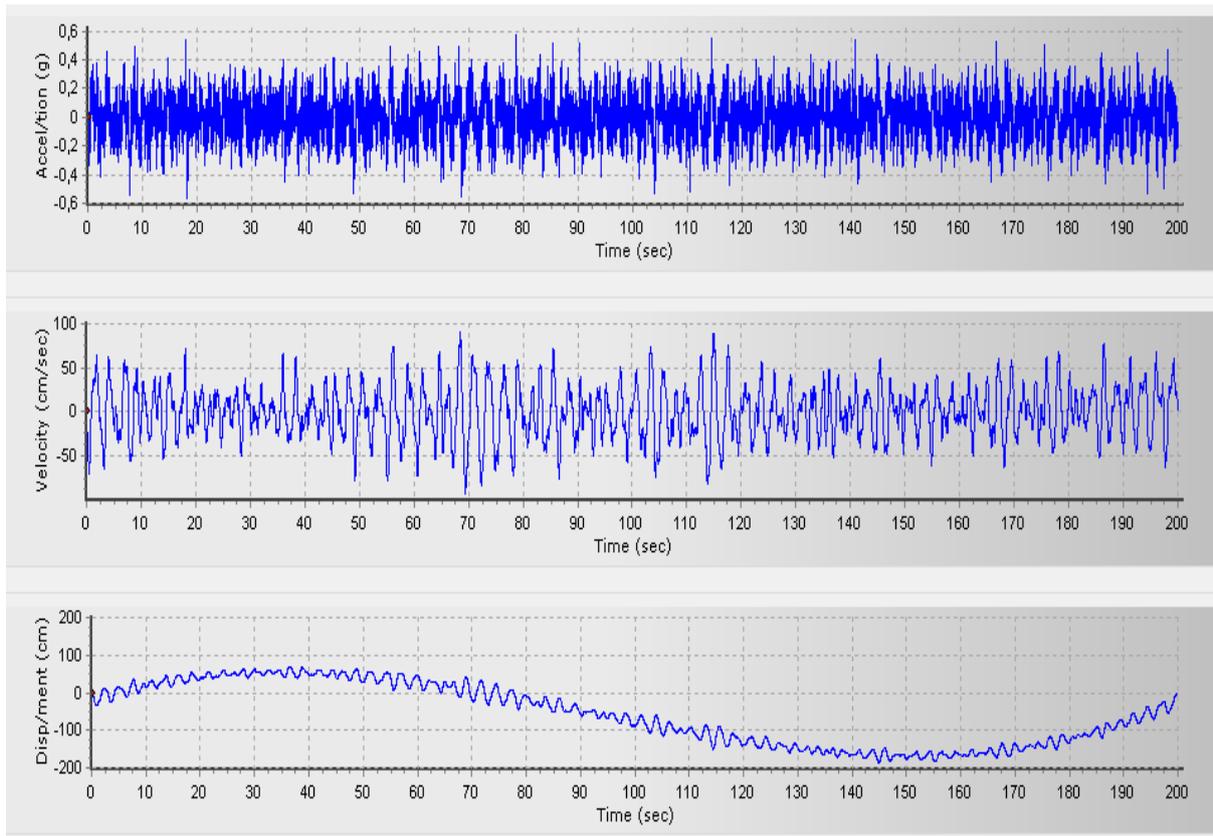


Figure 35 – les 200 premières secondes des accélérogrammes générés

III.4 Acquisition du signal de sortie

Pour chaque cas de dommage on lance une analyse temporelle sur le logiciel (après avoir réduit la rigidité de la partie supposée endommagée) et on récupère les accélérations qui ont été induites dans chaque degré de liberté où un capteur a été placé comme le montre la figure 46, on obtient un accélérogramme de 1000s pour chaque point de mesure supposé.

A ce stade chaque état de la structure est défini par 47 accélérogrammes de 1000 secondes chacun et avec un pas de 0,01 seconde. Le nombre de valeurs est égal à $47 \cdot 1000 / 0,01 = 4.700.000$ ce qui représente un nombre de données très volumineux et considérable.

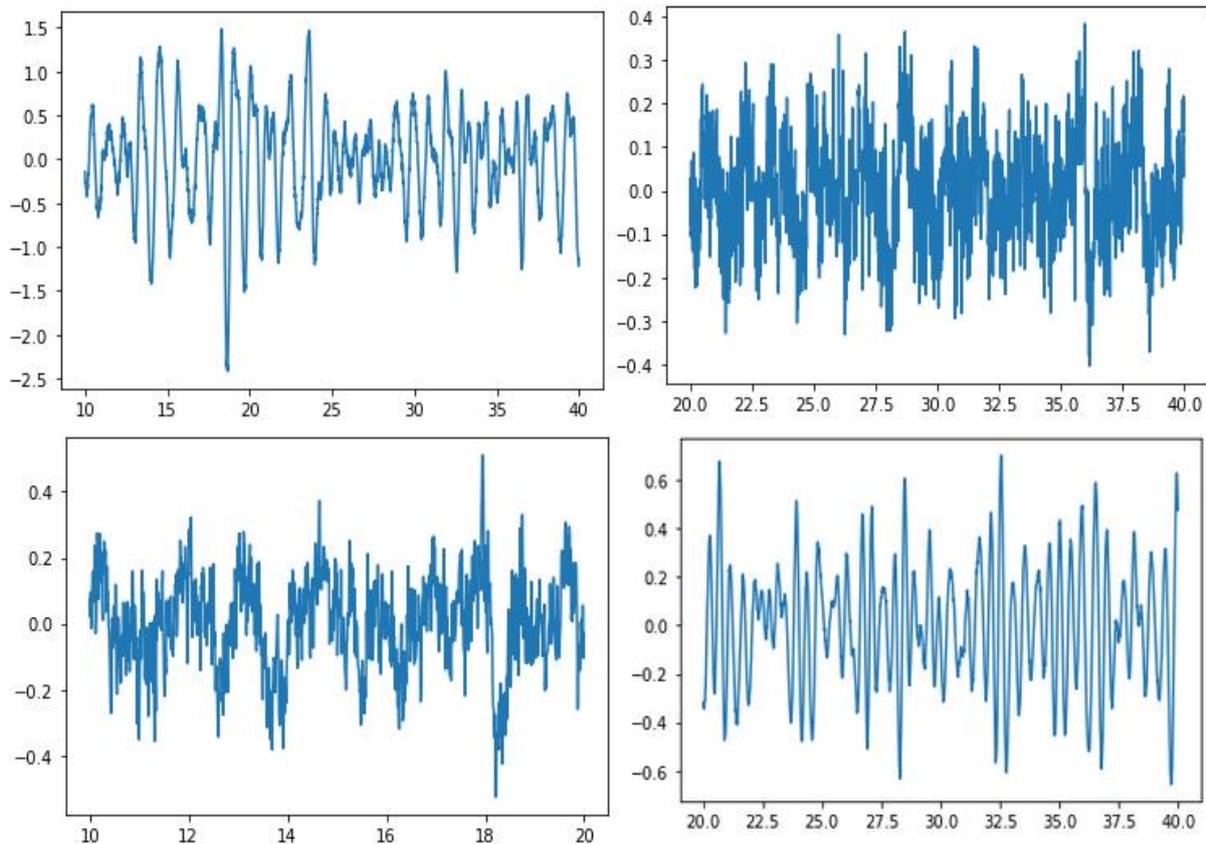


Figure 36 - Exemples d'accélération subie par quelques points de mesure

III.5 Traitement des données

III.5.1 Introduction du bruit

Les enregistrements expérimentaux sont généralement altérés de plusieurs sources de bruit. Afin de simuler numériquement ces bruits on introduit un bruit artificiel qui nous permet d'élargir notre base de données, d'éviter un éventuel sur-apprentissage de notre réseau de neurones et de rapprocher les données issues de la simulation numérique aux données réelles. Nous avons choisi d'introduire un bruit aléatoire gaussien à nos accélérogrammes.

III.5.1.1 Définition d'un bruit gaussien

Soit X_n un signal discret. Le bruit est une perturbation, que l'on notera b_n . Le signal résultant sera donc :

$$Y_n = X_n + b_n$$

b_n est une variable aléatoire continue. On parle de bruit gaussien lorsque la densité de probabilité de cette variable suit la loi gaussienne (ou loi normale).

La loi gaussienne est définie comme :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Où μ est l'espérance et σ l'écart type.

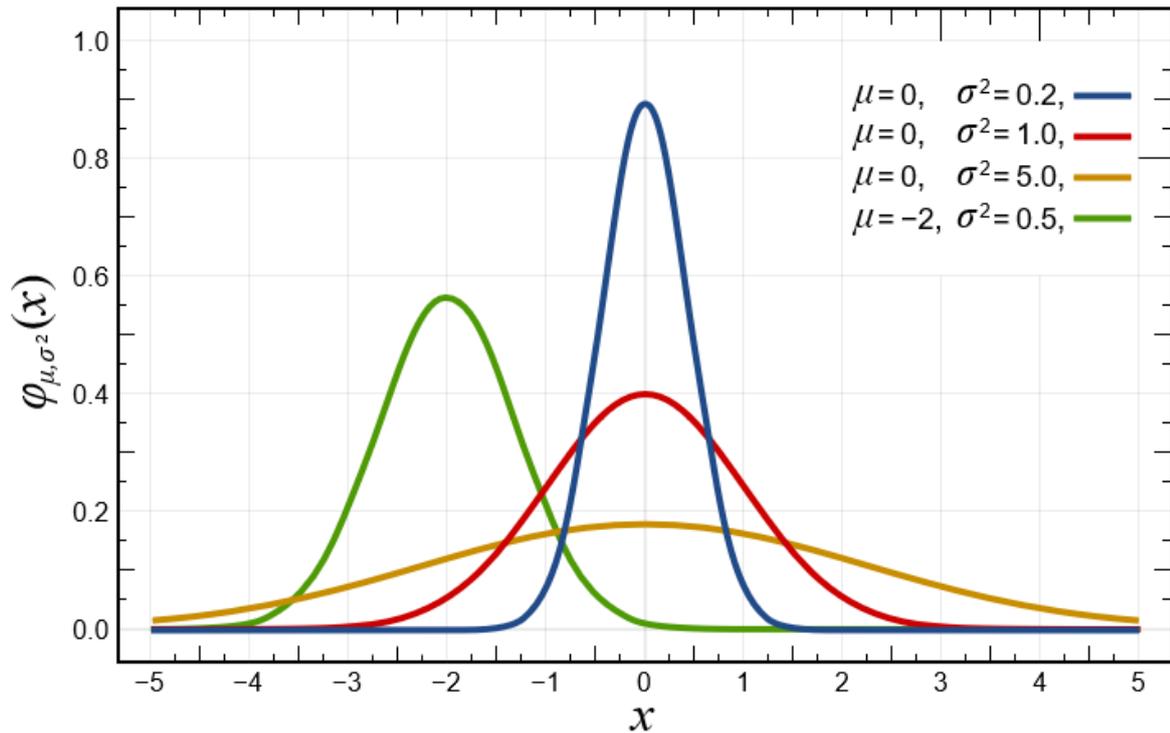


Figure 37 - Exemple de loi gaussienne [8]

La probabilité pour que le bruit b soit compris entre x et $x+dx$ est $p(x)*dx$.

Les signaux délivrés par les instruments de mesure comportent un bruit qui peut être généralement considéré comme gaussien. Cette hypothèse permet de définir l'écart type σ comme l'incertitude type due aux erreurs aléatoires.

III.5.1.1.1 Simulation d'une variable aléatoire gaussienne

Pour bruiteur notre signal on simule une variable aléatoire gaussienne en utilisant la fonction «random.gauss (mu,sigma)» de la bibliothèque « Random » sur python avec une espérance (μ) égale à zéro et un écart type (σ) égale à 5 % de l'amplitude du signal.

On introduit ces bruits plusieurs fois à chacune des datas de notre base de données en gardant le cas non bruité de façon a multiplié le nombre de données d'apprentissage par 10 (on crée à partir de chaque cas 9 nouveaux cas) on passe donc de 469 données d'apprentissage a 4690 données.

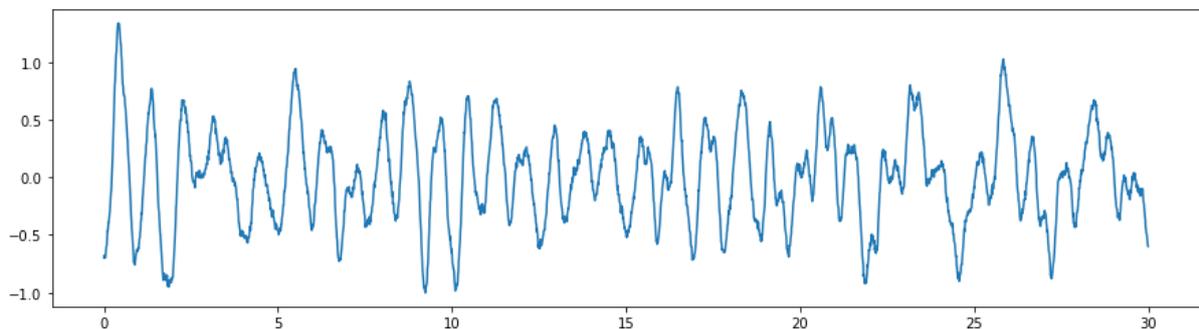


Figure 38 – Signal non bruité (original)

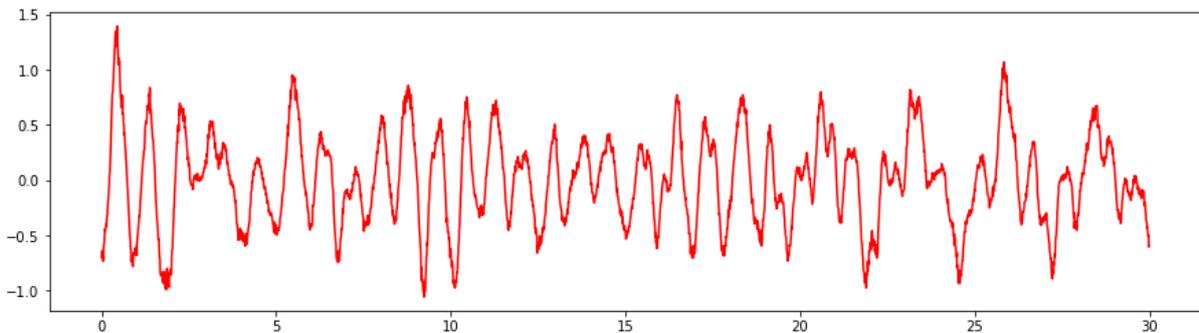


Figure 39 – Signal bruité

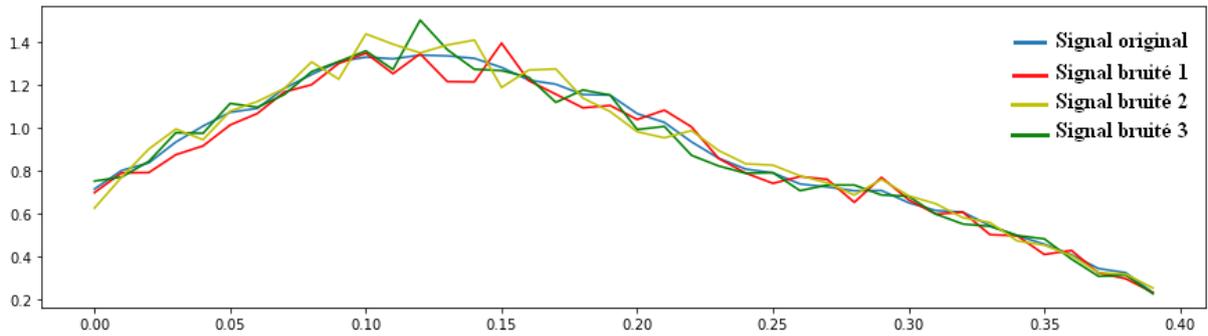


Figure 40 – Zoom sur un signal bruité trois fois

III.5.2 Analyse spectrale

Comme nous l'avons vu précédemment (partie III.4) l'information brute sur une échelle temporelle est très volumineuse et ne peut être interprétée directement, et c'est pourquoi on a choisi de convertir la réponse temporelle en réponse fréquentielle. De plus la réponse fréquentielle de notre structure constitue une réelle signature vibratoire sensible au changement de fréquence propre et des déformés modales ce qui nous renseigne sur l'intégrité de la structure.

Pour cela on divise notre réponse temporelle de 1000 secondes en 35 fenêtres d'environ 28 secondes chacune auxquelles on applique une transformée de Fourier afin de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel puis on calcule la moyenne des ces différentes fenêtres pour avoir la réponse qu'on considèrera par la suite.

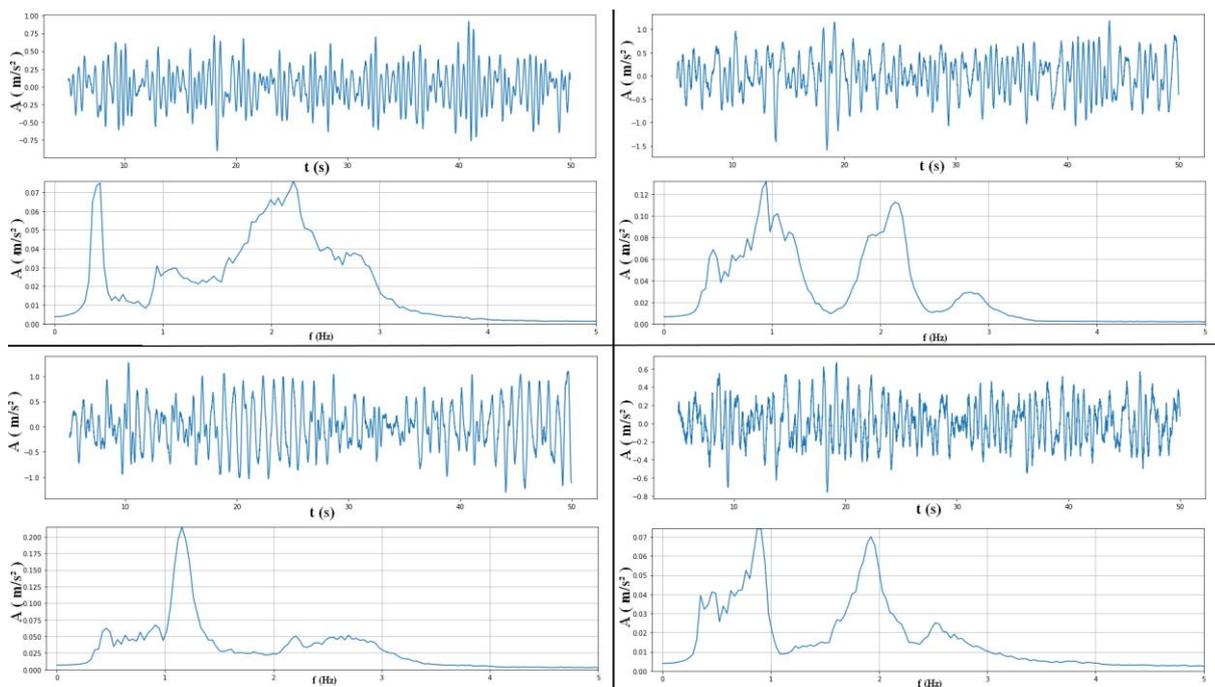


Figure 41 - Exemples de transformations du domaine temporel au domaine fréquentiel

En faisant cette transformation et en prenant en considération uniquement les trois premiers Hertz de la réponse spectrale et ce d'un côté parce que les vibrations ambiantes sont de basses fréquences et au même temps on remarque sur les graphes que la partie la plus grande partie de la réponse est dans cet intervalle-là (voir figure 41). Et en dessinant la courbe avec une distance entre abscisse de points égal à 0,035, on obtient 85 points pour chaque graphe et 47 graphes par cas de dommage ce qui fait donc un vecteur de 3995 dimensions. On normalise ce vecteur en divisant par sa plus grande valeur.

III.5.3 Analyse en composantes principales (ACP)

III.5.3.1 Définition

L'ACP est une méthode de compression des données. Elle sera utilisée ici pour compresser les données importantes que représentent les fonctions de réponses fréquentielles. (revoir la partie I.3.1.1)

III.5.3.2 Application de l'ACP

On applique l'ACP comme suit :

- En utilisant l'ensemble de la base de données d'apprentissage, on forme une matrice $[M]_{m \times n}$ ou 'm' est égal à 3995 et qui représente la signature vibratoire de la structure pour un cas donné, et 'n' est égal à 4690 et qui correspond à nos différents cas d'apprentissages.
- On calcule par la suite la matrice $[C]_{m \times m}$ qui est défini comme étant la matrice de variance-covariance de $[M]_{m \times n}$.
- On calcule à partir de $[C]_{m \times m}$ le vecteur des valeurs propres $\{\lambda\}_m$ et la matrice des vecteurs propres $[V]_{m \times m}$, et on normalise les vecteurs propres.

On appelle axes principaux les axes de direction les vecteurs propres $\{V\}_i$, à chaque axe est associé une variable appelée composante principale C_i . Pour obtenir ces coordonnées, on écrit que chaque composante principale est une combinaison linéaire des variables initiales.

Par exemple : $C_1 = [M]_{1 \times m} * \{V\}_1$

La variance d'une composante principale est égale à l'inertie portée par l'axe principal qui lui est associé. C'est à dire si on considère l'axe principal $\{V\}_i$ son inertie est égale à λ_i .

L'erreur relative de la reconstruction en prenant n axes principaux considérés est égale à :

$$e = \frac{\sum_1^n \lambda_i}{\sum \lambda_i}$$

Le nombre d'axes principaux à considérer dépend d'un compromis, on doit à la fois minimiser le nombre d'axes et minimiser l'erreur relative. Nous traçons la courbe qui nous donne l'erreur en fonction du nombre d'axes principaux considérés :

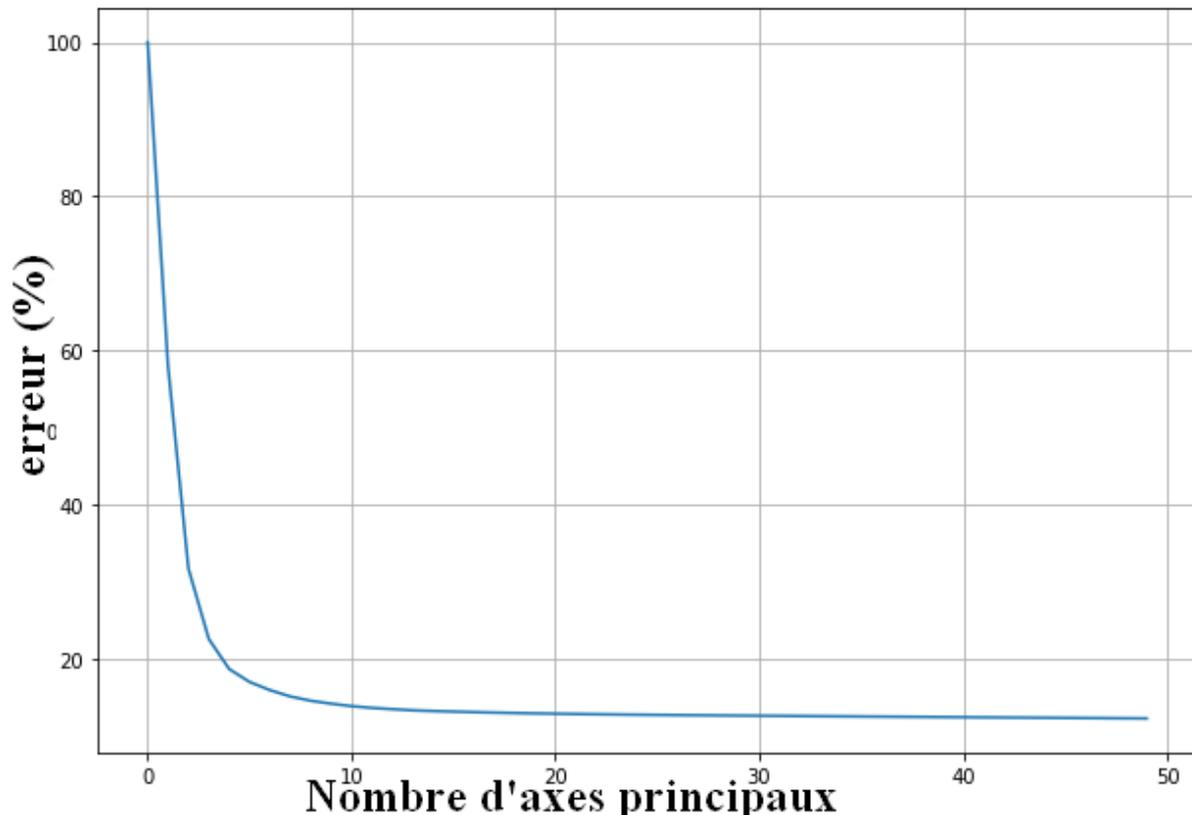


Figure 42 - Erreur relative en fonction du nombre d'axes principaux considérés

On remarque sur la figure que l'erreur décroît très rapidement initialement et puis devient presque monotone, 20 axes principaux semblent être un bon compromis entre précision et nombre d'axes avec une erreur relative égale à 12%.

Pour avoir la nouvelle reconstitution de la base de données il nous suffit désormais de multiplier la matrice $[M]_{n \times m}$ fois la matrice $[V]_{m \times 20}$ en ne considérant que les première colonnes de la matrice $[V]_{m \times m}$.

Cependant, la matrice $[V]_{m \times 20}$ doit être sauvegarder, elle servira ensuite à faire les mêmes transformations pour toutes données supplémentaires.

III.6 Conclusion

Le but de ce chapitre est d'obtenir une base de données d'apprentissage pour notre réseau de neurones. A l'aide de l'outil informatique, on a pu générer puis traiter des accélérogrammes en fonction des zone de dommages choisies qu'on a essayé d'assimiler au maximum à la réalité pour ensuite les traiter mathématiquement afin d'obtenir les fonctions de réponse fréquentielle utilisable à l'apprentissage du réseau de neurones.

On a obtenu au final 4690 cas, dont 39 zones d'endommagements, 12 degrés de dommages et donc 469 cas de dommages. Ce qui est assez acceptable comme base de données pour la suite de cette étude.

Chapitre IV

Identification des dommages par la méthode
des réseaux de neurones artificiels

IV.1 Introduction

Les méthodes qualitatives et non continues sont utilisées depuis longtemps pour évaluer l'intégrité des structures. Depuis le début du XIXe siècle, les taraudeurs de chemin de fer utilisent le bruit d'un marteau frappant la roue du train pour évaluer la présence de dommages. Dans les machines tournantes, la surveillance des vibrations est utilisée depuis des décennies comme technique d'évaluation des performances. Deux techniques dans le domaine des SHM sont les techniques basées sur la propagation des ondes et les techniques basées sur les vibrations. De manière générale, la littérature sur les SHM basés sur les vibrations peut être divisée en deux aspects, le premier dans lequel des modèles sont proposés pour les dommages afin de déterminer les caractéristiques dynamiques, également connus sous le nom de problème direct et le second, dans lequel les caractéristiques dynamiques sont utilisées pour déterminer les caractéristiques des dommages, également connu comme le problème inverse. Avec l'avancée des technologies, des algorithmes de l'intelligence artificielle sont employés dans la détection des dommages des structures. Ils permettent l'identification des dommages car ces algorithmes peuvent résoudre de manière optimale des problèmes complexes. [8]

Dans ce chapitre nous proposons une méthode basée sur un réseau de neurones artificiels qui permet à la fois de détecter, localiser et quantifier l'endommagement.

IV.2 Généralités sur les réseaux de neurones

IV.2.1 Définition

Un réseau de neurones artificiels est un système de traitement d'informations présentant certaines caractéristiques communes avec un réseau de neurones biologiques. Ces réseaux peuvent être appliqués à une grande variété de problèmes, comme pour le stockage, l'extraction, la classification des données et la résolution de problèmes d'optimisation. Ils ont été développés à partir des généralisations des modèles mathématiques de la science cognitive ou de la neurobiologie.

Ces approches se basent sur les hypothèses suivantes :

- Le traitement de l'information s'effectue à partir des neurones.
- Les liaisons entre les neurones permettent la transmission des signaux.
- Chaque liaison est associée à un poids, qui est multiplié par le signal transmis.
- Une fonction d'activation (souvent non linéaire pour reproduire le cadre complexe et non linéaire du cerveau humain) est appliquée à l'entrée d'un neurone, afin de déterminer son signal de sortie.

En conséquence, un réseau neuronal se compose d'un grand nombre d'éléments de traitement, appelés neurones, cellules ou nœuds. Chaque neurone est connecté à d'autres neurones par une liaison directe. Chacune de ces liaisons a un poids associé. Ces poids de pondération représentent l'information et sont utilisés par le réseau pour modéliser une relation.

IV.2.2 Principe de fonctionnement

Le cerveau humain est constitué de près de 10 milliards de neurones biologiques. Un neurone biologique est une cellule vivante, consacrée au traitement de l'information. Des signaux entrants sont traités par le neurone, qui transmet à son tour un signal, si certaines conditions sont réunies le long de la fibre nerveuse à d'autres neurones, ou à de cellules effectrices (cellule musculaire par exemple) : On dit que le neurone est alors activé.

C'est principalement en partant de ce principe que les réseaux de neurones artificiels ont vu le jour. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre de

Chapitre IV Identification des dommages par la méthode des réseaux de neurones artificiels

variables d'entrées, en provenance des neurones en amont. A chacune de ces entrées, est associé un poids w représentatif de la force de connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite, Pour alimenter un nombre de neurones en aval, à chaque connexion est associé un Poids.

Pour bien comprendre le fonctionnement d'un réseau de neurone, on donne les définitions suivantes :

Neurone : Un neurone est tout simplement une fonction, dotée de paramètres. Cette fonction est :

$$\text{Output} = \text{activation} (w_{1x1}+w_{2x2}+\dots+w_{n \times n}).$$

L'entrée (input) est fournie par les données, ou bien par les sorties des neurones précédents. C'est le vecteur (x_1, x_2, \dots, x_n) .

Les poids du neurone sont les valeurs (w_1, w_2, \dots, w_n) . Ce sont les seuls valeurs qui sont propres au réseau de neurone. Lorsque l'on sauvegardera sur le disque notre réseau entraîné, ce seront ces poids qui seront enregistrés.

Les poids d'un réseau de neurone, avec son architecture (nombre de couches, nombre de neurones sur chaque couche), le définissent entièrement.

La sortie (output), est un nombre réel, donné par la fonction ci-dessus.

Et la fonction d'activation est une fonction souvent non linéaire. Nous verrons plus bas les différentes fonctions d'activation habituellement utilisées.

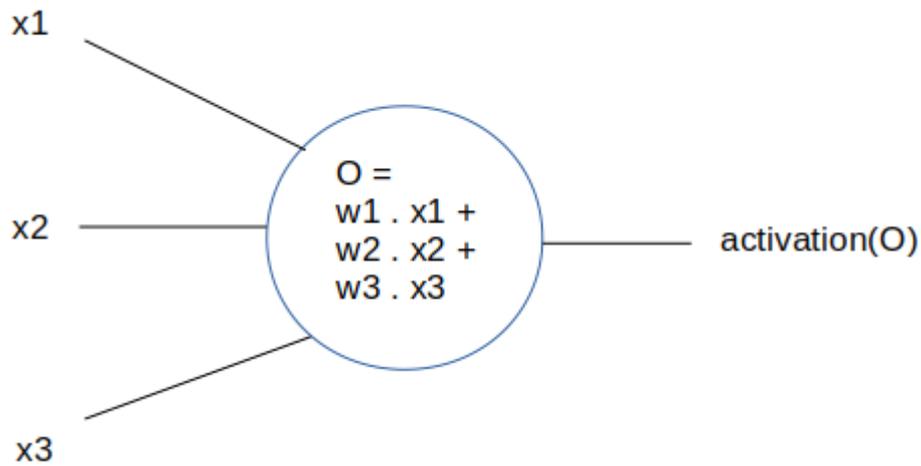


Figure 43 - schéma représentant un neurone artificiel [30]

Le réseau : Un réseau est constitué habituellement de couches successives de neurones placés en parallèle.

Chaque neurone prend son entrée depuis la sortie des neurones de la couche précédente. On appelle "fully connected layer" lorsque pour chaque neurone, sa sortie est reliée à tous les neurones de la couche suivante. Il existe d'autres types de couche, où les neurones ne sont pas nécessairement connectés à tous les neurones de la couche précédente. Un exemple est le réseau de neurone convolutif (convolutional neural network), qui est particulièrement adapté pour le traitement d'images en raison de son architecture.

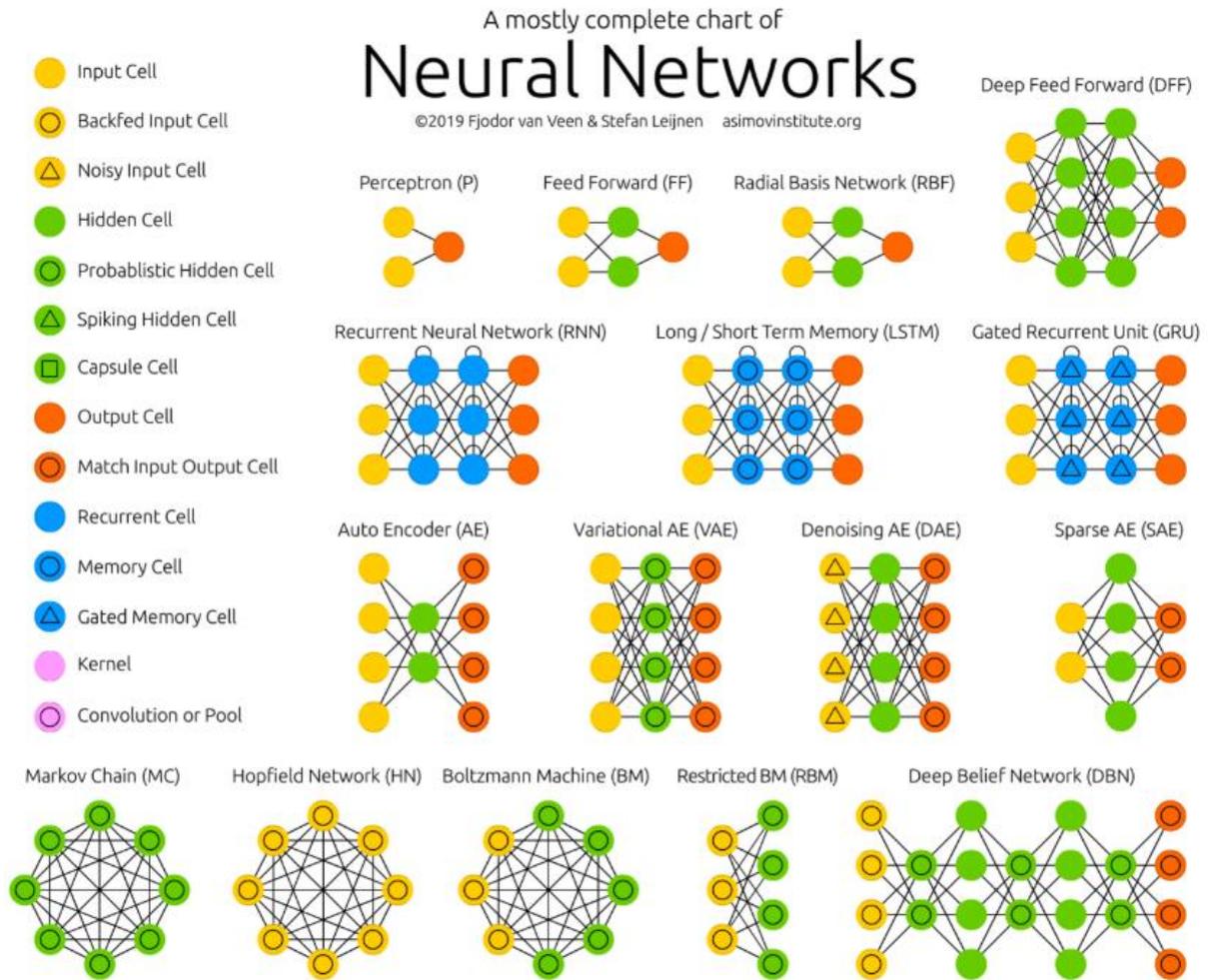


Figure 44 - Exemple de réseaux de neurones [31]

Fonction d'activation : La fonction d'activation d'un neurone permet de calculer sa sortie en fonction de ses entrées.

Si on utilise la fonction identité ($f(x)=x$), alors le neurone représentera une simple combinaison linéaire des inputs, et des poids. En général, on utilise des fonctions non linéaires.

On peut se demander pourquoi un réseau de neurone a-t-il besoin de ces fonctions d'activations non linéaires. C'est précisément cette non linéarité qui donne toute sa puissance au réseau de neurone, et le rend capable d'approximer n'importe quelle fonction continue.

Chapitre IV Identification des dommages par la méthode des réseaux de neurones artificiels

En fait, un réseau de neurone sans ces non linéarités, avec uniquement des combinaisons linéaires, n'est d'aucune utilité, car il peut être simplifié lui-même en une combinaison linéaire. Ajouter des couches n'a aucune influence sur la puissance de représentation du réseau. [30]

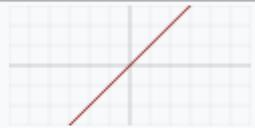
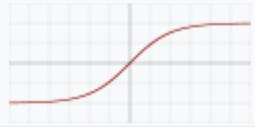
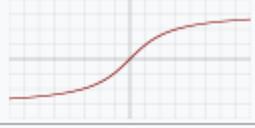
| Nom | Graphe | Équation |
|---|---|--|
| Identité/Rampe |  | $f(x) = x$ |
| Marche/Heaviside |  | $f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$ |
| Logistique (ou marche douce, ou sigmoïde) |  | $f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ |
| Tangente hyperbolique |  | $f(x) = \tanh(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1$ |
| Arc tangente |  | $f(x) = \tan^{-1}(x)$ |
| Signe doux ⁶ |  | $f(x) = \frac{x}{1 + x }$ |
| Unité de rectification linéaire (ReLU) ⁷ |  | $f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ x & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$ |

Tableau 6 - Exemples de fonctions d'activations [8]

IV.3 Conception du réseau

C'est une question très difficile. Il existe des heuristiques qui peuvent être utilisées et souvent la meilleure structure de réseau se trouve à travers un processus d'expérimentation par essais et erreurs. En règle générale, Le réseau doit être suffisamment profond et large pour capturer la structure du problème.

Le réseau que nous avons choisi est de type « Feed-forward fully connected ». Nous l'avons adopté pour sa simplicité, sa fiabilité et son utilisation dans le domaine de la détection et prédiction des dommages, notamment Kudva qui a utilisé un réseau de neurones similaire pour identifier un dommage dans une plaque raidie, les auteurs ont trouvé que le réseau de neurones était capable de prédire la localisation exacte du dommage mais le degré d'endommagement était plus problématique. Wu, et al. (1992) ont utilisé un réseau Feed-forward à un bâtiment de trois étages ayant subi une excitation sismique. Spillman et al. ont utilisés un fully connected réseau pour identifier les dommages dans un pont métallique. Dans une étude similaire, Rhim and Lee (1994) ont utilisé un réseau Feed-forward dans le but d'identifier une délamination dans un pont en treillis à éléments composites. De très bons résultats ont été obtenus dans la détection d'endommagement dans les modèles numériques des structures. [26]

Pour mettre en œuvre notre réseau de neurones, on a utilisé la bibliothèque **keras** de python, c'est une bibliothèque open source qui permet un deep learning, elle vise à être conviviale, modulaire et extensible. Il a été développé dans le cadre de l'effort de recherche du projet ONEIROS (système d'exploitation de robot intelligent neuro-électronique à composition non limitée), et son principal auteur et mainteneur est François Chollet, ingénieur Google. [8]

Dans notre étude, on a utilisé un réseau avec une couche d'entrées de 20 neurones, 3 couches cachées de neurones constituées chacune de 80 neurones et la couche de sortie est constituée de 41 neurones. La fonction d'activation adoptée pour les couches cachées et de la couche de sortie est la sigmoïde [Tableau 6].

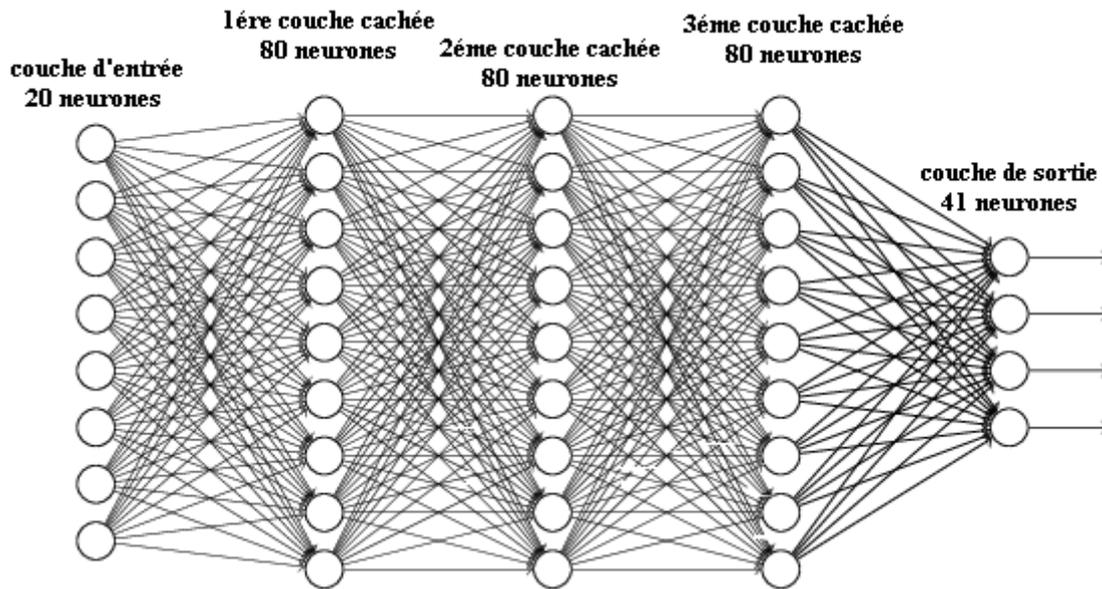


Figure 45 - Schéma du réseau adopté

Entrées du réseau (Input) : Le réseau prend comme entrée 20 paramètres réels issus de l'analyse en composantes principales (voir partie III.5.3.2)

Sorties du réseau (Output) : Comme sortie notre réseau nous donne 41 paramètres (neurones) réels compris entre 0 et 1.

- **Détection du dommage :** La détection de la présence d'un quelconque dommage dans la structure se fait à travers le neurone numéro 1, ce neurone renvoie 0 pour une structure endommagée et 1 pour une structure saine (une valeur entre 0 et 1 correspond à la probabilité pour que la structure soit saine), autrement dit il nous permet de faire la différence entre la structure saine et la structure endommagée sans donner plus de détail. En pratique il sert à tirer l'alarme. On pourrait par exemple imaginer recevoir une alerte quand sa valeur est en dessous d'un certain seuil. Les autres neurones sont ignorés quand la valeur de celui-ci est proche de 1.
- **Localisation du dommage :** la localisation du dommage se fait à l'aide de 39 neurones (du neurone 2 au neurone 40), chacun correspondent à une zone d'endommagement précise, Il renvoie la probabilité que la zone soit endommagée (0 si la zone est saine et 1 pour endommagée). On pourrait donc considérer par exemple que la zone endommagée est celle dont la probabilité indiquée est la plus grande, néanmoins il est

Chapitre IV Identification des dommages par la méthode des réseaux de neurones artificiels

préférable de visualisé l'intégralité des probabilités pour estimer le degré de certitude de l'indication.

- **Quantification du dommage** : Pour simplifier l'étude on a choisi de ne prendre qu'un seul neurone pour quantifier le dommage de l'ensemble des zones (idéalement chaque zone aurait eu un neurone spécifique à elle). Ce neurone renvoie une valeur entre 0 et 1 correspondant à la rigidité de la zone endommagé ou 1 indique une rigidité identique à la rigidité initial et par exemple 0,8 correspond à une baisse de rigidité de 20%.

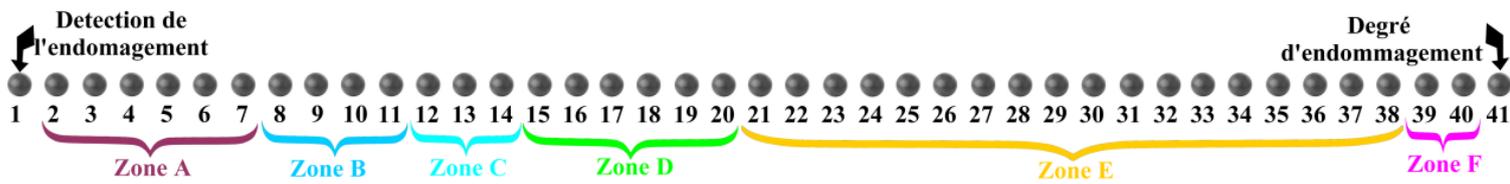


Figure 46 – Schéma représentatif des inputs de l'algorithme

IV.4 Apprentissage du réseau

On a vu dans le chapitre précédent qu'on a dans notre base de données 4690 cas.

On divise par la suite ces données en trois sous ensemble défini comme suit :

- Données d'apprentissages : qui représentent la majorité écrasante des donnée (83%) et c'est sur ces données que l'apprentissage sera fait et seront utilisées pour calculer les gradients et optimiser les pondérations.
- Données de validation : elles représentent environ 8,5 % des données globales et on les sélectionne en prenant un cas d'endommagement pour chaque zone de dommage. Ces données n'interviennent pas de façon directe dans la phase d'apprentissage mais nous servent comme condition d'arrêt pour éviter le sur apprentissage (overfitting).
- Données test : elles représentent environ 8,5 % des données globales et sont sélectionnées de la même manière que les données de validation, Elles sont utilisées à la fin de l'apprentissage pour évaluer la performance du réseau sur de nouvelles données.

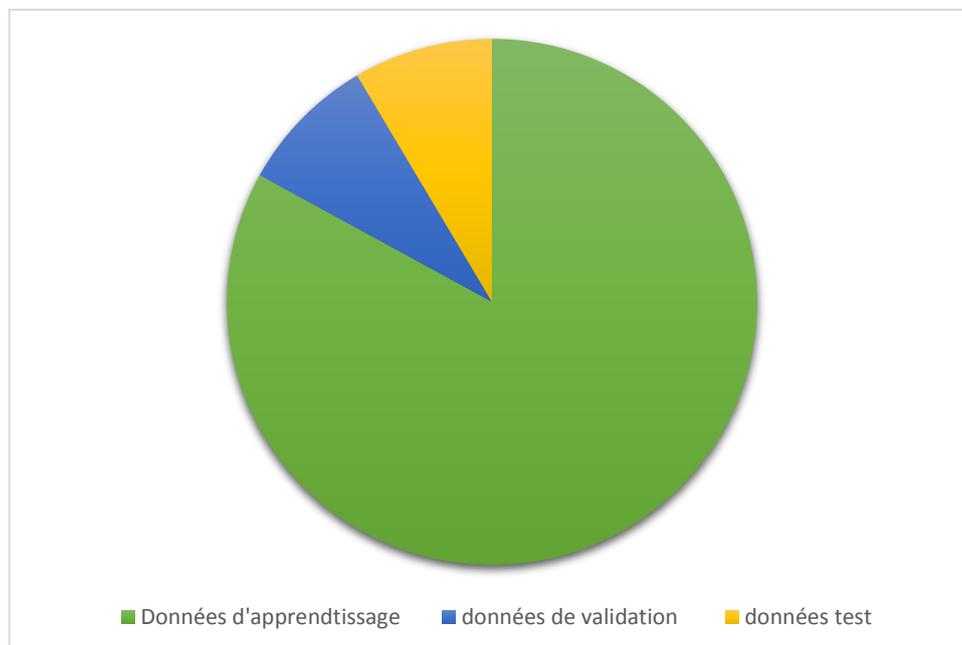


Figure 47 - Sous ensemble de la base de données initiales

IV.5 Résultats et interprétations

Après une certaine durée d'apprentissage nous avons obtenu les résultats suivant sur les données initiales :

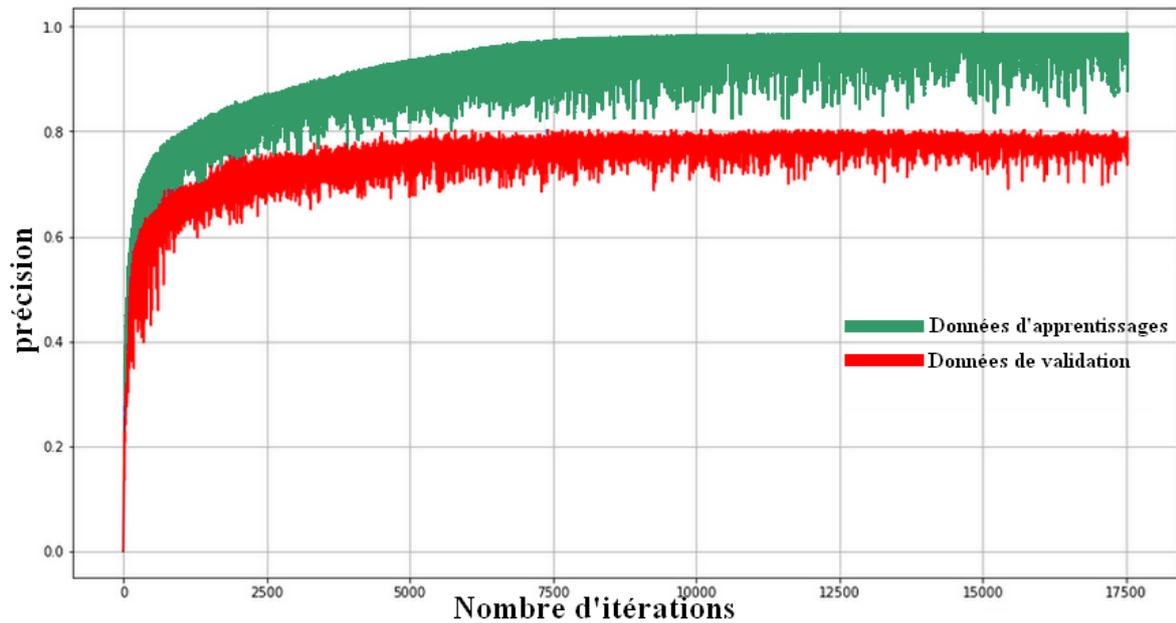


Figure 48 - Courbe montrant l'évolution de la précision sur les données d'apprentissage et les données de validation en fonction des itérations

La précision obtenue sur les différents sous-ensembles de données :

- **Données d'apprentissage** : précision égale à **98,4 %**
- **Données de validation** : précision égale à **79,5 %**
- **Données de test** : précision égale à **81,3 %**

IV.5.1 Résultats de l'estimation du degré d'endommagement

Pour quantifier la précision de l'algorithme sur l'estimation du degré d'endommagement :

- On trace (figure 49, figure 50, figure 51). Les histogrammes nous donnent les distributions de l'erreur qu'on calcule avec l'expression suivante :

$$\text{Erreur} = \text{Rigidité prédite} - \text{Rigidité réelle (simulée)}$$

Ces histogrammes sont tracés avec des classes (intervalles) de longueur égale à 0,01.

- On calcule quelques paramètres statiques pratiques qu'on note dans le tableau 7.
- On trace les courbes de régression linéaire des valeurs prédites en fonction des valeurs visées données dans la figure 52, la figure 53 et la figure 54.

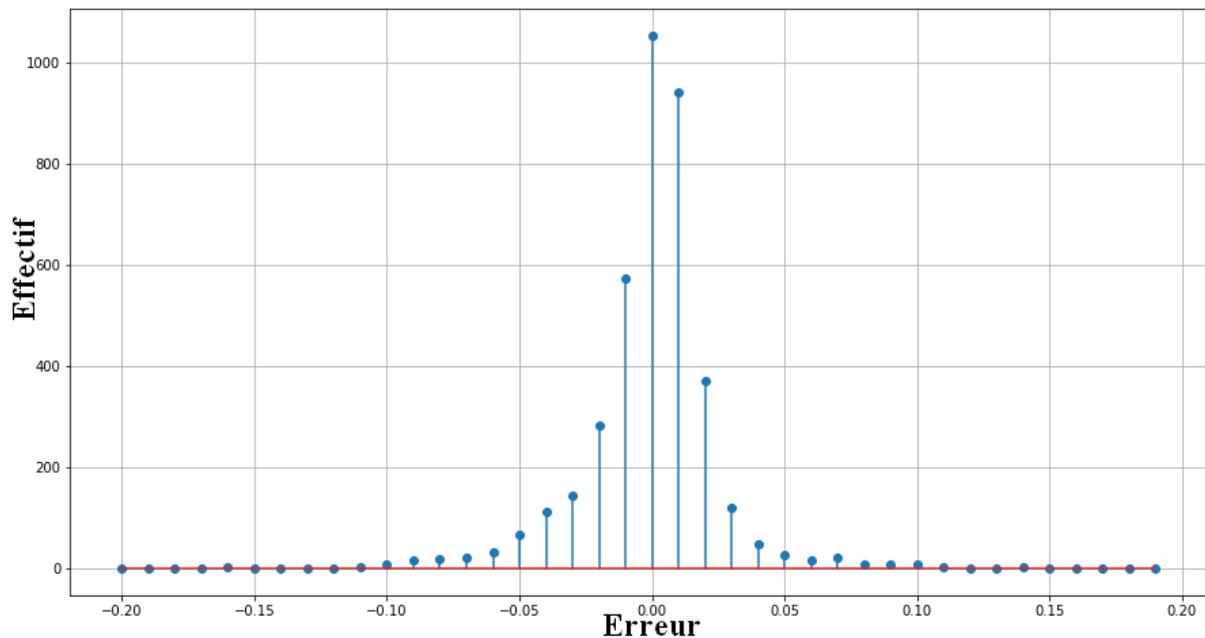


Figure 49 - Histogramme montrant l'erreur de l'estimation de la rigidité sur les données d'apprentissage

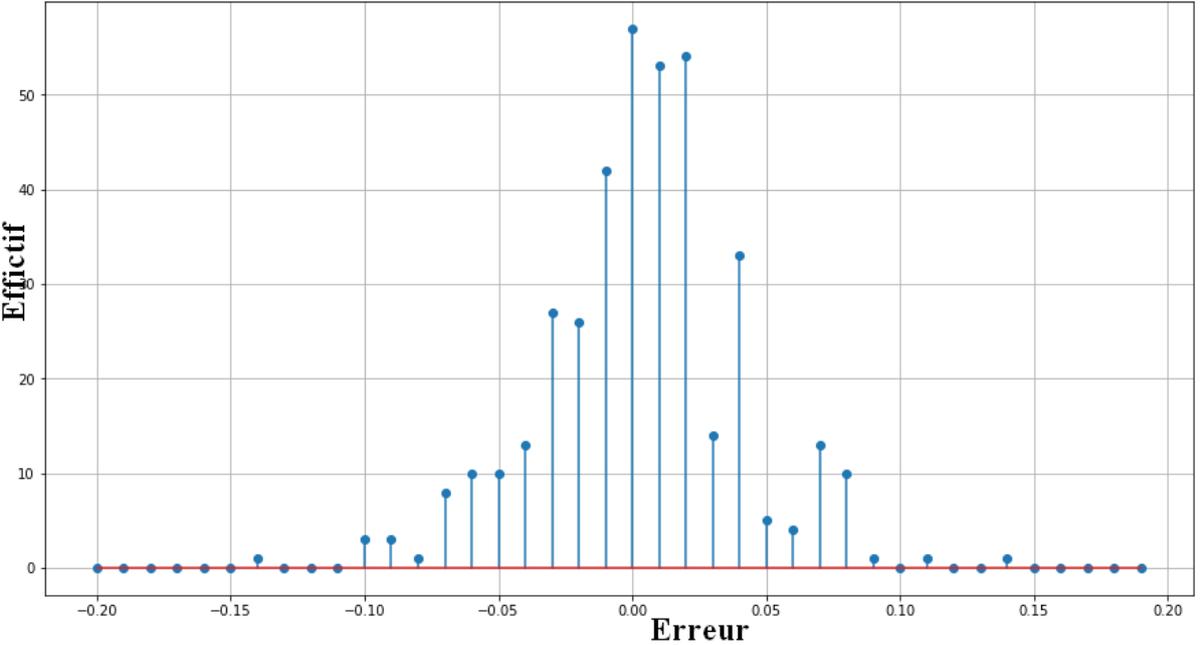


Figure 50 - Histogramme montrant l'erreur de l'estimation de la rigidité sur les données de test

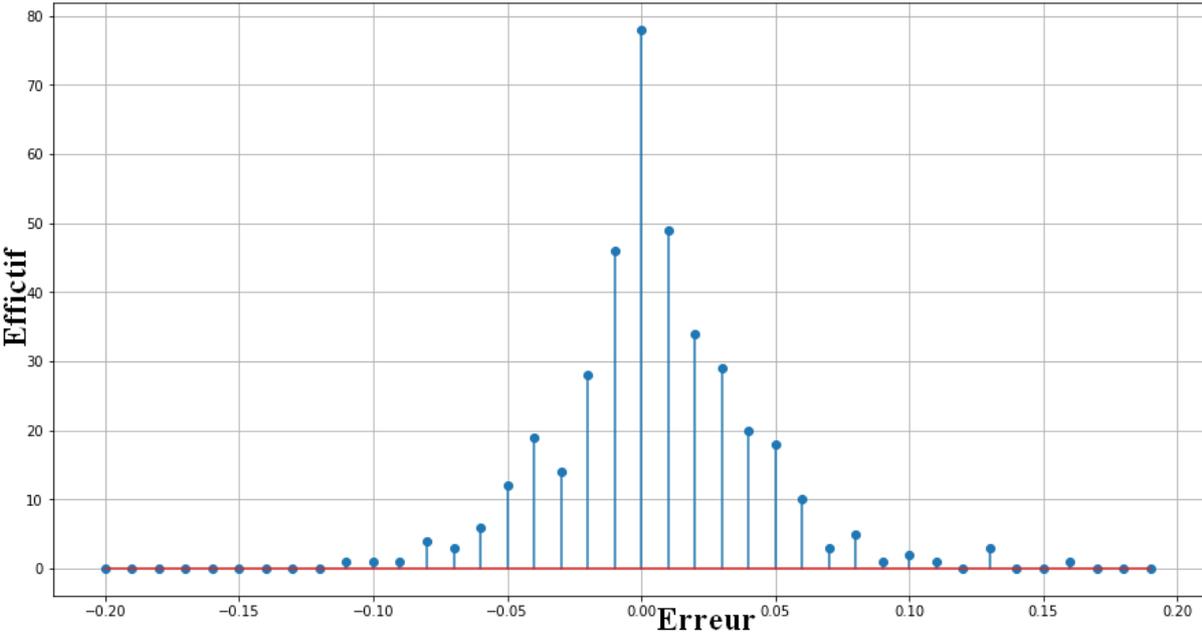


Figure 51 - Histogramme montrant l'erreur de l'estimation de la rigidité sur les données de validation

Chapitre IV Identification des dommages par la méthode des réseaux de neurones artificiels

Les paramètres statistiques les plus importants sont résumés dans le tableau suivant :

| | Effectif | Erreur max | Erreur min | Étendu de l'erreur | Médiane | Erreur moyenne | Écart Type |
|--------------------------|----------|------------|------------|--------------------|---------|----------------|------------|
| Données préapprentissage | 3910 | 0,17414 | -0,15740 | 0,33154 | 0,00205 | -0,00047 | 0,02435 |
| Données de validation | 390 | 0,23450 | -0,10648 | 0,34098 | 0,00230 | 0,00573 | 0,03731 |
| Données de Test | 390 | 0,14308 | -0,14304 | 0,28612 | 0,00121 | 0,00319 | 0,03641 |

Tableau 7 – Quelques paramètres statistiques utiles de l'erreur

Valeur estimée \approx 0.957 x Valeur visée + 0.0287

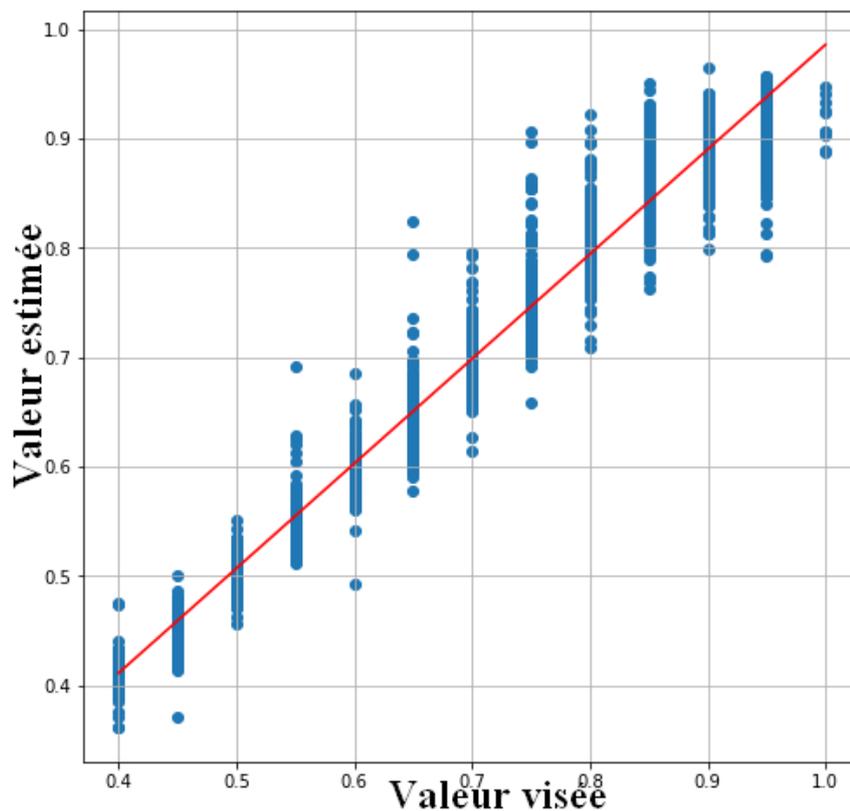


Figure 52 - Courbe de régression de l'estimation de la rigidité sur données d'apprentissage

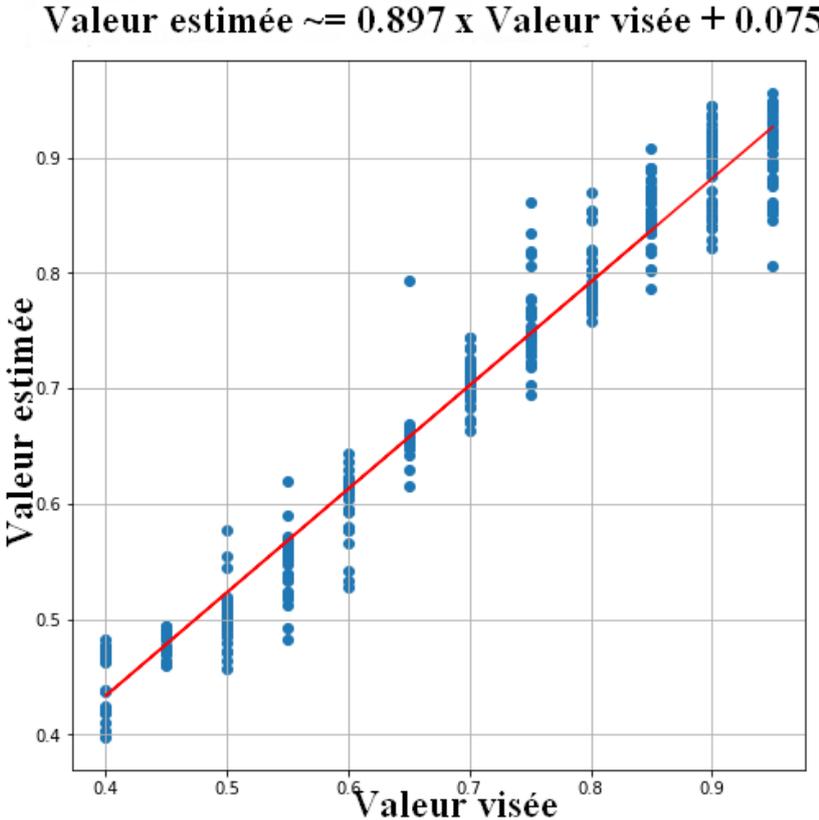


Figure 53 - Courbe de régression de l'estimation de la rigidité sur données de test

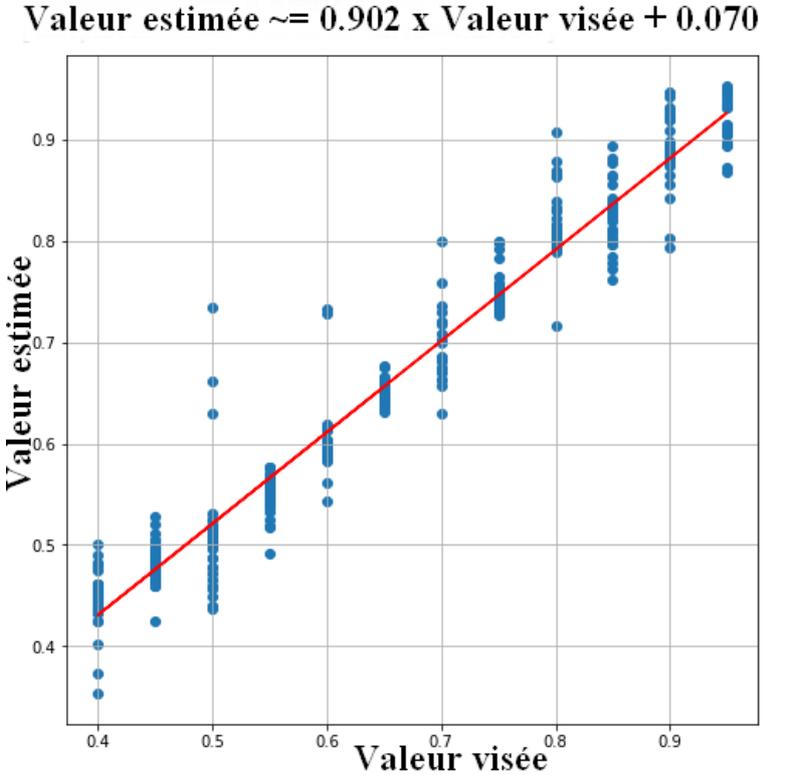


Figure 54 - Courbe de régression de l'estimation de la rigidité sur données de validation

Observations :

- La fonction de répartition de l'erreur de prédiction semble suivre la loi normale centrée
- La moyenne est très proche de zéro, l'algorithme n'a donc pas de tendance sur-estimatrice ou sous-estimatrice de l'endommagement.
- Bien que l'étendue de l'erreur soit relativement élevée dans les trois cas, l'écart type quant à lui reste relativement faible ce qui nous permet de dire qu'en général l'erreur est faible.
- On observe dans les graphes de régression notamment celui sur les données d'apprentissage que l'erreur diminue avec la diminution de la rigidité (augmentation du degré de dommage), l'algorithme estime avec plus de précision le dommage quand il est important.

IV.5.2 Résultats de la détection de l'emplacement de l'endommagement

Pour quantifier la précision de l'algorithme sur la détection des zones de dommage nous avons classé les prédictions faites en trois catégories :

- **Très bonne détection** : on considère que la précision de la prédiction est très bonne quand la plus grande probabilité indiquée par l'algorithme correspond exactement à la zone et à la sous-zone de dommages (par exemple : endommagement en B2 et prédiction en B2)
- **Moyenne détection** : on considère que la précision de la prédiction est moyenne quand la plus grande probabilité indiquée par l'algorithme ne correspond pas à la sous-zone de dommage mais reste dans la même zone (par exemple : endommagement en A1 et prédiction en A5)
- **Mauvaise détection** : on considère que la détection est mauvaise dans le cas où la plus grande probabilité indiquée par l'algorithme ne correspond ni à la sous-zone ni à zone de dommage (par exemple : endommagement en C1 et prédiction en D2)

Chapitre IV Identification des dommages par la méthode des réseaux de neurones artificiels

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

| | Total | | Très bonne détection | | Moyenne détection | | Mauvaise détection | |
|-------------------------|---------------|-----------------|----------------------|-----------------|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | Nombre de cas | Pourcentage (%) | Nombre de cas | Pourcentage (%) | Nombre de cas | Pourcentage (%) | Nombre de cas | Pourcentage (%) |
| Données d'apprentissage | 3910 | 100 | 3855 | 98,6 | 37 | 1 | 18 | 0,4 |
| Données de test | 390 | 100 | 334 | 85,6 | 39 | 10 | 17 | 4,4 |
| Données de validation | 390 | 100 | 330 | 84,6 | 46 | 11,7 | 14 | 3,7 |

Tableau 8 – Tableau représentant les pourcentages de précisions

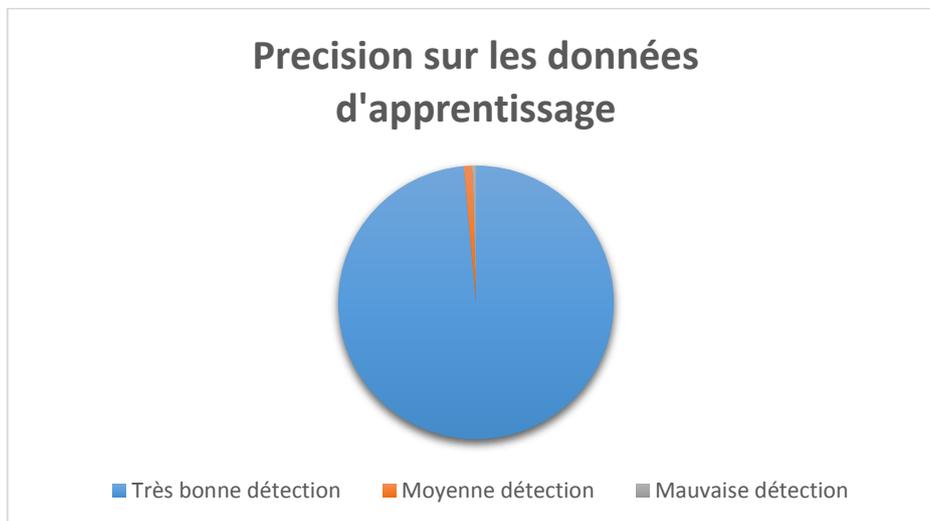


Figure 55 – Précision sur les données d'apprentissage

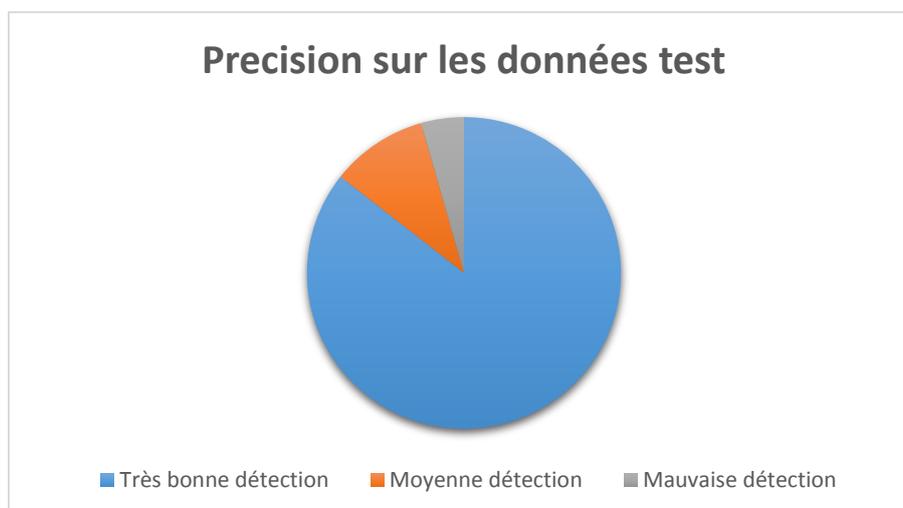


Figure 56 – Précision sur les données test

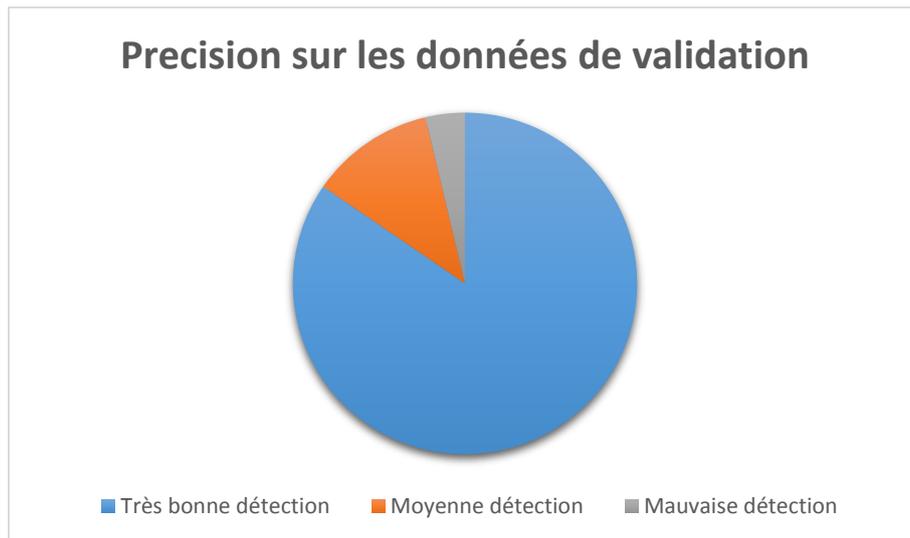


Figure 57 – Précision sur les données de validation

Observations :

- Les résultats nous montrent que l’algorithme a une très bonne performance même sur des données qu’il n’a jamais rencontrées auparavant.
- La précision de la détection est recevable dans plus de 95 % des cas.

IV.6 Test de la méthode sur de nouveaux cas de dommage

Pour tester l'efficacité de cette méthode, on génère aléatoirement une nouvelle base de données en prenant aléatoirement un entier entre 1 et 39 pour la zone de dommage et aléatoirement un réel entre 0,4 et 1 pour le degré d'endommagement. En premier lieu on génère 320 cas qu'on considère sans introduire de bruit, puis on introduit un bruit pour ces même cas.

Les résultats obtenus ce résume dans les tableaux et les figures suivants :

On trace les histogrammes qui nous donnent les distributions de l'erreur qu'on calcule avec l'expression suivante données dans la figure 58 et la figure 59 :

$$\text{Erreur} = \text{Rigidité prédite} - \text{Rigidité réel (simulé)}$$

Ces histogrammes sont tracés avec des classes (intervalles) de longueur égale à 0,01.

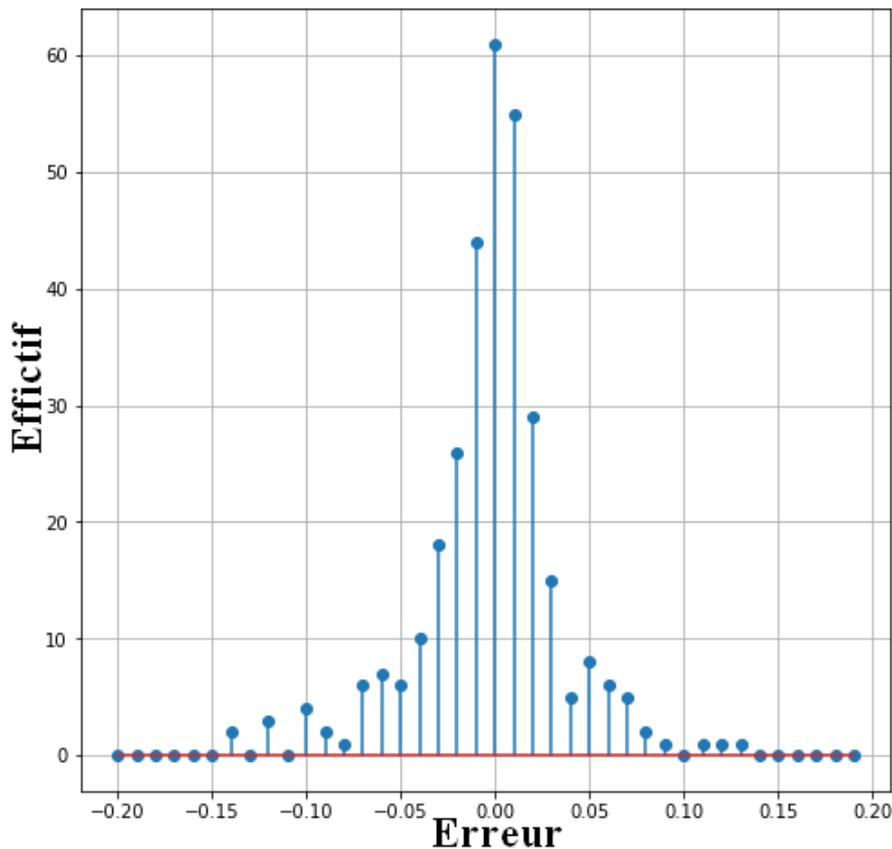


Figure 58 - Histogramme montrant l'erreur de l'estimation de la rigidité sur les données avec bruits

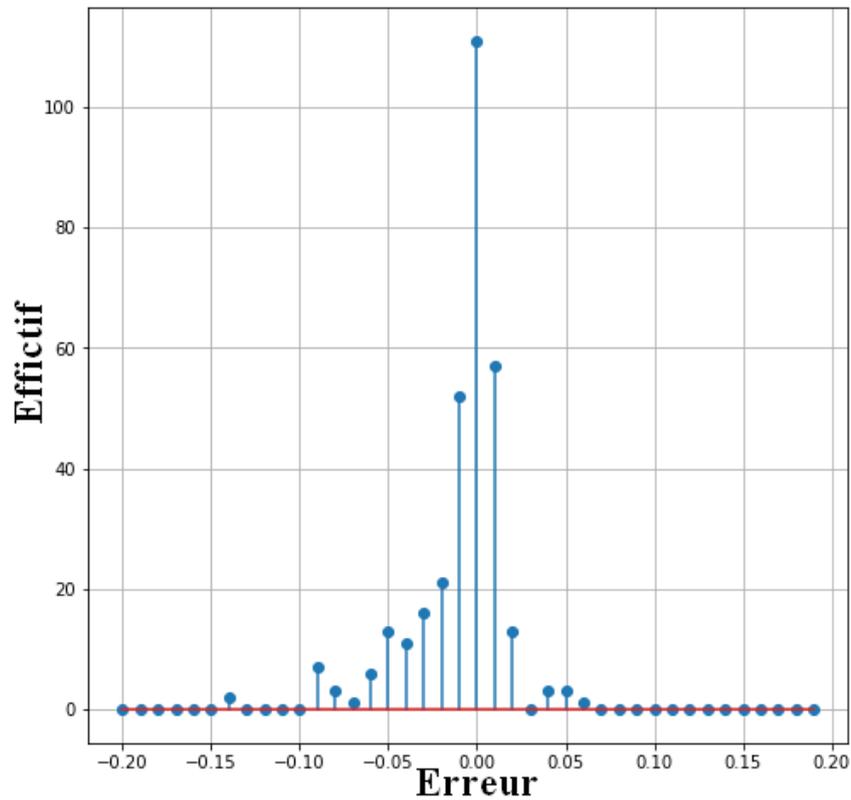


Figure 59 - Histogramme montrant l'erreur de l'estimation de la rigidité sur les données sans bruits

| | Effectif | Erreur max | Erreur min | Étendu de l'erreur | Médiane | Erreur moyenne | Écart Type |
|---------------------|------------|----------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| Données Sans bruits | 320 | 0,05670 | -0,13962 | 0,19632 | -0,00239 | -0,00891 | 0,02604 |
| Données avec bruits | 320 | 0,12970 | -0,21511 | 0,34481 | 0,00031 | -0,00314 | 0,03828 |

Tableau 9 - Quelques paramètres statistiques utiles sur l'erreur de prédiction de la rigidité

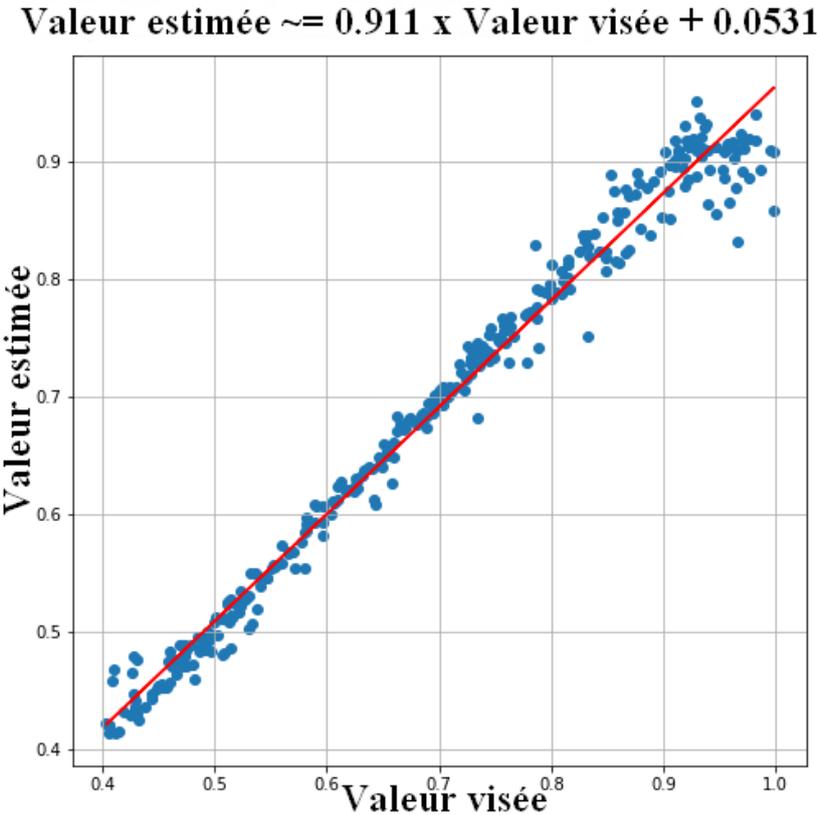


Figure 60 - Courbe de régression de l'estimation de la rigidité sur données sans bruits

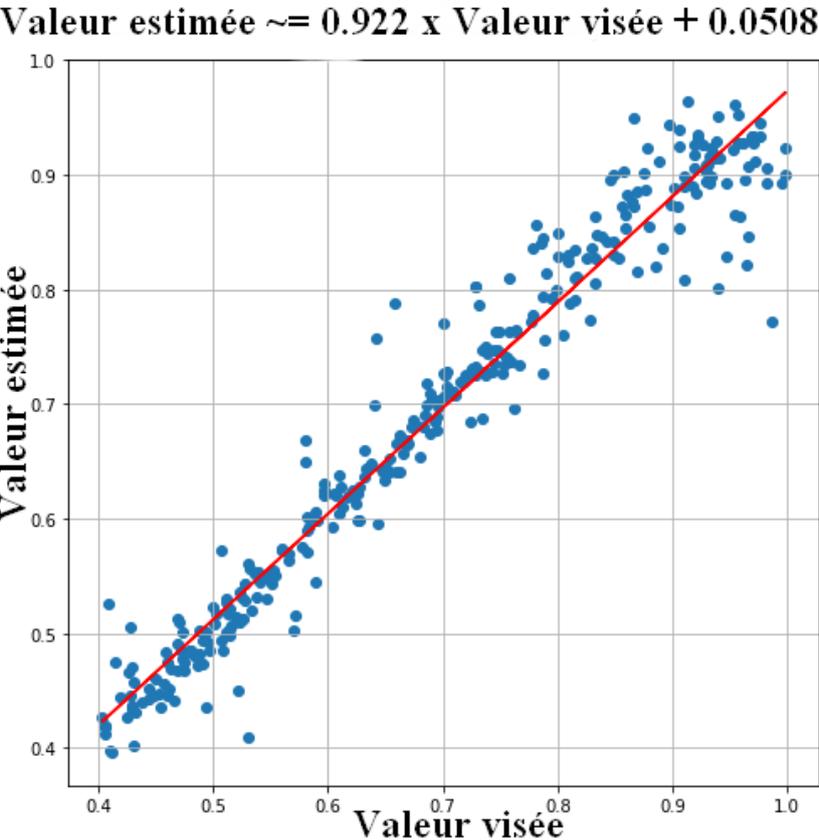


Figure 61 - Courbe de régression de l'estimation de la rigidité sur données avec bruits

| | Total | | Très bonne détection | | Moyenne détection | | Mauvaise détection | |
|---------------------|---------------|-----------------|----------------------|-----------------|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | Nombre de cas | Pourcentage (%) | Nombre de cas | Pourcentage (%) | Nombre de cas | Pourcentage (%) | Nombre de cas | Pourcentage (%) |
| Données Sans bruits | 320 | 100 | 296 | 92,5 | 12 | 3,75 | 12 | 3,75 |
| Données Avec bruits | 320 | 100 | 273 | 85,3 | 31 | 9,7 | 16 | 5 |

Tableau 10 - tableau représentant les pourcentages de précisions

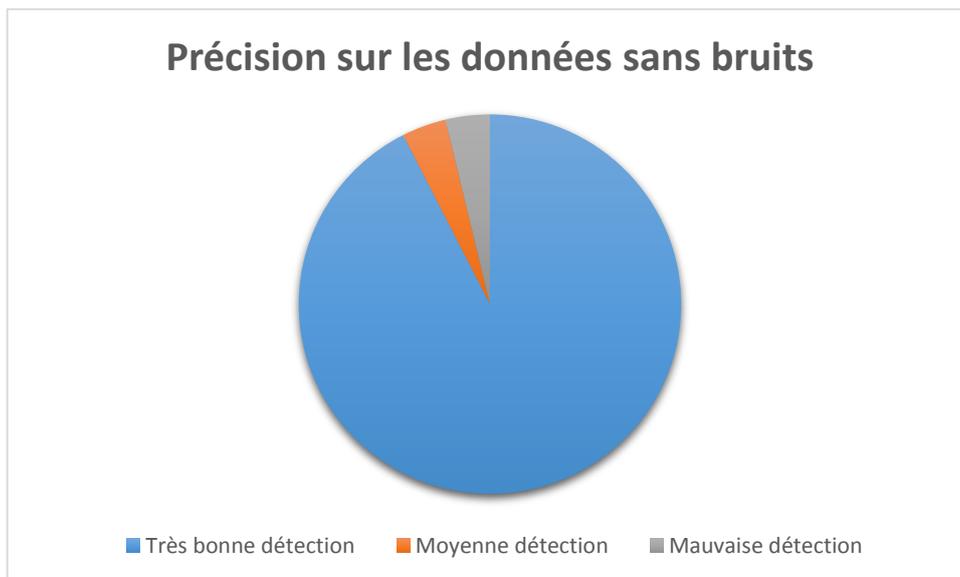


Figure 62 – Précision sur les données sans bruits

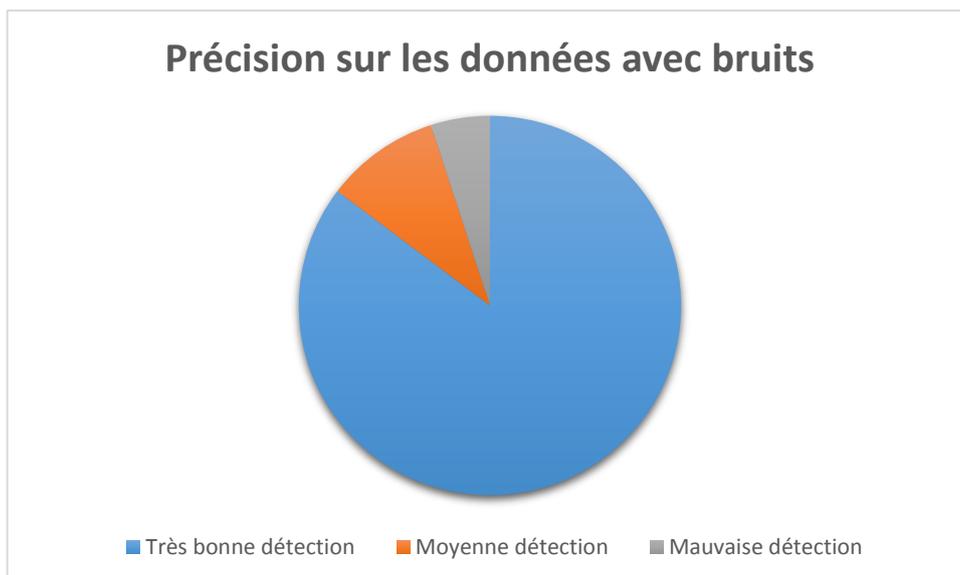


Figure 63 – Précision sur les données avec bruits

Observations :

- On remarque que la fonction de répartition de l'erreur de prédiction semble suivre la loi normale centrée.
- La moyenne est très proche de zéro (voir tableau9), l'algorithmie n'a donc pas de tendance sur-estimatrice ou sous-estimatrice de l'endommagement.
- Bien que l'étendue de l'erreur soit relativement élevée dans les deux cas, l'écart type quant à lui reste relativement faible ce qui nous permet de dire qu'en général l'erreur est faible.
- On observe dans les graphes de régression que l'erreur diminue avec la diminution de la rigidité (augmentation du degré de dommage), l'algorithme estime avec plus de précision le dommage quand il est important.
- Les résultats nous montrent que l'algorithme a une très bonne performance même sur de nouvelles données.
- Dans plus de 95 % des cas, la précision de la détection est recevable.
- Ces données donnent des résultats pratiquement similaires à ceux donnés par la base de données initiale.
- On remarque que la précision est plus importante dans les données qui ne contiennent pas de bruits.

IV.7 Conclusion:

La méthode élaborée donne généralement de bons résultats que cela soit sur la localisation ou sur la quantification du dommage. On remarque néanmoins que plus le dommage est important mieux il est détecté par la méthode.

Dans l'ensemble les réseaux de neurones paraissent adaptés à ce genre de problèmes (Problème de la SHM). L'étude nous a permis d'avoir un aperçu sur les performances que peut avoir ce genre de méthodes appliquées dans ce domaine.

Conclusion et perspectives

La surveillance des ponts représente un enjeu important vue leur influence économique et stratégique. Elle permet de prévoir les moindres détériorations structurelles afin de prolonger leur durée de vie et d'éviter leur effondrement en apportant les réparations nécessaires.

Toute surveillance de santé d'une structure doit être précédée par une étude visant à optimiser le nombre de capteurs utilisés et leurs emplacements afin de récolter des données utiles et suffisantes pour une surveillance assez précise de la structure et ce en raison de l'infinité des degrés de liberté d'une structure et de l'impossibilité pratique et économique de placer une infinité de capteurs.

A l'aide d'une méthode hybride basée sur les algorithmes génétiques et le critère d'identification MAC, on a effectué une optimisation du nombre et des emplacements des capteurs. Ceci est une première étape cruciale dans le cheminement qui mène à l'identification des dommages du pont.

L'approche adoptée dans cette étude consiste à simuler des endommagements potentiels, et ce à l'aide de l'outil informatique (Le logiciel SAP2000). Puis traiter les données d'accélération récoltées lors de la simulation, en premier lieu en passant du domaine temporel au domaine fréquentiel puis en appliquant une analyse en composantes principales et ceci afin de réduire les inputs.

On a obtenu au final 4690 cas, dont 39 zones d'endommagements, 12 degrés de dommages et donc 469 cas de dommages. Ce qu'on a jugé acceptable comme base de données pour l'apprentissage du réseau de neurones qui servira à la détection des dommages.

Dans le dernier chapitre, on a pu montrer que la méthode élaborée donne généralement de bons résultats que cela soit sur la localisation ou sur la quantification des dommages.

Cette étude n'est pas exhaustive, elle offre au contraire des perspectives :

- On pourrait aller vers une meilleure optimisation des capteurs en améliorant la fonction objective de l'algorithme génétique en lui rajoutant plus de critères.
- En réduisant les hypothèses de travail notamment sur les vibrations ambiantes, on peut obtenir des résultats plus proches du cas réel.

Références bibliographiques

- [1] F. O. FRIGUI, «Contribution au développement d'un système de surveillance des structures en génie civil,» Toulouse, 2018.
- [2] «IT Industries & technologies,» [En ligne]. Available: <https://www.industrie-techno.com>. [Accès le 13 Mai 2020].
- [3] L. Mevel, «Données, SHM et analyse statistique,» chez *1ère Journée nationale SHM-France*, Renne, 2018.
- [4] H. Chen, *Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures*, University of Greenwich, United Kingdom, 2018.
- [5] A. Plankis, «STRUCTURAL HEALTH MONITORING MEMS SENSORS USING ELASTICITY-BASED BEAM VIBRATIONS,» Fort Collins, Colorado, 2012.
- [6] Z. Wang, R.M. Lin, M.K. Lim, «Structural damage detection using measured FRF data, School of Production and Mechanical Engineering,» *Computer methods applied in mechanics and engineering*, pp. 187-197, 16 Janvier 1997.
- [7] kassambara, «STHDA,» 15 10 2017. [En ligne]. Available: <http://www.sthda.com/french/articles/38-methodes-des-composantes-principales-dans-r-guide-pratique/73-acp-analyse-en-composantes-principales-avec-r-l-essentiel/>. [Accès le 2 Juin 2020].
- [8] «Wikipedia,» [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org>. [Accès le Juin 2020].
- [9] P.-L. GONZALEZ, «L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (A.C.P.)».
- [10] C. ZANG AND M. IMREGUN, «STRUCTURAL DAMAGE DETECTION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AND MEASURED FRF DATA REDUCED VIA PRINCIPAL COMPONENT PROJECTION,» *Journal of Sound and vibration*, vol. 242, n° %15, pp. 813-827, 2000.
- [11] Yi Tan and Limao Zhang, «Computational methodologies for optimal sensor placement in structural health monitoring: A review,» *Structural Health Monitoring*, pp. 1-22, 2019.
- [12] Miroslav Pastora, Michal Bindaa, Tomáš Harárika, «Modal Assurance Criterion,» *Procedia Engineering*, vol. 48, p. 543–548 , 2012.
- [13] M. Nobahari and S. M. Seyedpoor, «An efficient method for structural damage localization based on the concepts of flexibility matrix and strain energy of a structure,» *Structural Engineering and Mechanics*, vol. Vol. 46, n° %1No. 2 , pp. 231-244, 11 Mai 2014.
- [14] Yun-Lai Zhou, Hongyou Cao, Quanmin Liu and Magd Abdel Wahab, «Output-Based Structural Damage Detection by Using Correlation Analysis Together with Transmissibility,» *Materials*, vol. 10, pp. 1-17, 27 July 2017.
- [15] S. F. Ashby, Center for applied scientific computing, 1997.

- [16] «Sensorland.com The information center for sensors and data systems,» [En ligne]. Available: www.sensorland.com. [Accès le 13 Avril 2020].
- [17] Les collections de l'Ifsttar, ESSAIS DYNAMIQUES SUR LES PONTS, 2015.
- [18] Christian Cremona, Flávio de Souza Barbosa, Alireza Alvandi, «Identification modale sous excitation ambiante :Application à la surveillance des ponts,» *Mécanique & Industries*, vol. 4, p. 259–271, 2003.
- [19] F. Barbosa, Identification Modale de Structures sous Sollicitation Ambiante: Volume 1 - Théorie et Applications, LCPC, Division Fonctionnement et Durabilité des Ouvrages d'Art.
- [20] A. Alvandi, «Contribution à l'utilisation pratique de l'évaluation,» 2003.
- [21] LI AiQun, DING YouLiang, WANG Hao & GUO Tong, «Analysis and assessment of bridge health monitoring mass data —progress in research/development of “StructuralHealth Monitoring”,» *SCIENCE CHINA*, vol. 55, n° 18, août 2012.
- [22] Erhan Saracoglu and Sten Bergstrand, «Continuous monitoring of a long-span cable-stayed timber bridge,» *J Civil Struct Health Monit*, vol. 5, p. 183–194, 2014.
- [23] HUANG Fang-lin, HE Xu-hui, CHEN Zheng-qing, ZENG Chu-hui, «Structural safety monitoring for Nanjing Yangtze River Bridge,» *J. CENT. SOUTH UNIV. TECHNOL.*, vol. 11, n° 13, 2004.
- [24] S. Kim, «Intelligent Health Monitoring System for a Cable-Stayed Bridge,» *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 5, n° 11, pp. 37-41, 2001.
- [25] «Structurae,» [En ligne]. Available: <https://structurae.net>. [Accès le 26 avril 2020].
- [26] M. Khaled HAMZAOUI et M. Ryad Mahmoud ZYAT, «Monitoring de l'état structural des ponts par l'analyse vibratoire : application sur un pont existant,» Alger, 2019.
- [27] F. Sidorof, Mécanique des milieux continus, 2020.
- [28] «Developpez.com,» 25 août 2005. [En ligne]. Available: <https://khayyam.developpez.com/articles/algo/genetic/>. [Accès le 7 Juin 2020].
- [29] «Seismosoft,» [En ligne]. Available: <https://seismosoft.com/products/seismoartif/>. [Accès le 20 Mai 2020].
- [30] «Corentin Dancette - Blog,» 8 Octobre 2017. [En ligne]. Available: <https://cdancette.fr/2017/10/08/neural-nets/>. [Accès le 26 Mai 2020].
- [31] J. Max, «Asimov Institute,» 2015. [En ligne]. Available: <https://www.asimovinstitute.org/neural-network-zoo/>. [Accès le 15 Mai 2020].