

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

# Stratégie de surveillance de la santé structurale d'un monument historique : Kalaa de Beni Hammad

Réalisé par :

Mr. Mohammed KAOUALALA

Mlle. Samia Céline OUABDESSELAM

Sous la direction Mr. Noureddine BOURAHLA

Et Mme Hafida MOHABEDDINE

Présenté(e) et soutenue publiquement le 07/07/2021

Composition du Jury :

Président :	Mr. A. BALI	Professeur	ENP
Rapporteurs :	Mr. N. BOURAHLA	Professeur	ENP
	Mme. H .DJABALI-MOHABEDDINE	MCB	ENP
Examineurs :	Mme. D. CHERID	MCB	ENP
	Mr. S. LAKEHAL	MCB	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

# Stratégie de surveillance de la santé structurale d'un monument historique : Kalaa de Beni Hammad

Réalisé par :

Mr. Mohammed KAOUALALA

Mlle. Samia Céline OUABDESSELAM

Sous la direction Mr. Noureddine BOURAHLA

Et Mme Hafida MOHABEDDINE

Présenté(e) et soutenue publiquement le 07/07/2021

Composition du Jury :

Président :	Mr. A. BALI	Professeur	ENP
Rapporteurs :	Mr. N. BOURAHLA	Professeur	ENP
	Mme. H .DJABALI-MOHABEDDINE	MCB	ENP
Examineurs :	Mme. D. CHERID	MCB	ENP
	Mr. S. LAKEHAL	MCB	ENP

## *DEDICACE*

---

Nous dédions ce travail aux personnes que nous avons tant aimé qu'ils assistent à  
notre

soutenance : À Nos chères parents

à Nos chères sœurs.

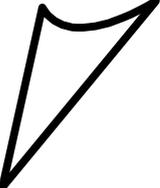
À Nos chers frères pour leur soutien moral et leurs sacrifices le long de notre  
formation.

À tous nos amis, qu'ils soient de l'école ou de l'extérieur, et nous savons qu'ils sont  
nombreux. Vous nous avez tous soutenu par votre encouragement, et vos dons en  
prière et en nature souvent.

Au demeurant, que tous ceux dont les noms ne figurent pas sur cette liste et qui nous  
ont soutenu d'une manière ou d'une autre sachent que leur apport spirituel et matériel  
n'a pas été vain.

On vous adresse tous nos sentiments de reconnaissance  
renouvelés.

Mohammed KAOULALA  
Samia Céline OUABDESSELAM



## ***REMERCIEMENTS***

---

*Tout d'abord on remercie le bon Dieu qui nous a donné la force et le courage pour persévérer dans la voie de la réussite et nous a guidé vers le chemin du savoir et de la réussite.*

Nos premiers remerciements vont d'abord à notre encadreur du projet de fin d'étude, Monsieur N.BOURAHLA, pour la confiance qu'il nous avons accordé en acceptant d'encadrer ce travail et qui nous a accompagné tout au long de notre formation. Sa disponibilité et ses généreux secours au cours de certains de nos moments difficiles ont été d'une très grande qualité, et d'un immense réconfort dont la disponibilité, le savoir-faire et le soutien ne nous ont jamais fait défaut, merci infiniment Monsieur N.BOURAHLA.

Il y a une personne de très grande importance, qui nous a accompagnées et qui nous a soutenues tout le temps par la force et l'énergie qui lui sont disponibles. Il s'agit de Mme Hafida DJABALI MOHABEDDINE, notre Co-promotrice, dont nous ne pourrions mesurer l'apport dans l'accomplissement de cette formation. Dans tout ce que nous avons pu souffrir et obtenir, elle a été l'autre nous. Nous vous remercions infiniment.

Nous adressons aussi nos remerciements à l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil de l'Ecole Nationale Polytechnique pour leur soutien et encouragement au cours de notre formation. On tient à rendre hommage à leurs qualités humaines et scientifiques.

Nos vifs remerciements aux membres de jury pour nous avoir fait l'honneur d'examiner et de juger notre travail.

Nous voudrions également remercier tout particulièrement nos parents pour leur soutien et leurs encouragements durant ces années de formation qu'ils trouvent ici toute notre affection et notre gratitude.

## عنوان

استراتيجية للرصد الصحي الهيكلي لنصب تذكاري تاريخي : قلعة بني حماد.

## ملخص

قلعة بني حماد هي واحدة من أهم الآثار التاريخية في الجزائر. للنصب قاعدة مربعة الشكل ابعادها كتالي: من الجانب 6.50 متر و ارتفاعها 24.70 متر. تقع على بعد 36 كم شمال شرق مدينة المسيلة.

الهدف من هذه الدراسة هو الوصول إلى العدد الأمثل لأجهزة استشعار جمع البيانات وتحديد موقعها في الهيكل. تستخدم طريقة المرونة والتباين كمؤشر للتلف لتحديد مكان الضرر المحتمل داخل الهيكل باستخدام شبكة عصبية قادرة على التنبؤ بوضع ومدى الضرر.

يتم تقييم الاستخدام الأمثل لعدد وأماكن أجهزة الاستشعار بتطبيق خوارزمية جينية. ثم تنشأ قاعدة بيانات لسيناريوهات الأضرار المحتملة. وستستخدم هذه الأخيرة في تدريب الشبكة العصبية ، التي تتيح فيما بعد تحديد مكان الضرر وقياسه الكمي بل والتنبؤ به استنادا إلى شكل مخفض من مصفوفة التباين في المرونة.

تظهر النتائج أن الطرق و الاساليب المقترحة دقيقة وقوية في تحديد الأضرار التي لحقت بالهيكل وتحديد مواقعها و كميتها.

## الكلمات المفتاحية

المراقبة، قلعة بني حماد، الكشف، التوقع، أجهزة استشعار، المرونة، الذكاء الاصطناعي، الشبكات العصبية، التدريب.

## **Title**

Structural health monitoring strategy for a historic monument: Kalaa de Beni Hammad.

## **Abstract**

The Kalaa of Beni Hammad is one of the most important historical monument in Algeria. The monument has a square base of 6.50 m of side and 24.70 m height. It is located 36 km northeast of the city of M'Sila.

The purpose of this study is to optimize the number and location of the data collection sensors for the structure. . The flexibility variation method is used as damage indicator to identify and locate possible damage within our structure using a neural network capable of predicting the position and extent of damage.

The optimization of the number and location of sensors is evaluated by applying a genetic algorithm. Then, a database is constituted for potential damage scenarios. The latter will be used in to train the neural network, which subsequently makes it possible to locate, quantify and even predict damage based on a reduced form of flexibility variation matrix.

The results show that the proposed methods are accurate and robust in the identification, localization and quantification of damage to our structure.

## **Keywords**

Monitoring, Kalaa de Beni Hammad, Detection, location, sensor, flexibility, artificial intelligence, neural network, training.

## **Titre**

Stratégie de surveillance de la santé structurale d'un monument historique : Kalaa de Beni Hammad.

## **Résumé**

La Kalaa de Beni Hammad est l'un des monuments historiques les plus importants d'Algérie. Le monument a une base carrée de 6,50 m de côté et 24,70 m de hauteur. Il est situé à 36 km au nord-est de la ville de M'Sila.

Le but de cette étude est d'optimiser le nombre et l'emplacement des capteurs de collecte de données pour la structure. La méthode de variation de flexibilité est utilisée comme indicateur de dommages pour identifier et localiser les dommages possibles dans notre ouvrage à l'aide d'un réseau de neurones capable de prédire la position et l'étendue des dommages.

L'optimisation du nombre et de l'emplacement des capteurs sont évaluées en appliquant un algorithme génétique. Ensuite, une base de données est constituée pour les scénarios de dommages potentiels. Cette dernière sera utilisée pour former le réseau de neurones, ce qui permet par la suite de localiser, quantifier et même prévoir les dommages sur la base d'une forme réduite de matrice de variation de flexibilité.

Les résultats montrent que les méthodes proposées sont précises et robustes dans l'identification, la localisation et la quantification des dommages au sein de notre structure.

## **Mots clés**

Surveillance, Kalaa de Beni Hammad, Détection, localisation, capteurs, flexibilité, intelligence artificielle, réseau de neurones, apprentissage.

# ***TABLE DES MATIERES***

---

*Liste des figures*

*Liste des tableaux*

Introduction générale ..... 14

## ***Chapitre I : Etude bibliographique***

1.1 Introduction ..... 18

1.2 Etat de Connaissances des Méthodes de Détection et de Localisation des Dommages 19

1.2.1 LA SHM (Structural Health Monitoring) ..... 19

1.2.2 Définition de l'Endommagement ..... 19

1.2.3 Détection des Dommages Structuraux ..... 20

1.3 Procédures d'Optimisation des Captures pour le Monitoring des Structures ..... 24

1.3.1 Définitions des Capteurs ..... 24

1.3.2 Les Différents Types des Capteurs ..... 24

1.3.3 Optimisation du Nombre et des Emplacements des Capteurs ..... 27

1.4 Application des Réseaux de Neurones Artificiels dans les Procédures de Surveillance Vibratoires ..... 30

1.4.1 Généralités sur les Réseaux de Neurones ..... 30

1.4.2 Les Réseaux de Neurones Artificiels ..... 33

1.5 Conclusion ..... 36

## ***Chapitre II : La surveillance des monuments historiques***

2.1 Introduction ..... 38

2.2 Les Structures Patrimoniales et les Monuments Historiques ..... 39

2.3 Protection des Monuments Historiques ..... 40

2.4 Exemple de Monuments Utilisant la SHM ..... 41

2.5 Conclusion ..... 51

### ***Chapitre III : Optimisation du nombre et des emplacements des capteurs***

3.1	Introduction .....	53
3.2	Présentation de l'Ouvrage .....	54
3.2.1	Kalaa de Beni-Hammad .....	54
3.2.2	Modélisation du Kalaa .....	55
3.3	Hypotheses de Travail .....	57
3.4	Réduction du Nombre des Positions Candidates.....	58
3.4	La Fonction Objective .....	63
3.5	Les Etapes de l'Algorithme Génétique.....	64
3.5.1	La création de la population initiale.....	64
3.5.2	L'évaluation des individus .....	65
3.5.3	La création des nouveaux individus.....	65
3.5.4	L'insertion de nouveaux individus dans la population.....	68
3.6	Résultats et Commentaires .....	68
3.7	Conclusion.....	73

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

4.1	Introduction.....	75
4.2	La Methode de Variation de la Matrice de Flexibilité .....	76
4.2.1	Principe de la méthode .....	76
4.2.2	Organigramme de la méthode de variation de la matrice de flexibilité .....	77
4.3	Simulation des Dommages dans la Structure .....	78
4.3.1	Choix des zones d'endommagement.....	78
	Zone A .....	80
	Zone B .....	81
	Zone C .....	82
	Zone D .....	83
	Zone E .....	84

Zone F .....	85
4.3.2 La génération d'une base de données : .....	86
4.4 Détection des Dommages par Réseau de Neurones .....	87
4.4.1 Choix de l'entrée et de la sortie .....	87
4.4.2 Topologie du réseau de neurones :.....	89
4.4.3 Algorithme d'apprentissage : .....	90
4.4.4 Résultats et Interprétations :.....	91
4.5 Conclusion.....	93
Conclusion générale.....	94
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>97</b>
Annexes.....	103

# ***LISTE DES FIGURES***

---

## ***Chapitre I : Etude bibliographique***

Figure I.1: Capteur à fibre optique .....	24
Figure I.2: Les captures sans fil .....	26
Figure I.3: Capteur piézoélectrique accéléromètre .....	26
Figure I.4: Les composantes de l'algorithme génétique .....	27
Figure I.5: Organigramme d'un algorithme génétique .....	28
Figure I.6: Le neurone biologique.....	30
Figure I.7: Le neurone artificiel .....	31
Figure I.8: Différentes architectures des RNA.....	35

## ***Chapitre II : La surveillance des monuments historique***

Figure II 1: Taj Mahal Inde .....	39
Figure II 2: Big Ben Angleterre .....	39
Figure II 3: Palais d'Alhambra Andalousie.....	39
Figure II 4: Mosquée de Soliman Turquie .....	39
Figure II.5: Torre Delle Ore Italie .....	41
Figure II.6: Le vieux pont de Mostar .....	42
Figure II.7: La tour Sciri Italie .....	43
Figure II.8: L'église San Vigilio suisse.....	44
Figure II. 9: La position des capteurs .....	45
Figure II.10: Exemple de résultats obtenus par deux des capteurs .....	46
Figure II.11: La villa royale à Monza Italie .....	46
Figure II.12: Résultats de l'analyse du déplacement en fonction de la température.....	47
Figure II.13: Le pont de Bolshoi Moskvoretskiy .....	48
Figure II.14: La pagode de SEOk-Ga KOREA.....	49
Figure II.15: position des capteurs dans pagode .....	50

### ***Chapitre III : Optimisation du nombre et des emplacements des capteurs***

Figure III.1: Lieu géographique de Kalaa de Beni-Hammad.....	54
Figure III.2: Kalaa de Beni-Hammad.....	55
Figure III.3: Modèle 3D du Kalaa de Beni-Hammad.....	56
Figure III.4: Modèle 2D du Kalaa de Beni-Hammad (plan Oxz, Oyz).....	56
Figure III.5: Emplacements candidats après la première étape de réduction.....	58
Figure III.6: Positions candidates suivant le plan (oyz).....	59
Figure III.7: Positions candidates suivant le plan (oxz).....	59
Figure III.8: Positions candidates suivant le plan (oyz).....	60
Figure III.9: Positions candidates suivant le plan (oxz).....	61
Figure III.10: Positions candidates suivant le plan (oyz).....	61
Figure III.11: Positions candidates suivant le plan (oxz).....	62
Figure III.12: Positions candidates suivant le plan (oyz).....	62
Figure III.13: Positions candidates suivant le plan (oxz).....	63
Figure III.14: Diagramme circulaire représentant la probabilité de sélection de chaque individu selon son rang. ....	66
Figure III.15: Evolution du nombre de capteur du meilleur individu au cours des générations .....	68
Figure III.16: Evolution de la qualité du meilleur individu au cours des générations .....	69
Figure III.17: Positions candidates suivant le plan (oyz).....	69
Figure III.18: Positions des capteurs suivant le plan (oxz).....	70
Figure III.19: Positions candidates suivant le plan (oyz).....	70
Figure III.20: Positions des capteurs suivant le plan (oxz).....	71
Figure III.21: Positions candidates suivant le plan (oyz).....	71
Figure III.22: Positions des capteurs suivant le plan (oxz).....	72

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

Figure IV.1: Contraintes de compression sur la façade principale .....	78
Figure IV.2: Les zones principales d'endommagement.....	79
Figure IV.3 : La zone A dans son intégralité .....	80
Figure IV.4: Subdivisions de la zone A .....	80
Figure IV.5: La zone B dans son intégralité.....	81
Figure IV.6: Subdivisions de la zone B.....	81
Figure IV.7: La zone C dans son intégralité.....	82
Figure IV.8: Subdivisions de la zone C.....	82
Figure IV.9: La zone D dans son intégralité .....	83
Figure IV.10: Subdivisions de la zone D .....	83
Figure IV.11: Zone E dans son intégralité .....	84
Figure IV.12: Subdivisions de la zone E.....	84
Figure IV.13: Zone F dans son intégralité.....	85
Figure IV.14: Subdivisions de la zone F .....	85
Figure IV 15: Sous ensemble de la base de données initiales .....	89
Figure IV.16: Courbe montrant l'évolution de la précision sur les données d'apprentissage en fonction des itérations .....	91
Figure IV.17: Courbe montrant l'évolution de la précision sur les données validation en fonction des itérations .....	91
Figure IV 18: Histogramme de la précision de prédiction du modèle .....	92
Figure IV 19: Histogramme de la fonction coût du modèle.....	92
Figure IV 20: Courbe de régression de l'estimation de la rigidité sur données d'apprentissage .....	92

## ***LISTE DES TABLEAUX***

---

### ***Chapitre I : Etude bibliographique***

Tableau I.1: Fonctions d'activation .....	32
---	----

### ***Chapitre III : Optimisation du nombre et des emplacements des capteurs***

Tableau III.1: Les propriétés de la pierre .....	57
--	----

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

Tableau IV.1: Tableau récapitulatif du nombre de couches et nombres de neurones du modèle .....	90
---	----

# *Introduction générale*

## **Introduction :**

La présente étude s'inscrit dans le cadre du projet de fin d'études proposé par le laboratoire de Génie Sismique et Dynamique des Structures du département de Génie Civil. Elle concerne la stratégie de surveillance de la santé structurale d'un monument historique.

## **Problématique :**

Au cours des dernières décennies, des techniques de monitoring, basées sur les réponses vibratoires et les méthodes de l'intelligence artificielle, ont beaucoup évolué et sont de plus en plus utilisées dans la pratique de la surveillance de l'état de santé structurale des ouvrages stratégiques. En effet, le suivi régulier des ouvrages importants est avant tout un enjeu de sûreté et de sécurité des biens et des personnes. Il est essentiel pour la prévention et la maintenance de ces ouvrages. Le monitoring des réponses vibratoires sous l'action des excitations ambiantes s'avère un moyen efficace pour l'extraction des informations sur l'état de la structure.

## **Objectifs de l'étude :**

Ce projet de fin d'études, consiste à passer en revue l'état des connaissances actuelles sur les techniques de détection et la localisation des défauts et des dommages dans les structures de Génie Civil et d'appliquer une de ces méthodes sur un monument historique. A cet effet, un modèle en élément finis (EF) de l'ouvrage en question sera élaboré afin de simuler l'état sain et endommagé de ce dernier. Un algorithme génétique d'optimisation de l'instrumentation sera utilisé pour la détermination du nombre de capteurs et de leurs positions optimales. Le traitement de l'acquisition des réponses servira à la détection d'un éventuel dommage en termes de localisation et de sévérité.

## **Organisation de la thèse :**

Ce mémoire comprend quatre (04) chapitres, il est entamé par cette introduction générale qui donne une idée sur l'importance du thème abordé tout en exposant clairement l'objectif visé, la problématique et la démarche suivie.

## *Introduction générale*

Le premier chapitre porte sur une étude bibliographique qui englobe les méthodes de détection et de localisation des dommages. Ainsi que, les procédures d'optimisation des capteurs pour le monitoring des structures, et des applications des réseaux de neurones artificiels dans les procédures de surveillance vibratoires.

Le deuxième chapitre concerne l'application du SHM (Structural Health Monitoring) à différents monuments historiques.

Le troisième chapitre porte sur une présentation de l'ouvrage, un modèle en éléments finis sera élaboré. L'optimisation des capteurs, et leurs emplacements seront calculés à l'aide d'un algorithme génétique, afin d'élaborer une fonction en termes d'indicateur de détection et de localisation à maximiser ou à minimiser les points de mesure.

Le quatrième chapitre est dédié à l'élaboration de réseaux de neurones qui servira à la détection d'un éventuel dommage en termes de localisation et de sévérité.

Enfin, nous achevons notre travail par une conclusion générale qui récapitule les principaux résultats obtenus au cours de cette étude.

# ***CHAPITRE I***

***Etude***

***bibliographique***

## 1.1 Introduction

Au cours des dernières années, la capacité de surveiller et de détecter une structure endommagée représente un enjeu très important en science de l'Ingénieur, car une défaillance structurelle imprévue peut entraîner des catastrophes économiques et humaines.

La surveillance de l'état des structures (SHM) vise à servir trois niveaux d'analyse, à savoir : la surveillance, le diagnostic et le suivi de l'état d'endommagement.

L'idée de base dans toutes les techniques de détection d'endommagement par essais vibratoires réside dans le fait que les paramètres modaux (fréquences, coefficients d'amortissement, déformées propres) mesurés sont fonction des propriétés physiques de la structure (rigidité, masse, amortissement).

Ce chapitre décrit une description des méthodes classiques de détection, de quantification et de localisation des dommages dans des structures du Génie Civil, ainsi que des méthodes récentes basées sur l'intelligence artificielle telle que les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones...

## 1.2 ETAT DE CONNAISSANCES DES METHODES DE DETECTION ET DE LOCALISATION DES DOMMAGES

La détérioration progressive des infrastructures civiles telles que les bâtiments, les ponts, etc... peut entraîner une défaillance catastrophique et présente une menace pour la sécurité publique. Ces dernières années on s'intéresse de plus en plus à l'étude et à la prédiction des modes de défaillance de telles structures.

### 1.2.1 LA SHM (Structural Health Monitoring)

#### 1.2.1.1 Définition de la SHM

La surveillance de l'état de la structure (SHM) est un processus d'évaluation de l'état de santé en service d'une structure par le biais d'un système de surveillance automatisé, et c'est un élément clé des stratégies rentables de maintenance.

Une stratégie SHM comprend de nombreux composants importants, notamment le réseau de détection, de traitement, d'analyse des données, d'évaluation des dommages et la prise de décision. La technologie SHM a un grand potentiel pour offrir des avantages économiques et de sécurité des personnes [1].

#### 1.2.1.2 Objectif de la SHM

La SHM utilisant un réseau de capteurs embarqués ou attachés à la structure peut être utilisé dans les deux phases, la phase de test d'une nouvelle conception ou la surveillance continue de l'intégrité de la structure pendant sa durée de vie. Les paramètres de structure clés sont surveillés par différents types de capteurs en mesurant une large gamme de propriétés physiques [2].

### 1.2.2 DEFINITION DE L'ENDOMMAGEMENT

L'endommagement est défini comme la détérioration progressive des matériaux sous sollicitation qui conduit à la rupture [3].

### 1.2.3 DETECTION DES DOMMAGES STRUCTURAUX

La détection des dommages regroupe de nombreux algorithmes d'apprentissage utilisés dans le domaine de l'intelligence artificielle.

Le processus général mis en œuvre systématiquement pour détecter l'endommagement à partir des mesures vibratoires comporte 3 étapes :

- Calcul des indicateurs.
- Normalisation.
- Fixation du seuil de rejet.

Les outils mathématiques relatifs à chacune de ces 3 étapes sont très nombreux.

Selon Rytter [4], l'identification des endommagements peut être classée en quatre niveaux suivant le niveau d'information qu'elle fournit par rapport à l'endommagement :

- **Niveau 1** : Détection de la présence de l'endommagement.
- **Niveau 2** : Localisation de l'endommagement.
- **Niveau 3** : Quantification de la sévérité d'un endommagement.
- **Niveau 4** : Evolution de l'endommagement.

Jusqu'à présent, la plupart des méthodes basées sur la réponse vibratoire ne permettent que la détection et la localisation des endommagements [4].

#### 1.2.3.1 Méthodes de détection d'endommagement par changement des déformées propres

Les déformées propres sont souvent utilisées pour l'évaluation des endommagements dans les structures, au travers de coefficients de corrélation entre modes comme l'indicateur MAC (Modal Assurance Criterion - MAC) ou celui de la corrélation des points de mesure COMAC (Coordinate Modal Assurance Criterion - COMAC). Ces coefficients expriment la corrélation existante entre deux déformées propres mesurées.

**a. MAC (Modal Assurance Criterion) :**

C'est un indicateur statistique, qui fait la corrélation entre les déformées propres (modes) d'une structure saine à celle de la structure endommagée, sans passer par la méthode des éléments finis. Il varie entre 0 et 1.

$$\text{MAC}_{(ij)} = \frac{\left| \sum_{k=1}^n [\varphi_A]_k^j \cdot [\varphi_B]_k^j \right|^2}{\sum_{k=1}^n ([\varphi_A]_k^j)^2 \cdot \sum_{i=1}^n ([\varphi_B]_k^j)^2} \quad (1)$$

$[\varphi_A]_k^i$  et  $[\varphi_B]_k^j$  sont respectivement les  $k^{\text{ième}}$  composantes des modes  $[\varphi_A]^j$  et  $[\varphi_B]^j$ . Le coefficient MAC<sub>ij</sub> change de 0 à 1, 0 pour le cas où il n'y a aucune corrélation et 1 pour une corrélation parfaite.

- MAC cherche le vecteur de la corrélation à travers 2 modes.
- Il donne des corrélations entre des déformées propres mesurées pour chaque degré de liberté.

Il s'agit d'une méthode qui assure une bonne détection des endommagements mais non performante pour la localisation.

**b. COMAC (Coordinate Modal Assurance Criterion):**

Ce coefficient est généralement employé pour identifier l'endroit où les déformées propres de l'état saine ne sont pas corrélé avec celle de l'état endommagé.

$$\text{COMAC}_i = \frac{\left| \sum_{k=1}^m [\varphi_A]_k^i \cdot [\varphi_B]_k^j \right|^2}{\sum_{k=1}^m ([\varphi_A]_k^i)^2 \cdot \sum_{i=1}^m ([\varphi_B]_k^j)^2} \quad (2)$$

COMAC = 1 Une parfaite corrélation entre les déplacements de la coordonnée i.

- Il évalue le vecteur de corrélation entre les deux modes des structures saine et endommagée.
- Il donne ainsi une corrélation entre des déformées propres mesurées pour chaque degré de liberté.
- Un grand écart par rapport à 1 peut être interprété comme un endommagement dans la structure.
- L'utilisation de COMAC reste délicat et plus complexe par rapport à la méthode de détection d'endommagement par changement des fréquences locales[5].

### 1.2.3.2 Méthodes de détection d'endommagement basées sur les réponses fréquentielles

Les propriétés modales ou les données de la fonction de réponse en fréquence (FRF) sont un indicateur sensible de l'intégrité physique structurelle et peuvent donc être utilisées pour détecter et identifier les dommages dans les structures.

Kirmsker [5] a illustré les effets des fissures sur la réponse structurale à travers des simples réductions des sections du modèle en utilisant des méthodes énergétiques.

Wang et al [6] ont développé un algorithme pour la détection des dommages, le principe c'est de déterminer un vecteur de dommages indiquant à la fois l'emplacement et l'ampleur des dommages à partir des équations de perturbation des données FRF.

Cawley et Adams [7] ont proposé une formulation de détection, de localisation et de quantification des dommages pour n'importe quelle structure basée sur les variations de fréquence. Les résultats sont présentés à partir des essais sur une plaque d'aluminium et une plaque en plastique renforcé par des fibres de carbone à couches croisées. Un excellent accord est montré entre les sites de dommages prévus et réels et une indication utile d'ampleur du défaut est obtenue.

### 1.2.3.3 Méthodes de détection d'endommagement par variation de flexibilité modale

La présence de l'endommagement ou d'une fissure dans une structure provoque une variation locale de leur rigidité, qui se reporte sur l'ensemble du comportement mécanique de la structure. La réduction dans la rigidité réduit les fréquences et affecte les déformées modales, c'est-à-dire augmente la flexibilité.

Par conséquent, une autre classe de méthodes d'identification des dommages est basée sur l'utilisation de la matrice de flexibilité. La matrice de flexibilité  $F$  est l'inverse de la matrice de rigidité  $K$  reliant les forces statiques appliquées  $\{f\}$  aux déplacements structuraux résultants  $\{u\}$  en tant que :

$$\{u\} = [F].\{f\} \quad (3)$$

La matrice de flexibilité peut également être mesurée dynamiquement à partir de données d'analyse modale. La relation entre la matrice de flexibilité  $[F]$  et les caractéristiques dynamiques d'une structure peut être donnée par la relation suivante :

$$F = \sum_{i=1}^{nm} \frac{1}{\omega^2} \varphi_i \varphi_i^T \quad (4)$$

Li et al [8] ont développé une nouvelle approche de détection basée sur des changements dans la matrice de flexibilité pour détecter l'emplacement des dommages structurels et leur étendue.

Edwin R et al [9] ont proposé une méthode de détection basée sur la flexibilité quasi statique. La matrice de flexibilité modale est combinée avec des charges virtuelles qui provoquent des contraintes non nulles dans des petites parties de la structure.

#### 1.2.3.4 Méthodes de détections d'endommagement par changement des fréquences locales LFCR

L'idée de ces méthodes est d'utiliser la matrice de flexibilité pour détecter les changements dans la structure. L'endommagement peut être détecté en comparant la matrice de flexibilité estimée à partir des modes mesurés de l'état endommagé avec celle estimée à partir des modes de l'état sain.

Nous posons  $LF_{ij}$  la fréquence locale de l'élément  $j$  par rapport au mode  $i$  et nous calculons les fréquences locales de la structure saine  $LF_{s_{ij}}$  et de la structure endommagée  $LF_{e_{ij}}$ .

$$K_e = K_s + \sum_{j=1}^i \alpha_j K_j = K_s + \sum_{j=1}^i \Delta K_j \quad (5)$$

$$LF_{ij} = \frac{\phi_i^T K_j \phi_i}{\phi_i^T M_j \phi_i} \quad (6)$$

$$LF_{s_{ij}} = \frac{\phi_{si}^T K_j \phi_{si}}{\phi_{si}^T M_j \phi_{si}} \quad (7)$$

$$LF_{e_{ij}} = \frac{\phi_{ei}^T K_j \phi_{ei}}{\phi_{ei}^T M_j \phi_{ei}} \quad (8)$$

$$\Delta LF_{e_{ij}} = \frac{|LF_{e_{ij}} - LF_{s_{ij}}|}{LF_{s_{ij}}} \quad (9)$$

- Le coefficient LFCR<sub>ij</sub> (taux de changements des fréquences locales) est calculé pour tous les éléments de la structure et pour un certain nombre de modes propres.
- Le LFCR accède à la détection, la localisation et l'estimation du niveau d'endommagement avec une précision appréciable.

## 1.3 PROCEDURES D'OPTIMISATION DES CAPTURES POUR LE MONITORING DES STRUCTURES

### 1.3.1 DEFINITIONS DES CAPTEURS

Les capteurs sont les outils de la SHM pour la surveillance, la détection et la localisation des endommagements dans les structures. Il existe différentes types de capteurs.

### 1.3.2 LES DIFFERENTS TYPES DES CAPTEURS

- **Capteur à Fibre optique :**

La technologie des capteurs à fibre optique est largement répandue en SHM. Elle permet de d'obtenir des fonctions similaires aux capteurs classiques (mesure, contrôle, détection, surveillance), tout en offrant des spécificités très intéressantes : faible encombrement, masse réduite, grande bande passante et faible atténuation, immunité aux parasites électromagnétiques, bonne résistance aux effets des rayonnements ionisants.



Figure I.1: Capteur à fibre optique [10]

Les capteurs à fibre optique présentent de nombreux avantages :

- Ils permettent des mesures à très hautes performances.
- Le fait que ces systèmes ne comportent pas d'éléments mécaniques mobiles leur confère une grande robustesse et fiabilité dans des milieux soumis à de fortes vibrations et chocs.
- Transporter la lumière avec des pertes faibles, et déporter les mesures sur des distances très importantes, sans besoins de régénérer les signaux comme les câbles électriques [11].

De plus, ce type de capteurs offre des fonctionnalités nouvelles en matière de mesure intégrée, différentielle, distribuée et répartie ou en réseau. La mise en œuvre des réseaux de capteurs à fibre optique permet ainsi de réduire considérablement le coût d'un point de mesure, autorisant la mise en commun du système de traitement de l'information pour de nombreux capteurs.

- **Les Capteur sans-fil :**

Les réseaux de capteurs sans-fil sont une nouvelle technologie qui permet de déployer des nœuds capteurs disposent d'une unité de stockage, d'une unité de traitement de données, d'unités de captage diverses, d'une batterie d'alimentation et d'une interface de communication radio. Ces nœuds capteurs sont capables de s'auto-organiser en sous-réseaux distribués pour collecter les informations du mode physique sur lequel ils sont déployés.

Les données collectées sont ensuite transmises à une station de traitement des données appelée station de base. Ce transfert des données collectées, de manière périodique ou événementielle [12].

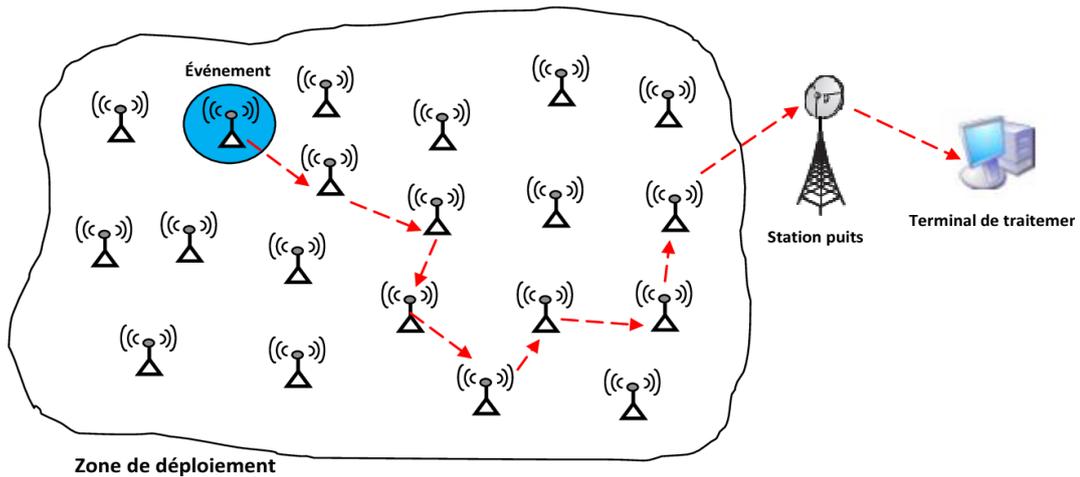


Figure I.2: Les captures sans fil [13]

- **Accéléromètre :**

Un accéléromètre est un capteur qui mesure la vibration ou l'accélération du mouvement d'une structure. La force provoquée par les vibrations ou un changement de mouvement (accélération) pousse la masse à serrer le matériau piézoélectrique, qui produit une charge électrique proportionnelle à la force qui lui est exercée. Étant donné que la charge est proportionnelle à la force, et que la masse est une constante, la charge est également proportionnelle à l'accélération.



Figure I.3: Capteur piézoélectrique accéléromètre [14]

Il existe deux types d'accéléromètres piézoélectriques (capteurs de vibrations).

- Le premier type est un accéléromètre à sortie de charge à haute impédance.
- Le deuxième type d'accéléromètre est un accéléromètre à sortie à faible impédance [15].

### 1.3.3 OPTIMISATION DU NOMBRE ET DES EMPLACEMENTS DES CAPTEURS

#### 1.3.3.1 Définitions d'un Algorithme Génétique AG

L'algorithme génétique est un type d'algorithme un peu particulier, qui appartient à la famille des algorithmes évolutionnistes. Ce sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle : croisement, mutation, sélection, etc. Leur but est d'obtenir une solution approchée optimale à un problème, lorsqu'il n'existe pas de méthode exacte (où la solution est inconnue) pour la résolution en un temps raisonnable.

Nous obtiendrons un ensemble de solutions pour un problème et non une solution unique. Les solutions trouvées seront généralement différentes, mais seront d'une qualité équivalente [16].

- **Le gène** : est une caractéristique, une particularité.
- **Le chromosome** : est une composante de la solution.
- **Individu** : Une solution potentielle du problème qui correspond à une valeur codée de la variable (ou des variables) en considération.
- **Population** : C'est un ensemble des individus.

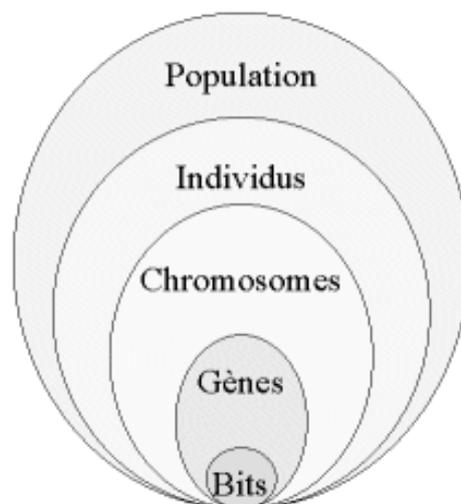


Figure I.4: Les composantes de l'algorithme génétique [17]

1.3.3.2 Principe de fonctionnement de l'algorithme AG

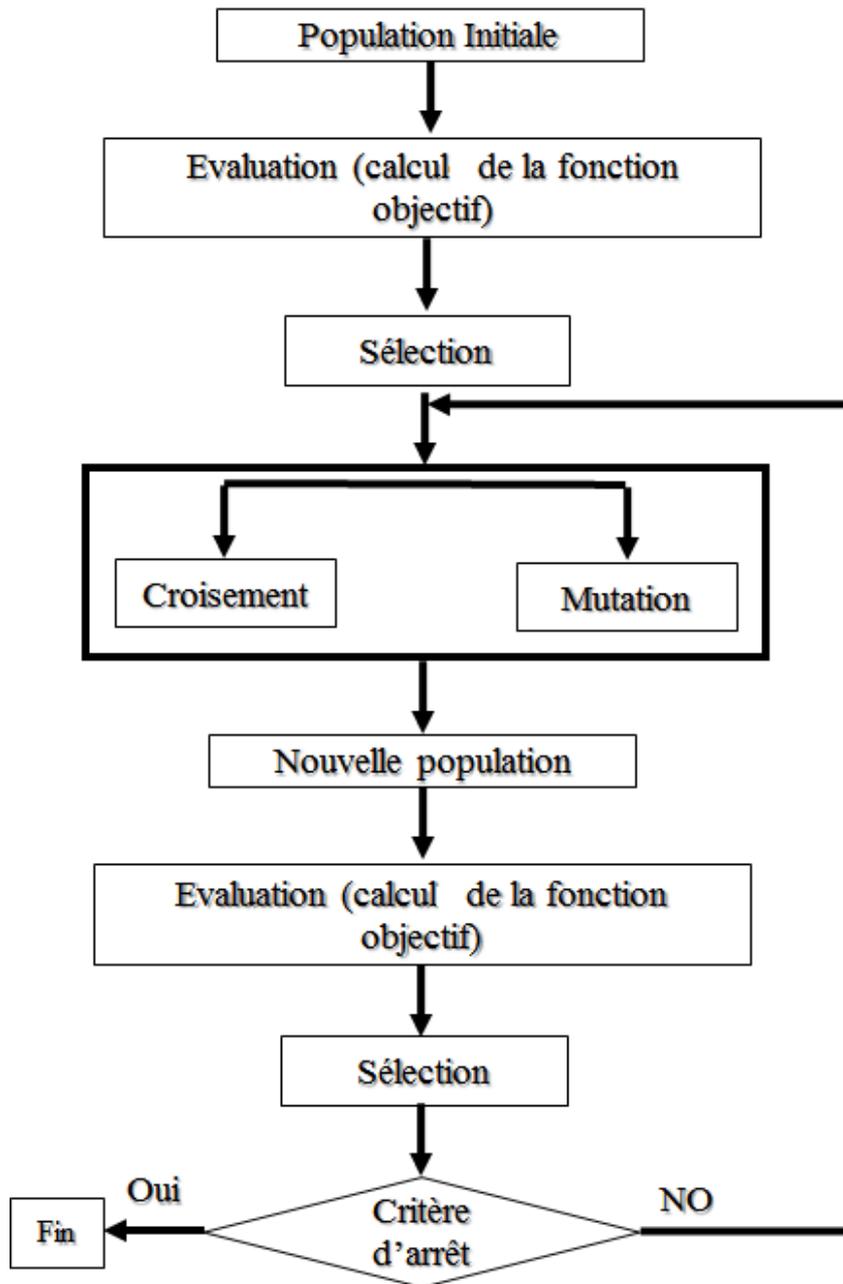


Figure I.5: Organigramme d'un algorithme génétique [18]

Par similitude à la théorie de l'évolution de Darwin, les AG font évoluer les individus d'une population, choisie initialement au hasard, par le biais des opérateurs génétiques : sélection, croisement et mutation. Une stratégie d'évolution est généralement associée à ces opérateurs pour permettre le passage d'une génération à une autre. Ce processus itératif est arrêté lorsque le nombre maximum de générations est atteint.

### 1.3.3.3 Les opérateurs génétiques

Les opérateurs jouent un rôle prépondérant dans la réussite d'un AG. Il existe trois principaux : l'opérateur de sélection, de croisement et de mutation.

**La sélection :** La sélection permet d'identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population et d'éliminer les mauvais. À chaque génération, les individus se reproduisent, survivent ou disparaissent de la population sous l'action de deux opérateurs de sélection : la sélection pour la reproduction, et la sélection pour le remplacement.

**Le croisement :** L'opérateur de croisement permet la création de nouveaux individus selon un processus fort simple. Il permet l'échange d'information entre les individus par le biais de leur combinaison.

**La mutation :** Le rôle de cet opérateur est de modifier aléatoirement, avec une certaine probabilité, la valeur d'un composant de l'individu. Elle confère aux algorithmes génétiques une propriété très importante.

## 1.4 APPLICATION DES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS DANS LES PROCEDURES DE SURVEILLANCE VIBRATOIRES

Le terme réseau de neurones regroupe un certain nombre de modèles de calcul dans l'intention d'imiter certaines fonctions du cerveau humain.

Les réseaux de neurones constituent un outil adapté à la reconnaissance, à la classification et à la résolution de problème de diagnostic.

### 1.4.1 GENERALITES SUR LES RESEAUX DE NEURONES

#### 1.4.1.1 Le neurone biologique

Dans le cerveau humain, le neurone est l'élément de base. Il reçoit des signaux en provenance de neurones voisins, les traite, engendre, conduit et transmet l'influx nerveux à d'autres neurones. Il est constitué de : Corps cellulaire, Dendrites, Axone, Synapse.

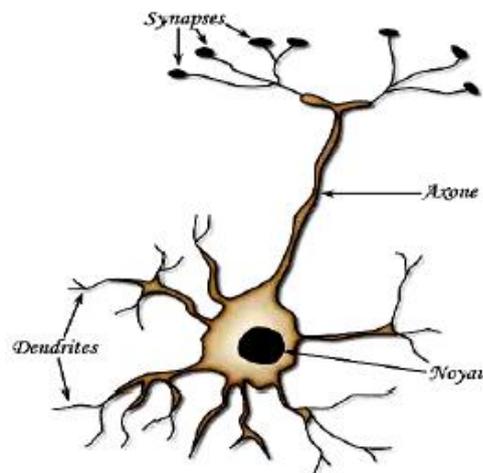


Figure I.6: Le neurone biologique [19]

#### 1.4.1.2 Le neurone artificiel

Les réseaux de neurones formels (artificiels) sont à l'origine d'une tentative de modélisation mathématique du cerveau humain. C'est un élément essentiel de réseau de neurones [20], il contient deux éléments principaux :

- Un ensemble de poids associés aux connexions du neurone.
- Une fonction d'activation.

## Chapitre I : Etude bibliographique

Le neurone représenté par la figure I. 7 se compose d'une cellule possédant plusieurs entrées et une sortie.

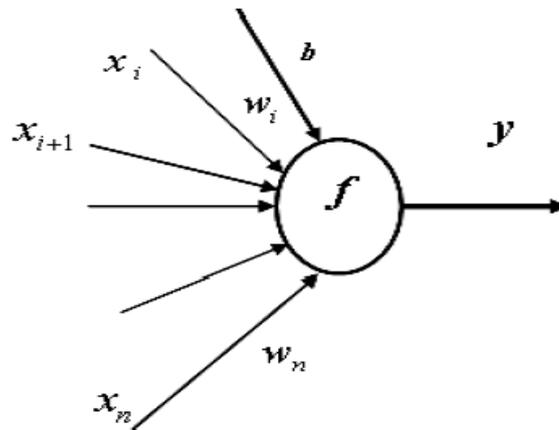


Figure I.7: Le neurone artificiel [21]

Avec :

$$y = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b\right) \quad (10)$$

y: La sortie du neurone.

f: La fonction d'activation (ou de transfert).

x: Entrée du neurone.

w: Poids du neurone.

b: Biais.

### 1.4.1.3 Les fonctions d'activation

La fonction d'activation permet de définir l'état interne du neurone en fonction de son entrée. Il existe de nombreuses formes possibles pour la fonction de transfert. Elle est en générale une fonction non linéaire monotone croissante [22]. La plupart des fonctions de transfert sont continues, offrant une infinité de valeurs possibles comprises dans l'intervalle  $[0, +1]$  ou  $[-1, +1]$ .

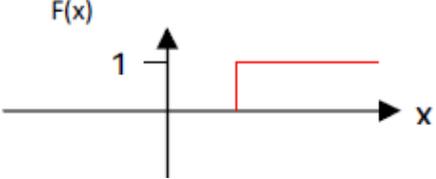
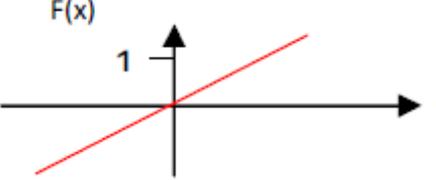
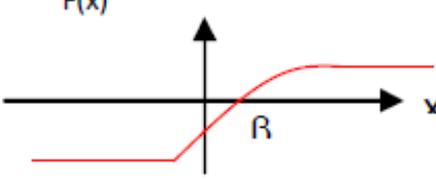
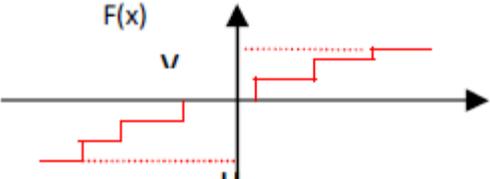
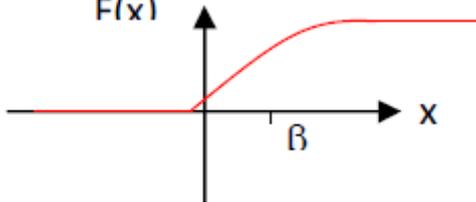
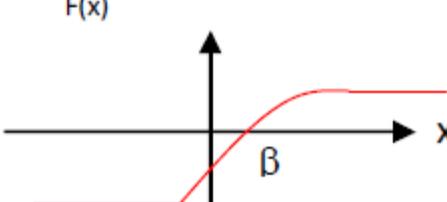
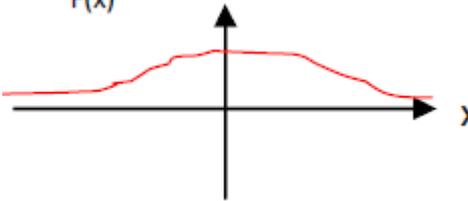
<p>(a) Fonction de Heaviside</p>	
<p>(b) Fonction linéaire sans saturation</p>	
<p>(c) Fonction linéaire avec seuil</p>	
<p>(d) Fonction à seuils multiples</p>	
<p>(e) Fonction sigmoïde <math display="block">F(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}</math></p>	
<p>(f) Fonction sigmoïde bipolaire <math display="block">F(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}}</math></p>	
<p>(g) Fonction stochastique</p>	

Tableau I.1: Fonctions d'activation [22]

### 1.4.2 LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des processeurs élémentaires fortement connectés fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit [19].

L'objectif général d'un RNA est de trouver la configuration des poids de connexion entre neurones pour qu'il associe à chaque configuration d'entrée, une réponse adéquate. L'utilisation d'un RNA se fait en deux temps. Tout d'abord une phase d'apprentissage qui est chargée d'établir des valeurs pour chacune des connexions du réseau, puis une phase d'utilisation proprement dite, où l'on présente au réseau une entrée et où il nous indique en retour sa sortie calculée [21].

Les RNA sont originaires d'une formulation mathématique simplifiée de neurones biologiques. Ils ont la capacité de mémorisation, de généralisation et surtout d'apprentissage qui est le phénomène le plus important.

On peut définir un réseau de neurones artificiel par les quatre éléments suivants :

- La nature des entrées et des sorties.
- La fonction d'entrée totale qui définit le prétraitement effectué sur les entrées.
- La fonction d'activation du neurone qui définit son état en fonction de son entrée totale.
- La fonction de sortie qui calcule la sortie du réseau en fonction de son état d'activation.

### 1.4.2.1 L'apprentissage

L'apprentissage des RNA, est une phase principale qui permet de déterminer ou de modifier les paramètres du réseau, afin d'adapter un comportement désiré. Son but est de trouver un ensemble de poids synoptiques qui minimisent l'erreur entre la sortie du réseau et le résultat désiré.

Au niveau des algorithmes d'apprentissage, il a été défini deux grandes classes selon que l'apprentissage est dit supervisé ou non supervisé.

- Pour les réseaux à apprentissages supervisés (Perceptron, Adaline,...etc.), on présente au réseau des entrées, et au même temps les sorties que l'on désirerait pour cette entrée. Le réseau doit alors se reconfigurer, c'est-à-dire calculer ses poids afin que la sortie qu'il donne corresponde bien à la sortie désirée.
- Pour les réseaux à apprentissages non supervisés (Hopfield, Kohonen,...etc.), on présente une entrée au réseau et on le laisse évoluer librement jusqu'à ce qu'il se stabilise.

L'apprentissage des RNA se fait selon la stratégie suivante :

#### **Etape 1 :**

- Les entrées d'un exemple sont injectées dans les cellules d'entrée du RNA.
- Le RNA calcul alors une sortie en fonction des états internes des neurones et des poids synaptiques des connexions.

#### **Etape 2 :**

- La sortie obtenue est comparée avec la sortie désirée pour l'exemple.
- On obtient alors une erreur, particulièrement importante en début d'apprentissage car la réponse du RNA est à ce stade purement aléatoire.

#### **Etape 3 :**

- Les poids synaptiques du RNA sont ensuite modifiés afin de réduire l'erreur calculée.

**Etape 4 :**

- On réitère cette opération un grand nombre de fois, et ce pour chaque exemple de la base, jusqu'à ce que le RNA converge vers une configuration qui lui permette de résoudre le problème à traiter.

*1.4.2.2 Architecture des réseaux de neurones artificiels*

Il existe différentes topologies de réseaux correspondant aux divers schémas géométriques de connexion entre les neurones. Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle.

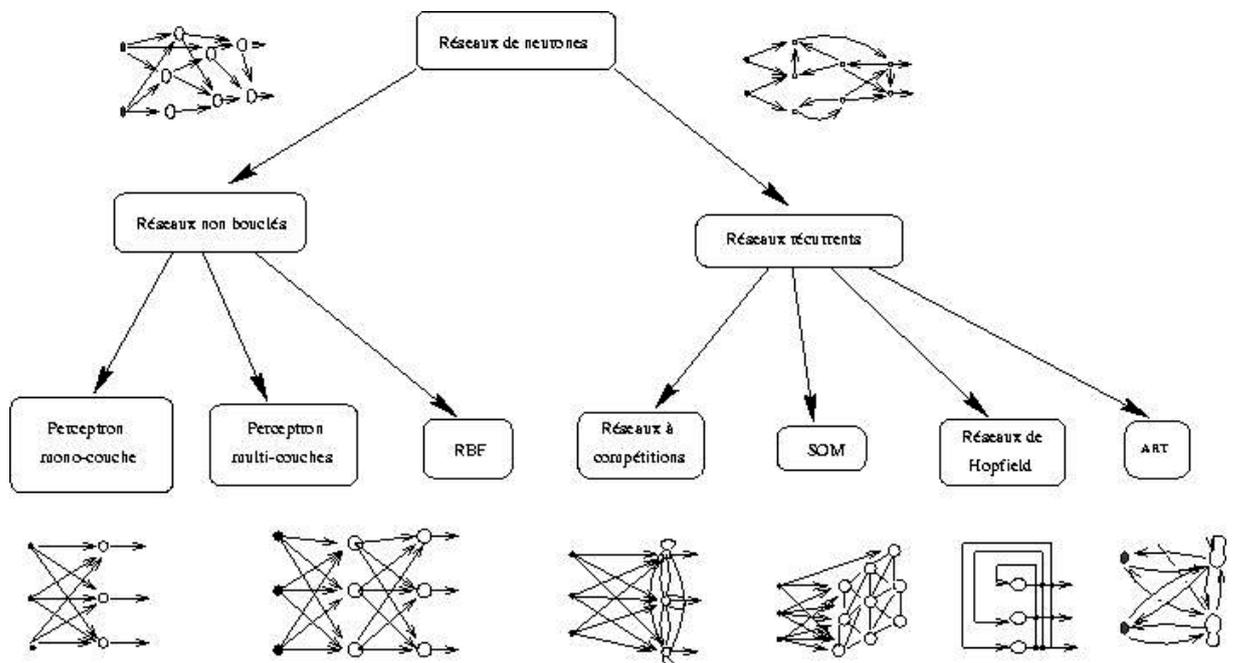


Figure I. 8: Différentes architectures des RNA [22]

**RBF:** Radial Basic Function.

**ART:** Adaptatif Resonance Theory.

**SOM:** Self Organized Map.

### 1.5 Conclusion

Ce chapitre traite des généralités de la SHM, ainsi que les nombreux enjeux à venir pour la sécurité des usages et des personnes. Cela fait de la SHM un axe de recherche et de développement stratégique du futur.

Des nombreuses techniques de détection, de localisation et d'identification sont exposées dans ce dernier.

La méthode de variation du rapport des changements des fréquences locales (LFCR) permet de détecter un ou plusieurs endommagements dans les structures.

Comparé aux autres méthodes, l'indicateur LFCR reste le plus polyvalent, et permet une détection et une localisation très pertinentes des endommagements. La méthode MAC est aussi un très bon indicateur pour détecter un endommagement, mais elle n'est pas adaptée pour la localisation.

Le COMAC constitue également un bon indicateur. Toutefois, son utilisation reste délicate et plus complexe par rapport à l'indicateur LFCR.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter des exemples de l'application du SHM dans différents monuments historiques.

# ***CHAPITRE II***

*La surveillance des monuments  
historiques*

### 2.1 Introduction

La gestion et la sécurité des structures patrimoniales nécessitent notamment une surveillance, un entretien et une conservation périodique. En outre, une connaissance précise du comportement d'une structure devient de plus en plus importante à mesure que de nouvelles techniques de construction et de conservation sont introduites et que la construction existante est souvent nécessaire pour survivre à des constructions voisines intactes.

Les systèmes de surveillance de la santé structurale (SHM) ont fait l'objet de recherches considérables au cours des dernières décennies en raison des progrès technologiques relatifs.

Les systèmes SHM peuvent fortement contribuer à détecter la stabilité et la déformation d'une structure et peuvent être utilisés pour la détection des dommages.

En particulier, les dispositifs de surveillance renforcés par des capacités de mise en réseau, qui leur permettent d'interconnecter et d'échanger des informations étudiées, sont les principales parties des systèmes SHM afin d'enregistrer les informations nécessaires.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à quelques monuments historiques et à l'application de la SHM dans chacun d'eux.

## 2.2 LES STRUCTURES PATRIMONIALES ET LES MONUMENTS HISTORIQUES

Les structures patrimoniales et les monuments historiques ont une place culturelle centrale dans la société, les vieux ponts de pierre, les palais, édifices religieux, les monuments, qui jouent un rôle important dans le patrimoine culturel de la société. Ils peuvent être appréciés pour plusieurs raisons : l'âge, la beauté architecturale, les raisons religieuses, les événements historiques ou les personnes qu'ils ont accueillies, les défis de construction qu'ils ont eue à l'époque où ils ont été construits, etc.

En cours de construction il y a de nombreuses années, en utilisant des techniques anciennes et en étant exposé aux conditions environnementales pendant de très longues périodes, les structures patrimoniales peuvent présenter différents degrés de dysfonctionnement. Sans une gestion appropriée, la structure pourrait s'effondrer partiellement ou entièrement, ce qui ne créerait pas de problèmes de sécurité et d'économie, mais engendrerait une perte culturelle irréversible.



Figure II.1 : Taj Mahal Inde [23]



Figure II.2 : Big Ben Angleterre [23]



Figure II.3 : Mosquée de Soliman Turquie [23]



Figure II.4 : Palais d'Alhambra Andalousie [23]

Le manque de détails techniques (dessins, système statique) et de conditions structurales rendent la surveillance des structures patrimoniales très difficile. Il faut d'abord comprendre la structure et son comportement, puis définir une stratégie de surveillance complète.

La surveillance à long terme permet d'accroître la connaissance du comportement réel de la structure et la planification de l'intervention de maintenance. À long terme, la surveillance statique exige des systèmes précis et très stables, capables de relier des mesures souvent espacées sur une longue période de temps.

De plus, la surveillance se fait avec des capteurs qui doivent être installés avec un minimum d'envahissement de l'esthétique et de la fonctionnalité de la structure testée.

### 2.3 PROTECTION DES MONUMENTS HISTORIQUES

La protection des monuments historiques n'est pas un label mais une servitude d'utilité publique fondée sur l'intérêt patrimonial d'un bien, qui s'évalue en examinant un ensemble de critères historiques, artistiques, scientifiques et techniques. Les notions de rareté, d'exemplarité, d'authenticité et d'intégrité des biens sont notamment prises en compte [24].

Il existe deux sortes de protection :

- L'inscription à l'Inventaire Supplémentaire des Monuments Historiques (ISHM).
- Le classement au titre des Monuments Historiques (MH).

Les critères de sélection sont basés sur le caractère architectural et artistique ou sur l'intérêt historique. Le bien se doit aussi d'être authentique, rare, préservé, et représentatif d'un type de construction.

L'Inventaire Supplémentaire des Monuments Historiques est possible lorsque le bien présente un intérêt d'histoire ou d'art suffisant et le classement MH est préconisé lorsque le bien présente du point de vue historique et artistique un intérêt public [25].

## **2.4 EXEMPLE DE MONUMENTS UTILISANT LA SHM :**

La surveillance de la santé structurelle est cruciale pour une prédiction du comportement structurel et de l'état de conservation des bâtiments ayant des importances artistiques inestimables.

Comme c'est maintenant largement reconnu, la SHM est d'une importance capitale pour la conservation préventive et la restauration efficace des structures historiques.

Les tendances actuelles dans l'application de la SHM dans les édifices patrimoniaux comprennent l'utilisation de méthodes d'apprentissage non supervisées.

### **2.4.1 Exemples de surveillance des monuments historiques à l'aide des capteurs divers**

- **Torre delle Ore (Italie) :**

La Torre delle Ore ou Torre dell'Orologio, l'un des monuments les plus connus et les plus visités du centre historique de Lucques. C'est une tour de l'horloge située dans le centre historique de Lucques, en Toscane, Italie. Cette tour, la plus haute de Lucques, a été acquise par le gouvernement au XIV<sup>e</sup> siècle. En 1390, il a été décidé d'en faire une tour de l'horloge [26].



Figure II.5: Torre Delle Ore Italie [27]

## Chapitre II : La surveillance des monuments historiques

Les vibrations de la tour ont été surveillées à l'aide des instruments à haute sensibilité pour une période de 4 mois.

Le niveau de vibration mesuré était très faible, puisque la structure se trouve au milieu d'une zone de circulation limitée.

Néanmoins, la disponibilité de deux types différents d'instruments très sensibles et précis a permis aux ingénieurs de suivre le comportement dynamique de la tour pendant toute la période de surveillance [28].

- **Le Stari Most (le vieux pont) :**

Le Vieux Pont de Mostar construit en 1565 par l'architecte Mimar Hayreddin, élève de l'architecte ottoman Sinan situé Bosnie-Herzégovine. Il est constitué d'une seule arche en dos-d'âne de 27 m de portée, 4 m de largeur et 29 m de longueur. Il domine la Neretva d'une hauteur de 29 mètres, parfois plus à cause de la retenue d'eau d'une centrale hydro-électrique située en amont. Deux tours fortifiées le protégeaient : la tour Helebija sur la rive droite et la tour Tara sur la rive gauche, toutes deux datant du XVII<sup>e</sup> siècle [29].



Figure II.6: Le vieux pont de Mostar [30]

## Chapitre II : La surveillance des monuments historiques

Après des années de construction, des fissures sont apparues sur l'aire totale de cette dernière. Et pour protéger cet héritage, un système de surveillance basé sur la table vibrante des structures en maçonnerie lui est appliqué.

Les résultats obtenus par ce système d'essai sont : les accélérations mesurées, les déplacements relatifs et absolus, les déformations, ainsi que l'identification des dommages. Ces paramètres obtenus ont fourni des informations essentielles sur l'état de ces ouvertures. Ainsi que sur, leur stabilité sismique, leur mécanisme de défaillance et leurs points faibles [29].

- **La Tour Degli Sciri (Italie) :**

Une approche novatrice de mise à jour du modèle basée sur les substituts pour l'évaluation structurelle en temps réel des bâtiments historiques est présentée et validée en tenant compte de l'étude de cas de la Tour Degli Sciri située dans la ville de Pérouse (Italie). A probablement été construite vers la fin du XIII<sup>e</sup> siècle, comme tour privée d'un palais appartenant à la famille Oddi, qui l'a conservée jusqu'en 1483. La tour présente une hauteur élevée d'environ 42 mètres est une base carrée, composée de blocs de calcaire de taille homogène, ne comportant que quelques embrasures lui conservant son allure monolithique. L'intérieur comporte des balcons en bois reliés par des échelles et des escaliers en métal accrochés aux murs [31].



Figure II.7: La tour Sciri Italie [32]

Trois modèles de substitution différents ont été examinés, et leur efficacité a été comparée d'un point de vue SHM par une analyse de régression de leurs estimations des caractéristiques modales par rapport à celles obtenues par un modèle numérique [33].

### 2.4.2 Exemple de surveillance des monuments historique à l'aide des capteurs à fibre optique

Les capteurs à fibre optique sont les capteurs idéaux pour la surveillance structurale civile en général, durables, stables et insensibles aux influences extérieures, ils sont particulièrement intéressants pour l'évaluation à long terme des conditions sanitaires structurelles.

- **L'église San Vigilio (Suisse):**

L'église San Vigilio est située dans la petite ville de Gandria, sur le lac de Lugano en Suisse. Elle a été construite au XVIe/XVIIe siècle, tandis que la façade frontale et le portail datent du XIXe siècle. Les frères Rabaglio ont effectué des travaux de réparation et de reconstruction en 1771-1786.



Figure II.8: L'église San Vigilio suisse [34]

## Chapitre II : La surveillance des monuments historiques

L'église présente des fissures importantes au centre de la voûte cylindrique, et d'autres fissures plus petites sont partiellement présentes du côté convexe supérieur de la voûte.

Le système de l'église est statique et l'évolution des ouvertures de fissures ne sont pas très connus, pour cela ils ont décidé d'installer dix capteurs pour surveiller les fissures et les variations de courbure de la voûte.

Des capteurs mesurent 30 à 50 cm sont fixés aux deux côtés de la voûte à l'aide de supports.

Toutes les connexions optiques sont reliées dans la sacristie et les capteurs sont mis régulièrement sans qu'il soit nécessaire d'installer des échafaudages dans l'église, qui est toujours en service.

L'emplacement des capteurs a été effectué en une seule journée et les capteurs sont à peine visibles par l'observateur non informé. La position des capteurs est présentée dans figure II.9.



Figure II. 9: La position des capteurs [35]

En raison de restrictions budgétaires et puisque les déformations devaient évoluer sans heurts, il a été décidé de ne pas installer une unité de lecture en permanence dans l'église. Au lieu de cela, des campagnes de mesure d'au moins une semaine ont été menées à des intervalles d'environ trois mois.

Ce programme de surveillance permet d'observer les déformations dues aux variations de température quotidiennes et saisonnières. Un exemple de résultats obtenus par deux des capteurs est illustré dans la figure II.10.

## Chapitre II : La surveillance des monuments historiques

Les résultats indiqués dans la figure II. 10 confirment la fermeture de la fissure observée. Cela indique une redistribution lente des charges à l'intérieur de la chambre forte qui fait l'objet d'une enquête plus poussée [36].

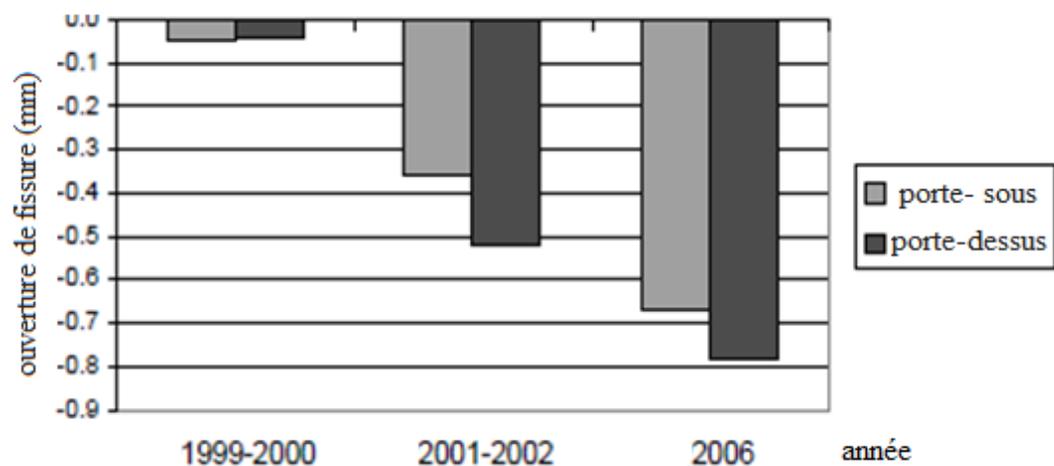


Figure II.10: Exemple de résultats obtenus par deux des capteurs [35]

- **Royal Villa ( Italy):**

La Villa royale à Monza, près de Milan, Italie du Nord, a été construite en 1777 - 1779 par l'architecte Piermarini. Elle a été modifiée par le roi Italien Umberto I.



Figure II.11: La villa royale à Monza Italie [37]

## Chapitre II : La surveillance des monuments historiques

La villa n'a pas été utilisée par la famille royale et pratiquement abandonnée au cours des dernières décennies du XX siècle. Pour cela :

Un développement de fissures le long des voûtes en berceau du corridor central à divers niveaux dans les ailes nord et sud. Ainsi qu'une dégradation de plusieurs structures en bois. Les autorités de Milan et Monza ont décidé de renouveler la villa et de la transformer en un musée.

En raison du système statique structural et des incertitudes liées au comportement structural, il a été entrepris de surveiller la villa avant, pendant et après les travaux. Les données de surveillance ont été pratiquement utilisées pour (gouverner) les travaux de renouvellement. Des capteurs à fibres optiques et conventionnels ont été utilisés.

Les capteurs à fibres optiques étaient principalement utilisés comme extensomètres installés entre les parois, orthogonaux aux axes du couloir, mais des capteurs plus courts étaient également utilisés pour la surveillance des fissures. Une modélisation et une analyse sophistiquée des données ont été effectuées par l'Université de Gênes.

La figure II.12 représente un exemple de résultats, l'analyse du déplacement – corrélation de température.

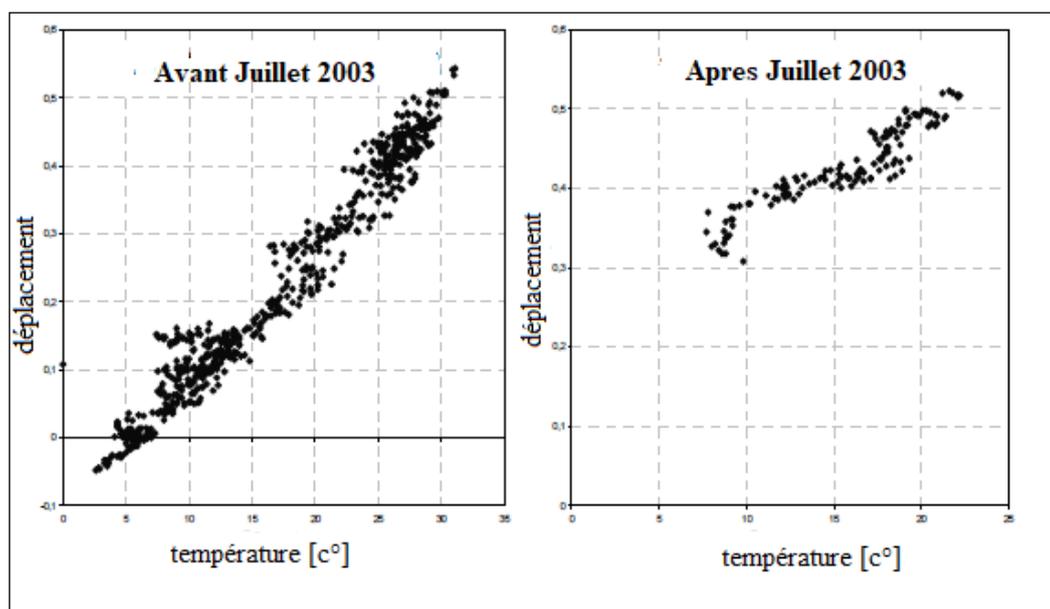


Figure II.12: Résultats de l'analyse du déplacement en fonction de la température [35]

## Chapitre II : La surveillance des monuments historiques

L'interprétation et l'analyse des données dans les ailes ont été effectuées statistiquement, en raison de la complexité de la structure et de l'incertitude liées à son système statique et au comportement structurel.

Il a été conclu que la modification du coefficient de régression indiquait qu'un effet non linéaire s'était produit [38].

- **Pont Bolshoi Moskvoretskiy (Russia) :**

Le pont de Bolshoi Moskvoretskiy a été construit en 1936-1937, sur la rivière de Moscou. Il est situé dans le centre de Moscou, à côté du Kremlin, et conduit l'une des principales lignes de circulation vers la place rouge.

Le pont se compose de trois arches parallèles en béton armé de 100 m de long cachées derrière des murs de pierre. La section de chaque arc contient trois boîtes fusionnées. La superstructure du pont est supportée par des colonnes. Quatre voies de circulation traversent le pont.



Figure II.13: Le pont de Bolshoi Moskvoretskiy [39]

Deux types de dégradation sont observés sur le pont :

- Affaissement au centre de l'arc qui provoque la fissuration des murs de pierre près des culées des deux côtés du pont.
- La diffusion de chlorure qui traverse pratiquement la paroi supérieure des caissons de l'arc dans certaines sections, et pénètre à l'intérieur des boîtes.

## Chapitre II : La surveillance des monuments historiques

L'état du pont après près de 70 ans de service et son importance fonctionnelle et historique ont conduit les autorités à décider de surveiller en permanence le comportement structurel du pont.

Le but de la surveillance est d'accroître les connaissances concernant le comportement structurel de cette très ancienne structure, d'accroître la sécurité et de réduire les coûts de maintenance.

Pour cette surveillance 16 sondes longitudinales ont été installées dans des topologies parallèles afin de contrôler en permanence la déformation moyenne le long de la voûte, la courbure horizontale et verticale ainsi que la forme déformée. Afin de distinguer l'influence thermique, six capteurs de température ont également été installés.

- **La Pagode de Seok-Ga (Korea):**

La pagode de Seok-Ga a été construite au VIII<sup>e</sup> siècle dans la cour du temple de Bulkook (Bulguksa), à Kyung-Ju, en KOREA. La pagode de trois étages est admirée pour ses proportions et son style simple mais gracieux.

Il représente le plus beau style de pagodes bouddhistes coréennes qui a évolué à partir des pagodes en bois de type pavillon multi-toriéd de la Chine. Avec la pagode de Tabotap, elle constitue une composition unique, aucune des quelques milliers de pagodes en pierre éparpillées à travers la Corée ne les a surpassées pour leur profondeur philosophique et leur charme esthétique. Un rouleau de papier du soutra de Dharani de la Pure Lumière, imprimé entre 706 et 751, a été trouvé dans la pagode en 1966, qui est reconnue comme le plus ancien matériel imprimé au monde.



Figure II.14: La pagode de SEOk-Ga KOREA [40]

## Chapitre II : La surveillance des monuments historiques

Le vieillissement des matériaux, l'exposition aux conditions extérieures et les peuplements différentiels font bouger les pierres de la pagode. Comme il n'y a pas de mortier entre les pierres, le mouvement est relativement libre et il y a un risque élevé de distorsion de la pagode ou de dommages graves.

Il a été décidé d'expérimenter la pagode afin d'interpréter son comportement structurel et de contrôler les variations dimensionnelles et le mouvement de la base.

Les résultats de la surveillance sont utilisés pour modéliser le comportement et planifier et optimiser les travaux d'entretien et de conservation. Des capteurs à longue portée ont été installés le long de la base. La position des capteurs lors de l'installation est représentée dans la figure II. 16.

Les capteurs étaient montés en surface et protégés par des plaques métalliques. Les inclinomètres ont également été soutenus protégés avec des boîtes construites à cet effet. Une surveillance continue à long terme est effectuée. Les résultats ne sont pas divulgués [35].

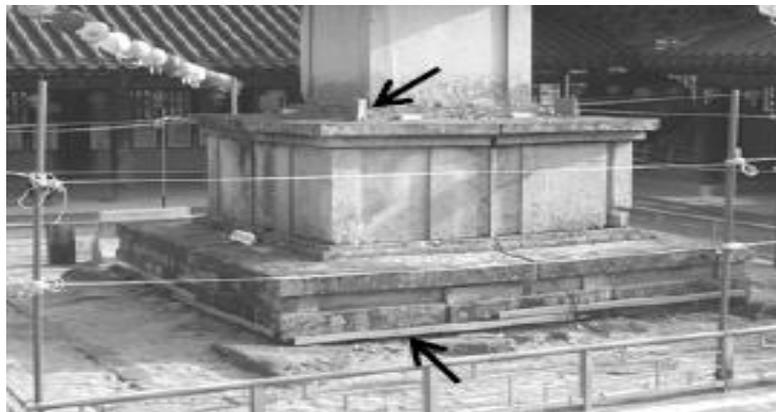


Figure II.15: position des capteurs dans pagode [35]

## 2.5 Conclusion

Ce chapitre passe en revue, l'importance des structures patrimoniales et les monuments historiques à travers le monde d'une part, et l'application de la SHM dans ces bâtisses authentiques d'autre part. En illustrant par des exemples de surveillance à l'aide des capteurs à fibre optique.

Dans le chapitre suivant nous allons exposer le processus d'optimisation du nombre et de l'emplacement des capteurs à placer sur la structure à surveiller.

# ***CHAPITRE III***

***Optimisation du nombre et des  
emplacements des capteurs***

### 3.1 Introduction

En réalité toutes structures possèdent une infinité de degré de liberté, et pour des raisons pratiques et économiques on ne peut pas placer une infinité de capteurs dans une structure.

Ce présent chapitre concerne en premier lieu à l'élaboration d'un modèle numérique en EF du Kalaa des Beni Hammad en utilisant le logiciel de calcul aux Eléments Finis SAP2000®V22 édité par Computers & Structures Inc.

Ensuite, nous nous intéressons à un problème connu, le problème d'optimisation du nombre et d'emplacement des capteurs dans une structure de Génie Civil dans le but de la surveiller.

L'objectif est de proposer un algorithme génétique permettant d'obtenir une solution optimale de bonne performance, qui représente la meilleure configuration pour l'emplacement des capteurs. Avant de présenter notre algorithme génétique, nous faisons une 1<sup>ère</sup> et une 2<sup>ème</sup> sélection selon des critères pour minimiser le nombre des points initial.

Cet algorithme consiste à minimiser une fonction appelée fonction objective. Les différents paramètres de cet algorithme sont ensuite définis. Et nous finirons par l'interprétation des résultats obtenus.

## 3.2 PRESENTATION DE L'OUVRAGE

### 3.2.1 KALAA DE BENI-HAMMAD

C'est un des complexes monumentaux les plus intéressants et les plus précisément datés de la civilisation islamique qui a joué le rôle de capitale berbère de l'Afrique du nord pendant tout l'onzième siècle de notre ère.

La Kalaa de Beni-Hammad est un site archéologique situé dans la wilaya de M'Sila, dans la commune de Maâdid. Le site est classé patrimoine mondial par l'UNESCO depuis 1980.

Elle a été fondée en 1007 par Hammad fils de Bouloughine, de la grande tribu berbère des Sanhadja, qui en fit à cette époque la capitale du Mogreb central.

Cet ensemble, constitué de ruines préservées à 1 000 m d'altitude, sous forme d'un rectangle de 63,30 sur 53,20 mètres.

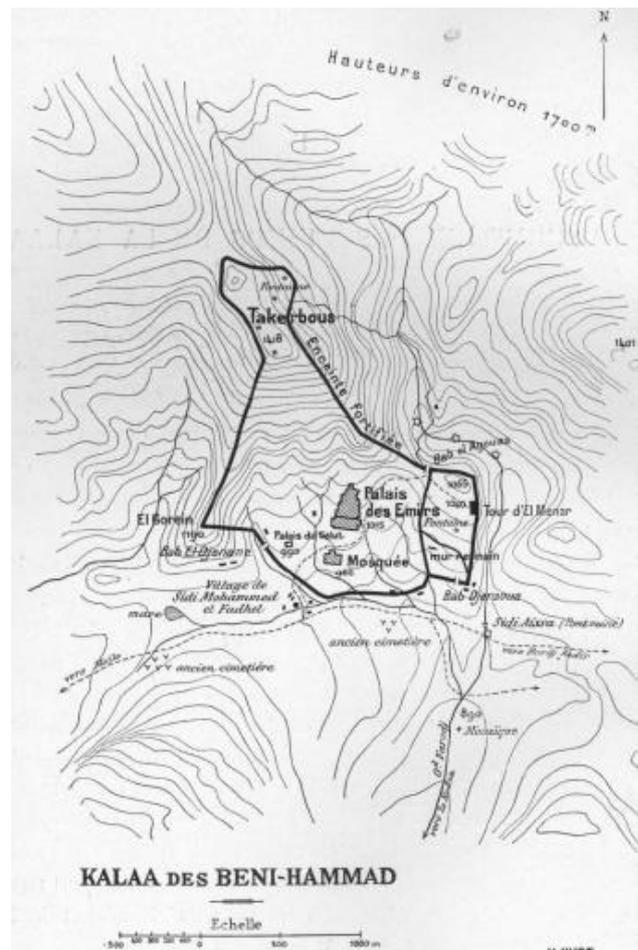


Figure III.1: Lieu géographique de Kalaa de Beni-Hammad [41]

La Kalâa comporte, à l'intérieur d'une enceinte fortifiée de 7 km partiellement démantelée, un grand nombre de vestiges monumentaux, parmi lesquels la grande mosquée et son minaret, et toute une série de palais. La mosquée, avec sa salle de prière mesurant 53,20 sur 34,20 mètres est composée de treize nefes, orientées nord-sud, de 8 travées. Est la plus grande après celle de Mansourah et son minaret est le plus ancien d'Algérie après celui de Sidi Boumerouane. Les ruines de la Kalâa témoignent du grand raffinement de la civilisation Hammadite, d'une architecture originale et de la culture palatiale de l'Afrique du nord.

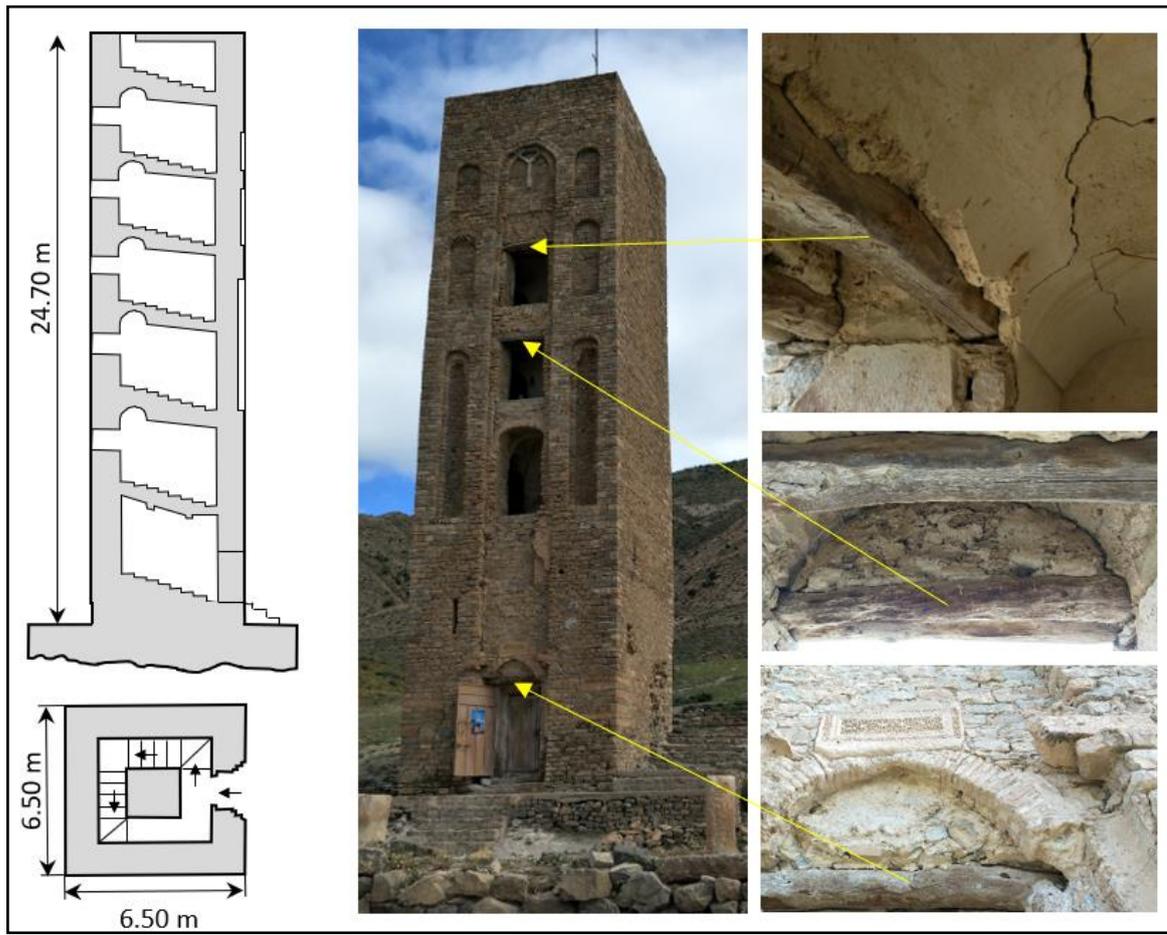


Figure III.2: Kalaa de Beni-Hammad [42]

### 3.2.2 Modélisation du KALAA

Les progrès réalisés dans ces dernières années dans le domaine de la simulation numérique grâce au développement de la MEF, nous a permet l'élaboration de modèles de comportement intégrant les phénomènes d'endommagement d'autre part, et d'autre part l'évolution des moyens informatiques en termes de vitesse de processeur, de capacités mémoire mais aussi de moyens de visualisation, permettent des analyses de structure de plus en plus réaliste.

Le modèle en élément finis a été élaboré à l'aide du logiciel SAP2000v22.

Le modèle contient 5043 nœuds, 3724 éléments « Shell », tel que :

- Les murs extérieurs, noyau central et les escaliers : modélisés par l'élément de type « Shell ».

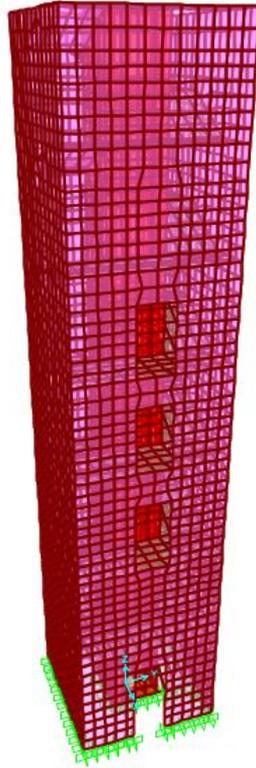


Figure III.3: Modèle 3D du Kalaa de Beni-Hammad

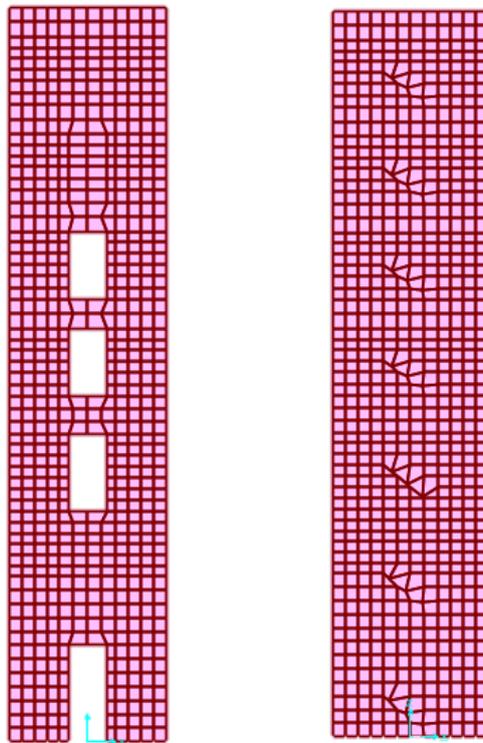


Figure III.4: Modèle 2D du Kalaa de Beni-Hammad (plan Oxz, Oyz)

### 3.2.2.1 Caractéristiques des matériaux

Toutes les composantes de la structure sont construites avec de la maçonnerie en pierre naturelle, dont les caractéristiques sont très variables et incertaines. Nous utilisons des caractéristiques moyennes tirées de la littérature [42].

Poids volumique ( $\gamma$ ) KN/m <sup>3</sup>	20
Module d'élasticité (E) KN/m <sup>2</sup>	2800000
Coefficient de poisson ( $\nu$ )	0.3

Tableau III. 1: Les propriétés de la pierre

### 3.2.2.2 Les conditions d'appuis

La structure est un bâtiment parallélépipède (6.50 m x 6.50 m x 24.70) :

- **A la base :** (encastrement)

Les déplacements ( $U_x, U_y, U_z$ ) et les rotations ( $R_x, R_y, R_z$ ) selon les directions x, y et z sont tous bloqués.

- **En élévation :**

$U_x, U_y, U_z$  : Libres.

$R_x, R_y, R_z$  : Libres.

## 3.3 HYPOTHESES DE TRAVAIL

Pour des raisons de simplification une hypothèse a été introduite, telle que :

- Considération des 12 premiers modes uniquement :

Le nombre de modes de vibration dans une structure de Génie Civil est généralement très grand, il est nécessaire de ne considérer qu'une partie de ces modes dont le taux de participation modale soit le plus significatif.

Dans la suite on examine uniquement les 12 premiers modes propres de la structure, pour les calculs des déformations modales et pour l'optimisation des emplacements des capteurs.

### 3.4 REDUCTION DU NOMBRE DES POSITIONS CANDIDATES

Au premier lieu, on doit mettre en place les inputs de notre algorithme génétique, pour ce faire nous avons pris tous les nœuds du modèle du Kalaa de Beni-Hammad en éléments finis et qui sont au nombre de 5043 nœuds, ensuite on les réduit en deux étapes.

- **Etape 1 :**

Cette première réduction consiste à réduire le nombre d'emplacement candidats selon leurs positions, il est plus commode de prendre les points de l'ouvrage qui sont accessibles et assez espacés les uns des autres pour pouvoir placer un capteur.

Alors on considère que les points qui sont sur les murs extérieurs (sur les quatre côtés) comme indique la figure III.5.

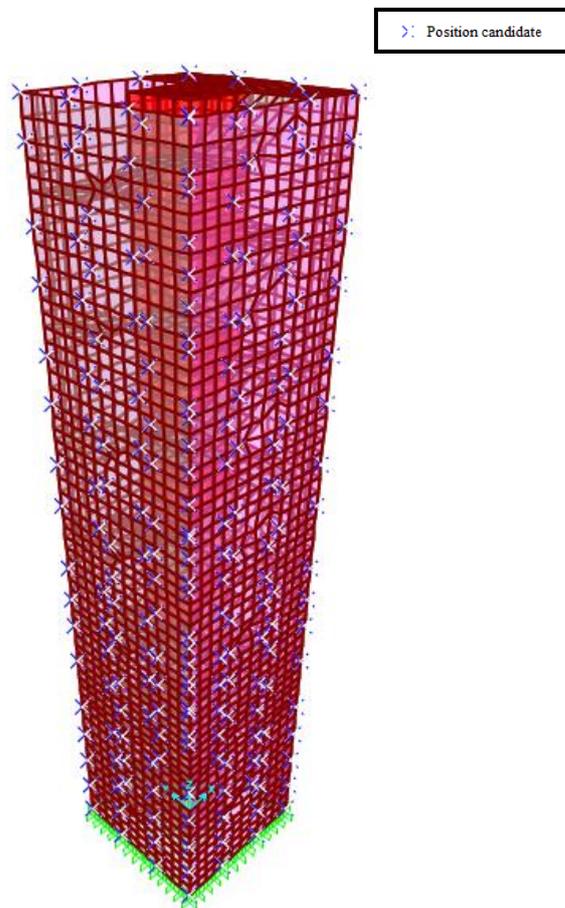


Figure III.5: Emplacements candidats après la première étape de réduction

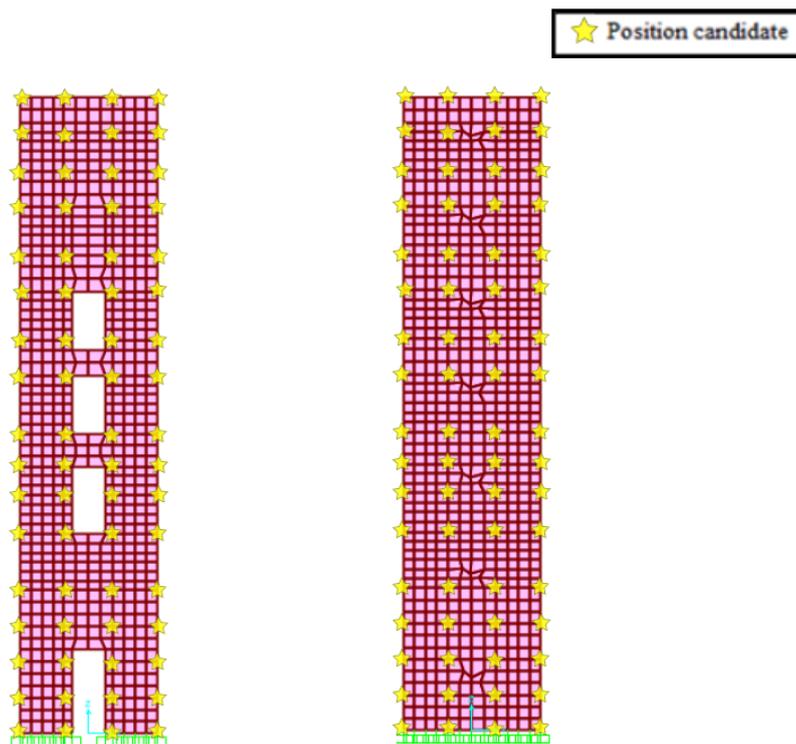


Figure III.6: Positions candidates suivant le plan (oyz)

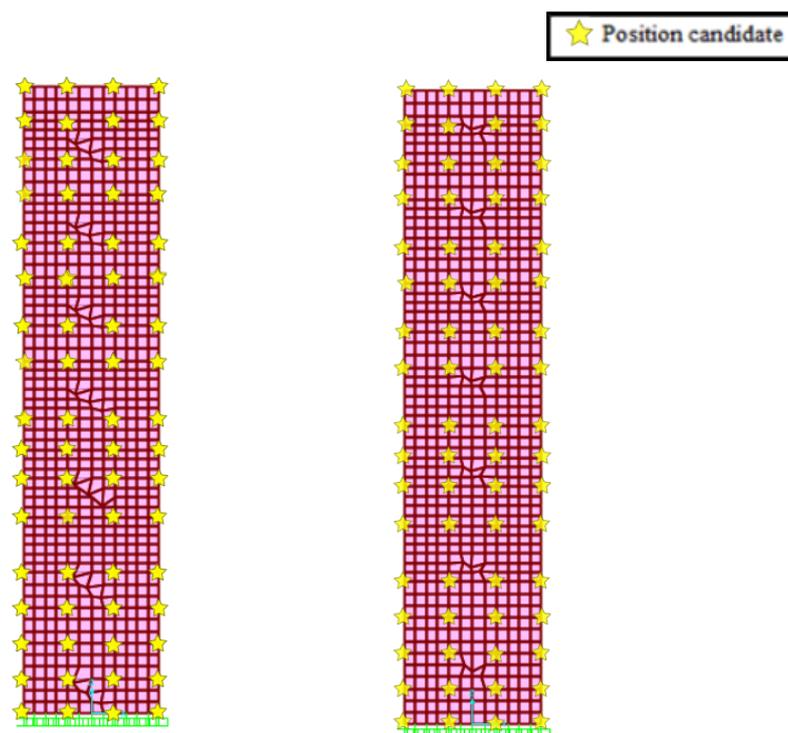


Figure III.7: Positions candidates suivant le plan (oxz)

Ceci nous permet de passer à 204 points (candidats : 612 DDL).

- **Etape 2 :**

La deuxième réduction consiste à réduire le nombre des degrés de liberté en calculant l'information du Fisher (FIM) associée à chacun des degrés de libertés pris individuellement dont l'expression est donnée par l'équation (1) :

$$\varphi^i = \varphi^{iT} \cdot \varphi^i \quad (11)$$

Telle que  $\varphi$  représente la ieme ligne de la matrice des déplacements nodaux associée au ieme degré de liberté.

Cette opération nous permet d'éliminer les degrés de libertés ayant un déplacement modal négligeable dans la direction considérée. Par la suite, on classe les degrés de libertés selon la valeur de  $\varphi_i$  et on prend que les 50% premiers (qui ayant obtenu la valeur la plus grande de  $\varphi_i$ ).

Ceci nous permet de passer de 612 degrés de libertés à 306 degrés de libertés candidats.

- **Suivant l'axe « x » :**

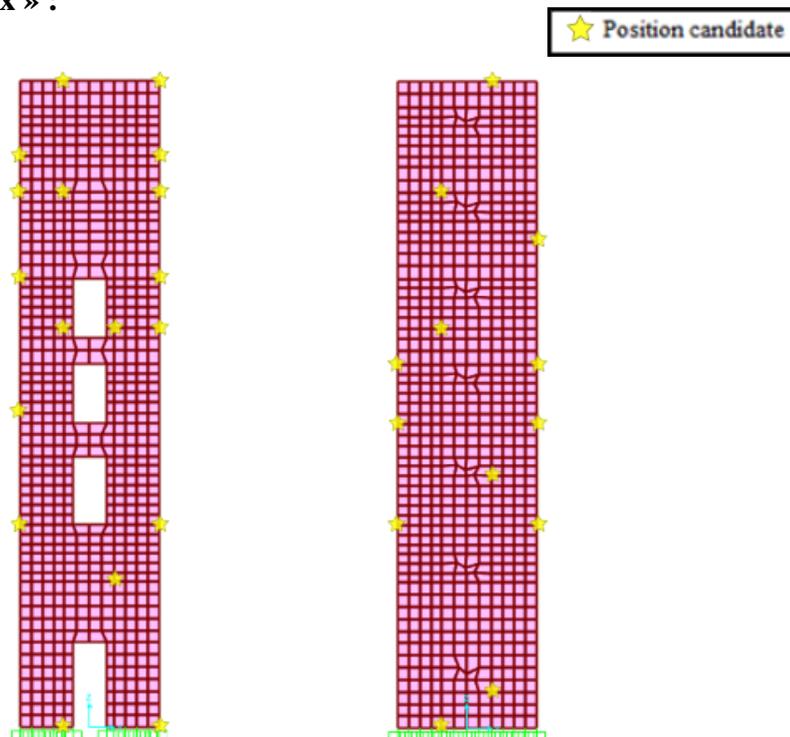


Figure III.8: Positions candidates suivant le plan (oyz)

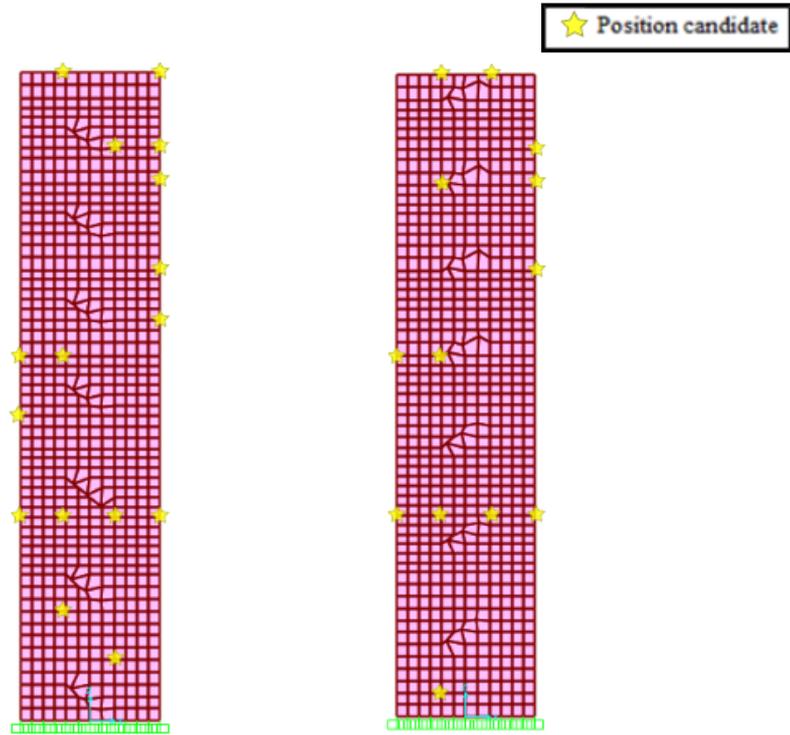


Figure III.9: Positions candidates suivant le plan (oxz)

- **Suivant l'axe « y » :**

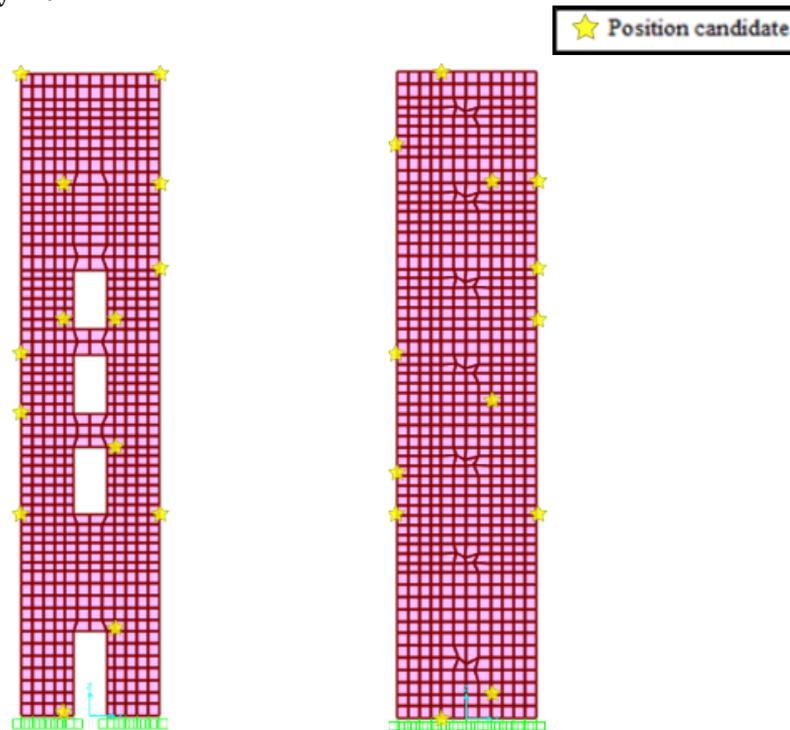


Figure III.10: Positions candidates suivant le plan (oyz)

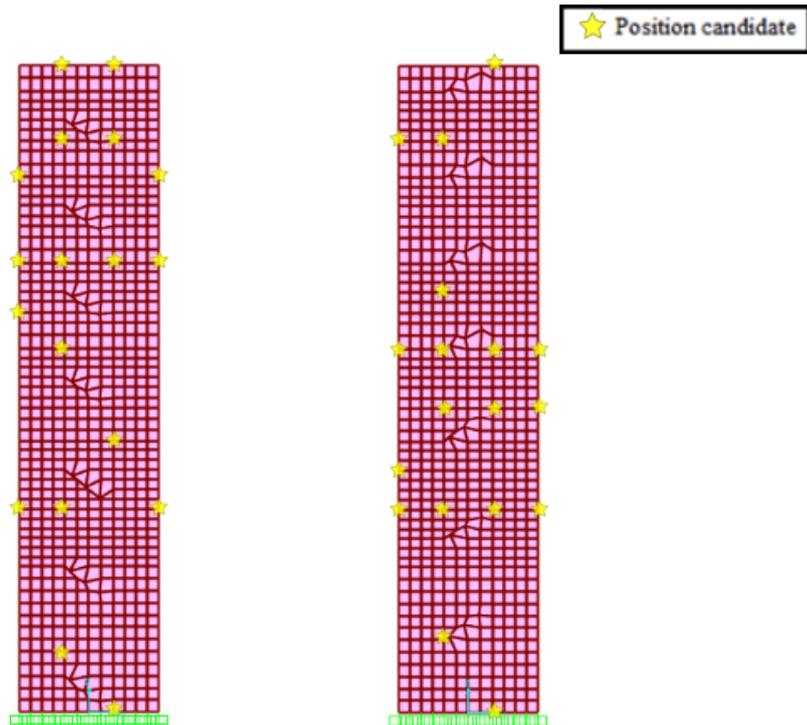


Figure III.11: Positions candidates suivant le plan (oxz)

Suivant l'axe « z » :

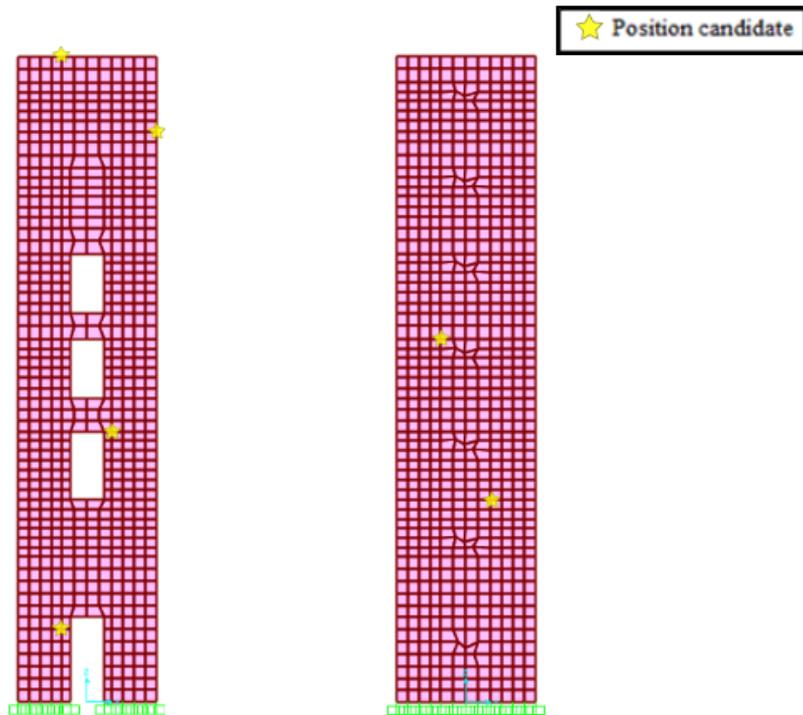


Figure III.12: Positions candidates suivant le plan (oyz)



Figure III 13: Positions candidates suivant le plan (oxz)

### 3.4 LA FONCTION OBJECTIVE

La fonction objective ou fonction fitness associe une valeur de performance à chaque individu ce qui offre la possibilité de le comparer à d'autres individus. Elle permet à l'algorithme génétique de déterminer qu'un individu sera sélectionné pour être reproduit ou pour déterminer s'il sera remplacé [22].

Dans notre cas, on a utilisé la fonction MAC (Modal Assurance Criteron) comme fonction objective, elle est bien détaillée dans le premier chapitre dans la section 1.1.3.1.

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 représentée comme suit :

$$fitness = \sqrt{\sum MAC_{i,j}^2} \quad , \text{ avec : } i \neq j$$

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

### 3.5 LES ETAPES DE L'ALGORITHME GENETIQUE

L'algorithme génétique commence par une génération d'une population initiale qui regroupe un ensemble d'individus, pour lesquels nous calculons leurs fitness et nous trions les individus par une méthode de sélection.

Ces derniers sont manipulés par un opérateur de croisement qui les choisit selon des critères. Leurs résultats peuvent être mutés par un opérateur de mutation. Les phases de sélection et de recombinaison (croisement et mutation) permettent de générer une nouvelle population d'individus, qui ont de bonne chance d'être plus forts que ceux de la génération précédente.

Les individus issus de la phase de recombinaison seront introduits par une méthode d'insertion dans la nouvelle population, dont nous évaluons la valeur de la fonction objective pour chacun de ses individus.

De génération en génération, la force des individus de la population augmente et un test d'arrêt sera effectué pour décider de stopper l'algorithme. Les différentes étapes de ce dernier sont présentées, en détail dans les sections suivantes.

#### 3.5.1 La création de la population initiale

Le processus de l'optimisation par AG commence par choisir aléatoirement dans l'espace de recherche un nombre fini d'individus qui vont constituer la population initiale.

La manière de créer chacun des individus de cette population est entièrement libre. Il suffit que tous les individus créés soient de la forme d'une solution potentielle, et il n'est pas nécessaire de créer de bons individus. Ils doivent juste fournir une réponse, même mauvaise au problème posé. Cette méthode amène à un concept très utile dans les algorithmes génétiques : la diversité.

Pour notre algorithme génétique, on a généré aléatoirement 50 individus (solutions potentielles) comportant chacun 10 chromosomes (capteurs).

### 3.5.2 L'évaluation des individus

Une fois que la population initiale a été créée, nous allons en sortir les individus les plus prometteurs, ceux qui vont participer à l'amélioration de notre population.

Pour cela nous avons évalué chacun de ces individus par la fonction objective et nous les avons classés du meilleur au pire.

### 3.5.3 La création des nouveaux individus

- **La sélection :**

Comme son nom l'indique, la sélection permet d'identifier statistiquement les individus de la population courante qui seront autorisés à se reproduire. Cette opération est fondée sur la performance des individus, estimée à l'aide de la fonction objective. Cet opérateur est peut-être le plus important puisqu'il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir.

Il existe différentes méthodes de sélection qui sont : la sélection par roulette, la sélection par rang, la sélection par tournois, la sélection élitiste.

Dans notre cas on a choisi d'utiliser une sélection par rang pour sélectionner les individus qui seront croisés entre eux.

Cette méthode de sélection est divisée en deux étapes. Tout d'abord, il faut ranger les individus par ordre croissant (ou décroissant) de performance. Ensuite, une procédure de sélection similaire à la sélection par roulette est utilisée. Cette procédure permet d'attribuer une probabilité de sélection en fonction du rang. Cette stratégie permet de réduire le risque d'un même individu soit sélectionné plusieurs fois comme c'est le cas avec d'autres méthodes de sélection comme la roulette. Grâce à la répartition des probabilités selon la performance relative, les individus mieux adaptés à leur environnement sont naturellement avantagés et plus susceptibles de contribuer à la reproduction.

La suite consiste uniquement en l'implémentation d'une roulette (figure III-4) basée sur les rangs des individus. L'angle de chaque secteur de la roue sera proportionnel au rang de l'individu qu'il représente.

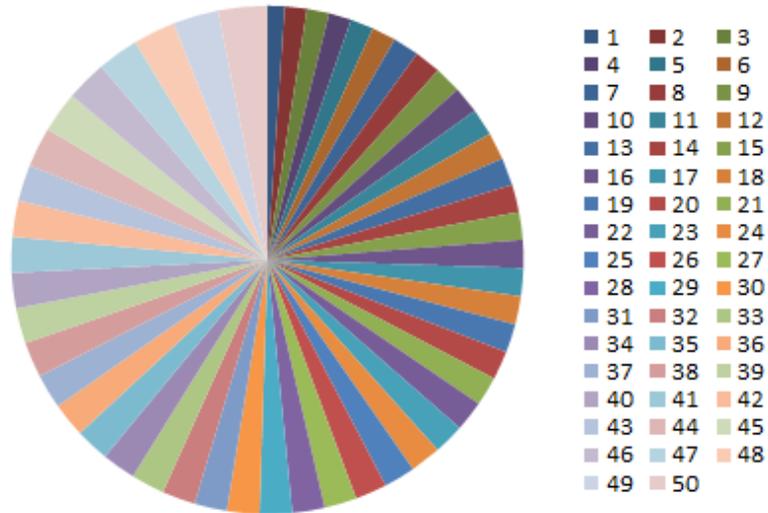


Figure III.14: Diagramme circulaire représentant la probabilité de sélection de chaque individu selon son rang.

- **Le croisement :**

Les croisements permettent de simuler des reproductions d'individus dans le but d'en créer des nouveaux. Il est tout à fait possible de faire des croisements aléatoires.

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.

- **Exemple :** A et B deux individus définis comme suit :

$$A = [215, 269, 160, 186, 103, 6, 36]$$

$$B = [248, 83, 278, 13, 48, 47, 179, 291, 290, 254]$$

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

$$(A \oplus B) = [248, 83, 278, 215, 179, 103, 6]$$

Ou bien :  $(A \oplus B) = [13, 48, 269, 179, 215, 36]$ , Ou bien ...

## Chapitre III : Optimisation du nombre et des emplacements des capteurs

- **La mutation :**

Le but de la mutation est de préserver la capacité de l'AG à trouver de nouvelles bonnes solutions en gardant une certaine diversité génétique dans la population.

Pour ce faire :

- 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).
- 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 égales.

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

Dans notre algorithme on distingue trois types de mutation :

- **1<sup>er</sup> type** : Mutation en changeant un chromosome aléatoirement à un individu :

**Exemple :**

$B = [248, 83, 278, 13, 48, 47, 179, 291, 290, 254]$

$B^* = [248, 83, 278, 13, 48, 47, 179, 90, 290, 254]$

- **2<sup>eme</sup> type** : Mutation en enlevant un chromosome aléatoirement à un individu :

**Exemple :**

$B = [248, 83, 278, 13, 48, 47, 179, 291, 290, 254]$

$B^* = [248, 83, 278, 48, 47, 179, 291, 290, 254]$

- **3<sup>eme</sup> type** : Mutation en ajoutant un chromosome aléatoirement à un individu :

### Exemple :

$B = [248, 83, 278, 13, 48, 47, 179, 291, 290, 254]$

$B^* = [248, 83, 278, 13, 48, 47, 179, 291, 269, 290, 254]$

### 3.5.4 L'insertion de nouveaux individus dans la population

Une fois que nous avons créé de nouveaux individus que ce soit par croisements ou par mutations, il nous faut sélectionner ceux qui vont continuer à participer à l'amélioration de notre population.

Pour choisir les individus qui vont continuer, d'abord on classe les 150 individus selon leur qualité du meilleur au pire, puis on prend les 50 meilleurs individus de la population et on passe à la génération suivante.

## 3.6 RESULTATS ET COMMENTAIRES

L'algorithme génétique a été développé sur le logiciel python, après 30.000 itérations nous avons obtenu les résultats suivants :

- A l'initialisation de l'algorithme, le nombre des capteurs au départ est égale à 10 par individu, au cours d'exécution de l'algorithme il s'est avéré qu'il n'était pas optimal il a augmenté progressivement jusqu'à de se stabiliser à 65 (figure III-15).

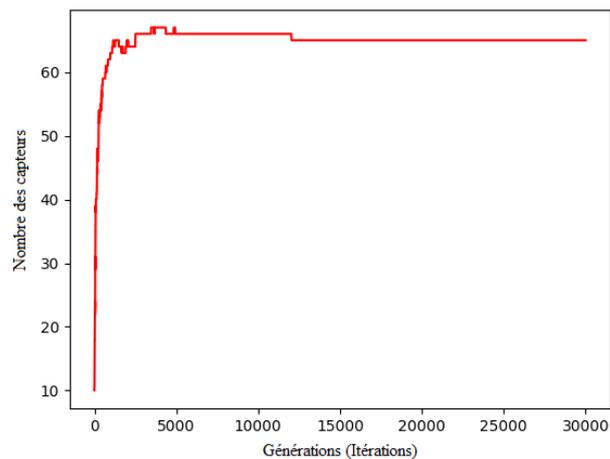


Figure III.15: Evolution du nombre de capteur du meilleur individu au cours des générations

- La qualité de la population évolue très rapidement au début puis de moins en moins vite avant de prendre une valeur fixe (figure III-16).

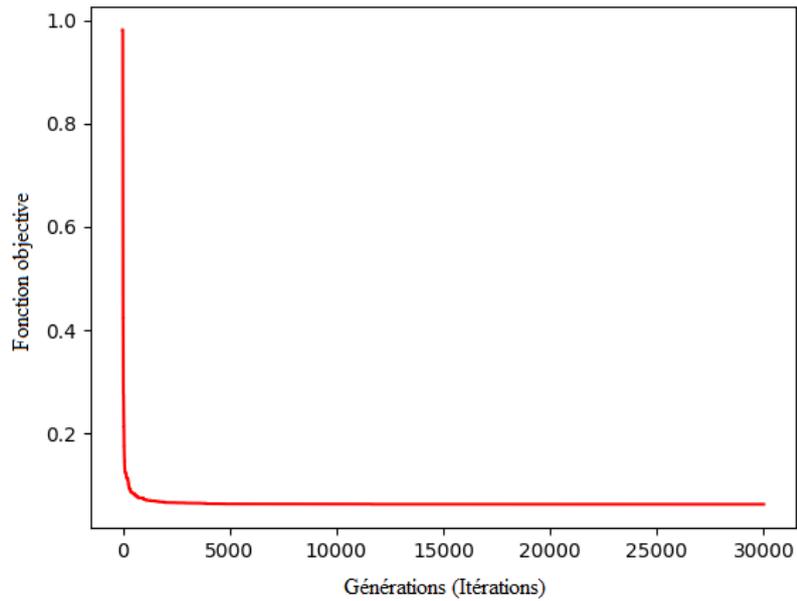


Figure III.16: Evolution de la qualité du meilleur individu au cours des générations

- Le meilleur individu de la population finale représente la solution optimale du problème, il donne la meilleure configuration pour l'emplacement des capteurs dans notre structure, tel que :
- **Suivant l'axe « x »** : Nombre des capteurs égaux à 30, distribués comme suit :

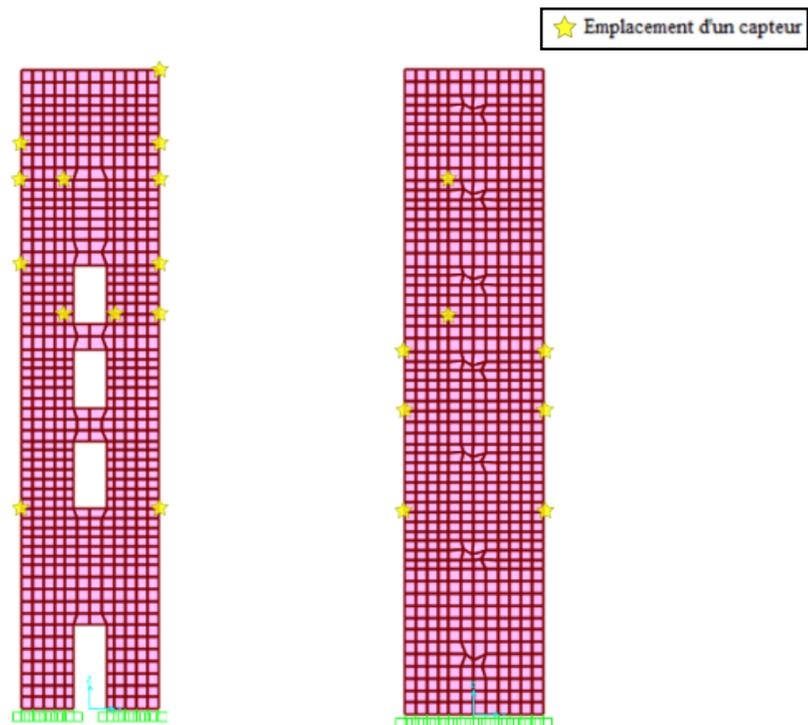


Figure III.17: Positions candidates suivant le plan (oyz)

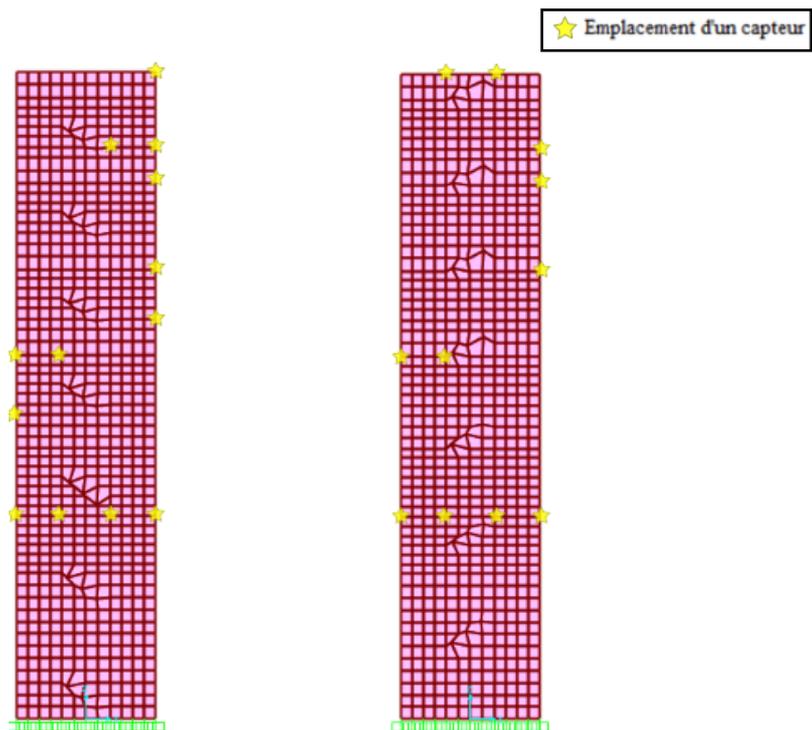


Figure III.18: Positions des capteurs suivant le plan  $(oxz)$

- **Suivant l'axe « y » :** Nombre des capteurs égaux à 34, distribués comme suit :



Figure III.19: Positions candidates suivant le plan  $(oyz)$



Figure III.20: Positions des capteurs suivant le plan (oxz)

- **Suivant l'axe « z » :** Selon cette direction on a 1 seul capteur, situé comme suit :



Figure III.21: Positions candidates suivant le plan (oyz)



Figure III.22: Positions des capteurs suivant le plan (oxz)

- Justifications du choix d'emplacement :
  - Dans un bâtiment les déplacements horizontaux sont plus considérables que les déplacements verticaux.
  - Selon le DDL ( $z$ ) les déplacements sont négligeables à cause de la grande rigidité verticale.
  - Les résultats obtenus par l'application de l'algorithme génétique sont potentiellement bons et reste à confirmer avec la performance du réseau de neurones.

### 3.7 Conclusion

Les algorithmes génétiques sont des procédures assez robustes pour résoudre n'importe quel problème d'optimisation. Néanmoins, les algorithmes génétiques présentent certaines limites et difficultés telles que le choix des bons paramètres comme la taille de la population, le nombre de génération, les probabilités de croisement, de mutation et les méthodes des opérateurs de production.

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'établissement d'une procédure de surveillance des dommages du Kalaa.

Dans le chapitre suivant, nous allons aborder le processus d'identification et de localisation des dommages par la méthode des réseaux de neurones artificiels.

# ***CHAPITRE IV***

*Identification des dommages par la  
méthode des réseaux de neurones  
artificiels*

## 4.1 Introduction

La présence d'endommagement provoque une diminution de la rigidité de la structure, (une augmentation de sa flexibilité) et de son amortissement que l'on retrouve dans la forme des modes et les valeurs des fréquences.

Utilisant le changement de ces informations entre un état sain et un état endommagé, plusieurs méthodes non-destructives ont été proposées pour identifier et localiser ces endommagements.

L'objectif de ce chapitre est d'améliorer les performances de la méthode de variation de flexibilité comme indicateur de dommage en intégrant des réseaux de neurones pour la prédiction des dommages. Ces réseaux sont un outil efficace pour la reconnaissance des indices, capable de sélectionner des paramètres et des caractéristiques optimales afin de donner la localisation et la sévérité du dommage.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons la méthode de variation de flexibilité ainsi les différents scénarios d'endommagements, et la récupération des propriétés dynamiques de la structure par une analyse modale numérique.

Par la suite, les résultats de la méthode de variation de flexibilité basée sur la forme réduite des déformées ont été exploités afin de créer une base de données. Ce qui servira comme entrée aux réseaux de neurones.

La dernière partie est consacrée à l'implémentation des réseaux de neurones en précisant le choix des différents paramètres du réseau.

## 4.2 LA METHODE DE VARIATION DE LA MATRICE DE FLEXIBILITE

### 4.2.1 Principe de la méthode

La matrice de flexibilité est définie comme étant l'inverse de la matrice de rigidité. La diminution de rigidité provoquée par l'endommagement entraîne l'augmentation de la flexibilité, autrement dit qu'en augmentant le nombre de fréquences, la matrice de flexibilité converge rapidement.

Cette méthode utilise la matrice de raideur dynamique mesurée afin de détecter des endommagements existant dans la structure.

En règle générale, l'endommagement est détecté en comparant la matrice de flexibilité endommagée avec la matrice de flexibilité de la structure saine.

Les matrices de flexibilité  $[F_s]$  et  $[F_e]$  des structures dans les 2 cas saine et endommagée s'écrivent respectivement :

$$F_s = [\Phi] \cdot [\Omega]^{-1} \cdot [\Phi]^T = \sum_{i=1}^N \frac{1}{w_i^2} \phi_i \phi_i^T \quad (12)$$

$$F_e = [[\Phi^e] \cdot [\Omega]^{-1} \cdot [\Phi^e]^T = \sum_{i=1}^N \frac{1}{w_i^{e2}} \phi_i^e \cdot \phi_i^{eT} \quad (13)$$

Avec :

$w_i, w_i^e$  : Fréquences naturelles des structures respectivement saine et endommagée.

$\phi_i, \phi_i^e$  : Vecteurs propres normalisés des structures saines et endommagées.

$\Omega$  : Matrice modale ( $\Omega = \text{diag}(w^2)$ ).

N : Nombres des modes mesurés.

Disposant des vecteurs propres de la structure saine, obtenus par la méthode des éléments finis, et endommagés avec l'introduction de quelques endommagements, nous pouvons déduire la variation de flexibilité F due à l'endommagement :

$$\Delta F = F^s - F^e = [\delta_{ij}] \quad (14)$$

Où  $\delta_{ij}$  : sont les éléments de la matrice de la variation de flexibilité  $\Delta F$ .

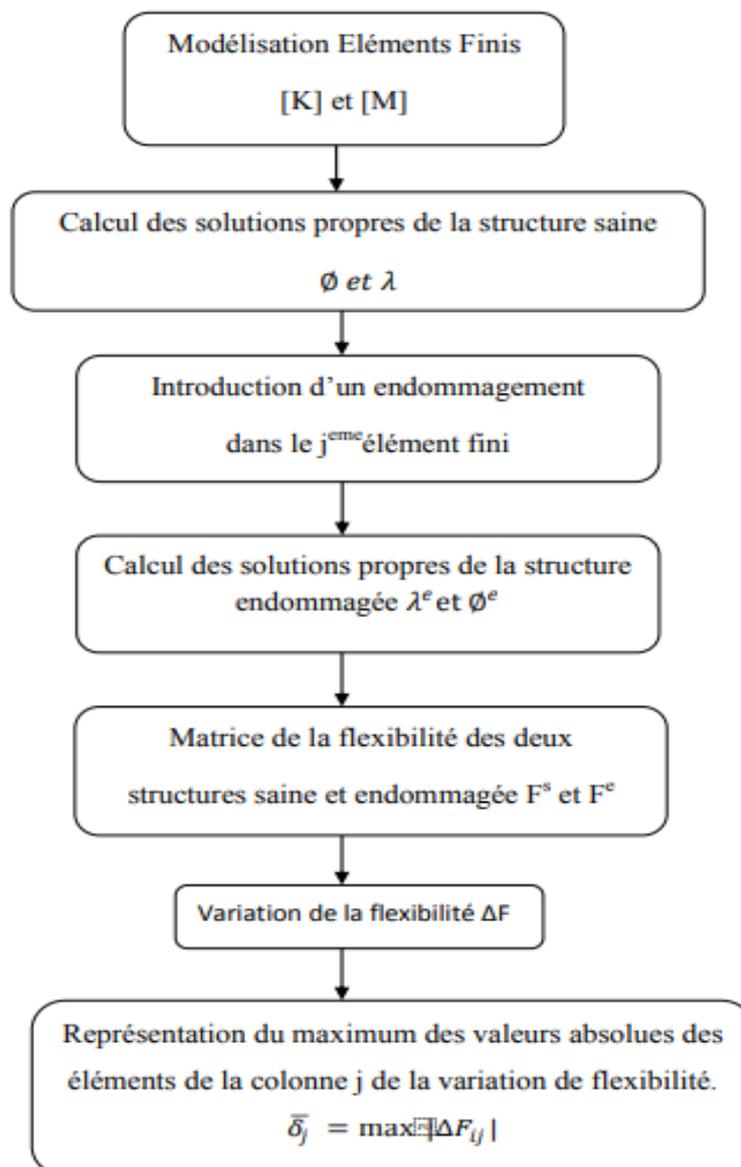
$$\bar{\delta}_{ij} = \max |\Delta F_{ij}|$$

$\bar{\delta}_{ij}$  : représente le maximum des valeurs absolues des éléments de la colonne j de la variation de flexibilité.

L'avantage principal de cette méthode est :

- La localisation d'endommagement ne nécessite qu'un nombre réduit de modes de la structure généralement les modes fondamentaux.
- La matrice de flexibilité converge rapidement avec des valeurs croissantes de la fréquence, c'est l'avantage de l'utilisation de la flexibilité au lieu de la rigidité [43].

#### 4.2.2 Organigramme de la méthode de variation de la matrice de flexibilité



### 4.3 SIMULATION DES DOMMAGES DANS LA STRUCTURE

#### 4.3.1 Choix des zones d'endommagement

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. La figure IV 2 représente la distribution des contraintes sur la façade étudiée en prenant en compte les différentes sollicitations existantes.

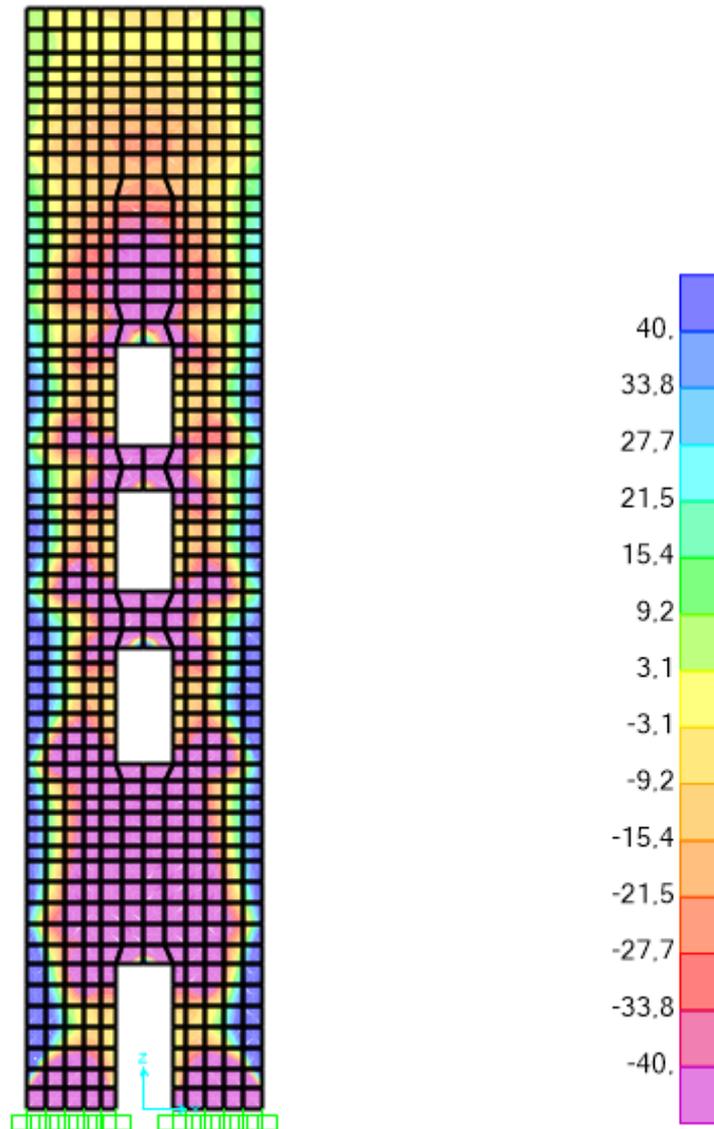


Figure IV.1: Contraintes de compression sur la façade principale

Les zones choisies sont celles qui présentent un grand risque d'apparition de fissures. On choisit 6 zones principales d'endommagement de « A » à « F ».

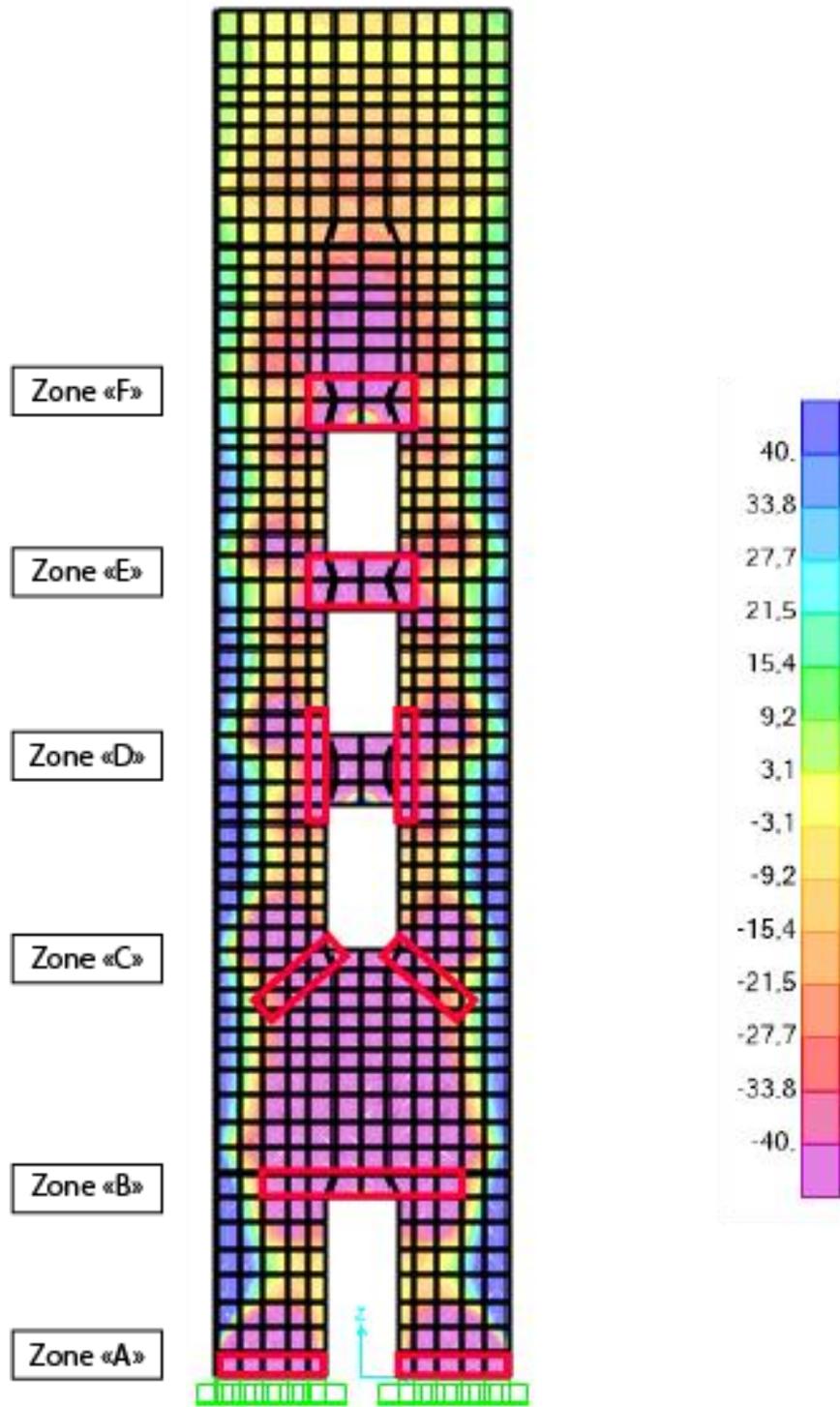


Figure IV.2: Les zones principales d'endommagement

Ces zones sont définies et décrites en détail dans les sections suivantes.

- **Zone A :**

La zone « A » représente la base du bâtiment qui peut être soumise à de fortes contraintes. La présence de ces pressions peut induire un endommagement. La section « A » est subdivisée en 10 petites zones désignées par : A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9 et A10.

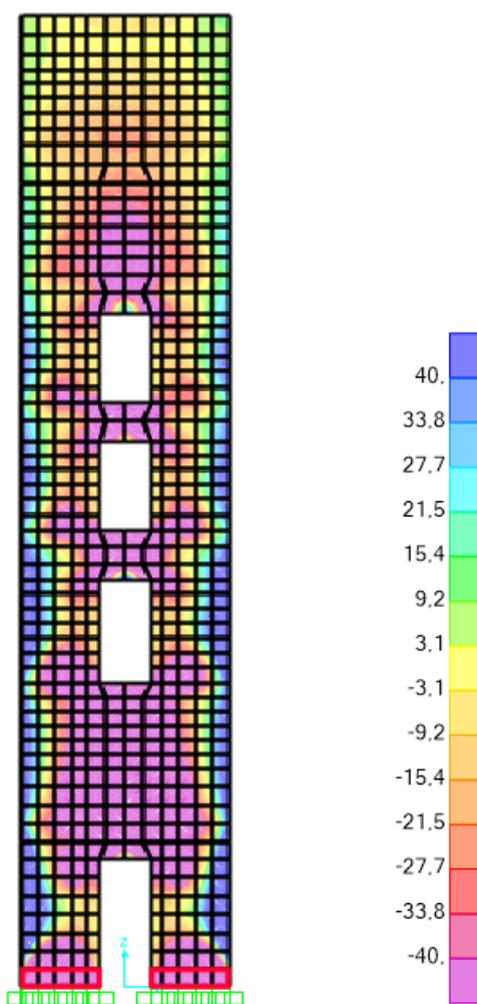


Figure IV.3 : La zone A dans son intégralité

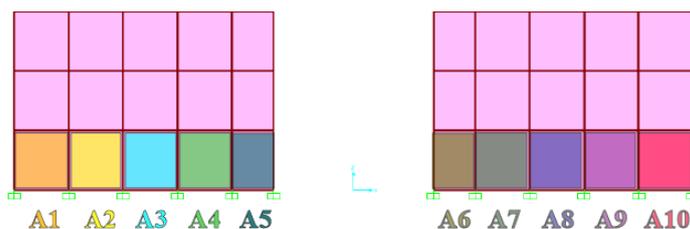


Figure IV.4: Subdivisions de la zone A

- **Zone B :**

La partie située au-dessus de la porte présente un risque d'endommagement à cause de l'ouverture, on affecte la lettre « B » à cette zone. On la subdivise en 8 plus petites zones désignées par : B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7 et B8.

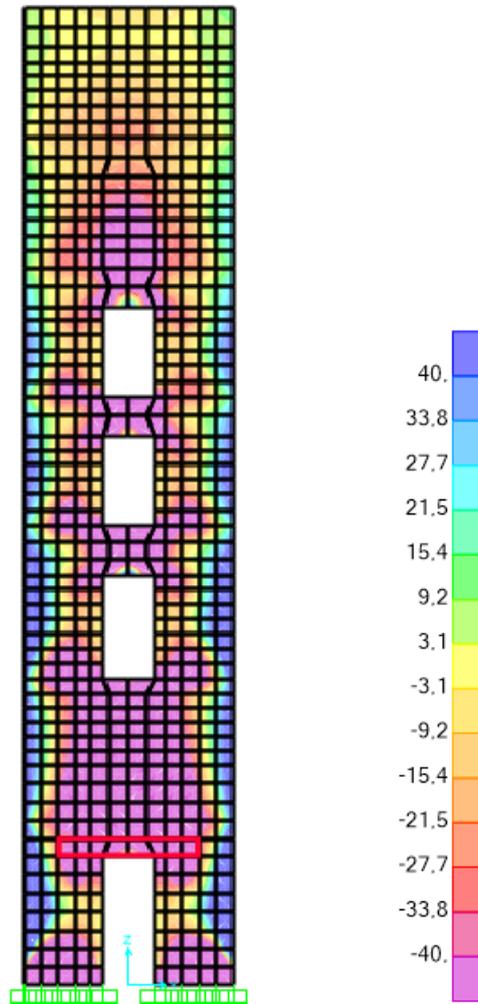


Figure IV.5; La zone B dans son intégralité

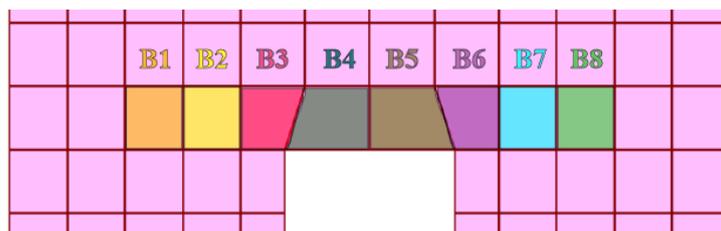


Figure IV.6: Subdivisions de la zone B

- **Zone C :**

Tout comme la zone B on définit la zone C où on risque d'avoir des fissures aux angles des fenêtres. Elle est subdivisée en 6 petites zones : C1, C2, C3, C4, C5 et C6.

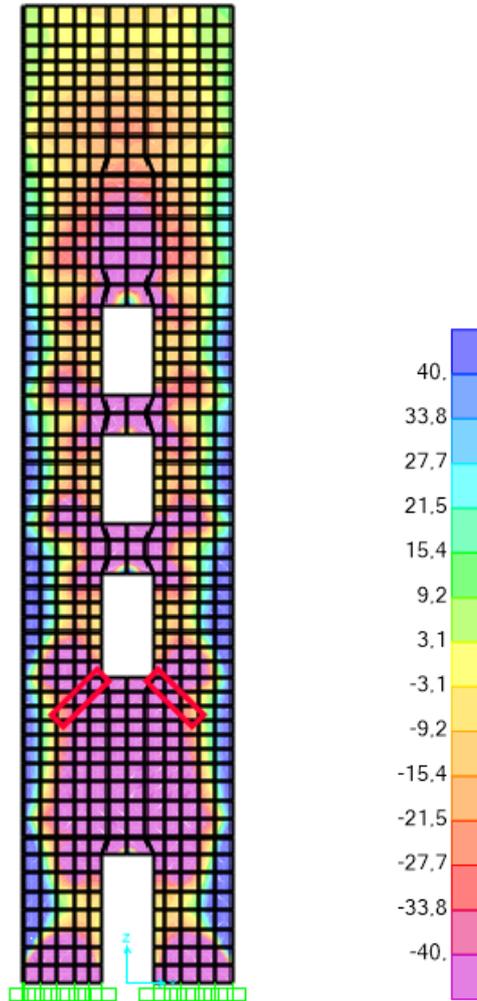


Figure IV.7: La zone C dans son intégralité

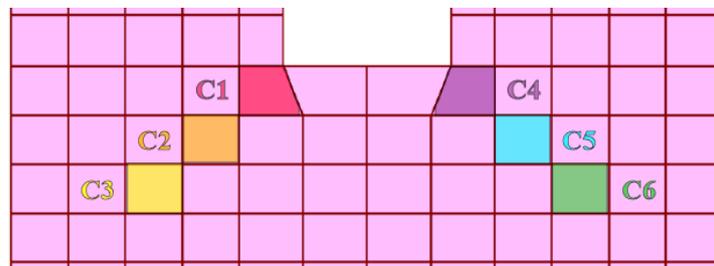


Figure IV.8: Subdivisions de la zone C

- **Zone D :**

La zone située entre les 2 fenêtres est sujette à de fortes contraintes, elle est subdivisée en 10 petites zones : D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9 et D10.

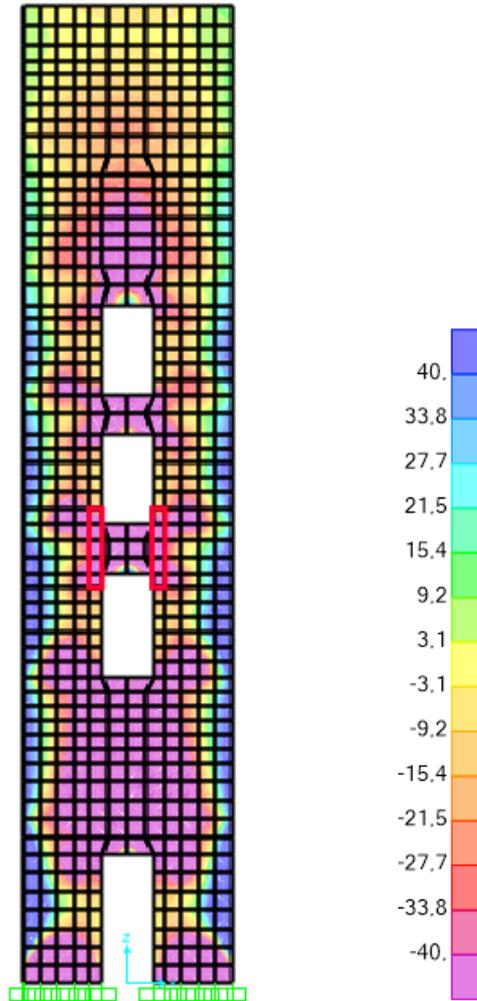


Figure IV.9: La zone D dans son intégralité

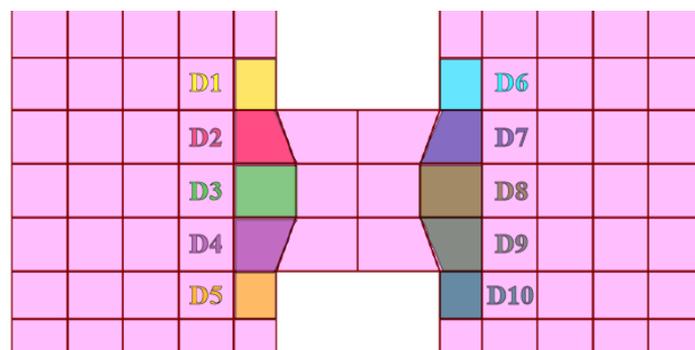


Figure IV.10: Subdivisions de la zone D

- **Zone E :**

Tout comme la zone D on définit la zone E, et on la subdivise en 8 zones tel que : E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7 et E8.

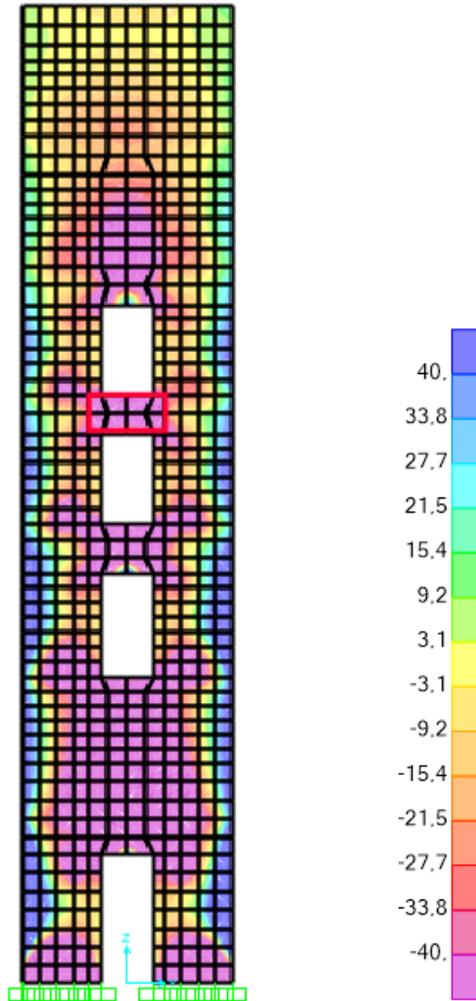


Figure IV.11: Zone E dans son intégralité

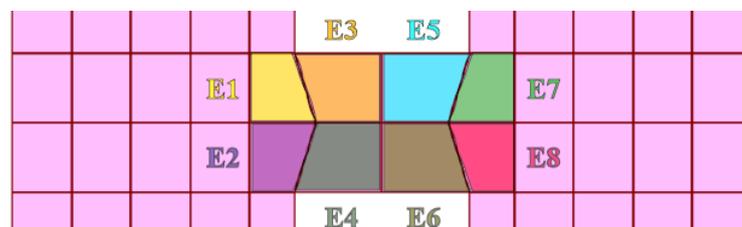


Figure IV.12: Subdivisions de la zone E

- **Zone F :**

Comme la zone B on définit la zone F, située au-dessus de la 3<sup>ème</sup> fenêtre, on la subdivise en 8 petites zones : F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7 et F8.

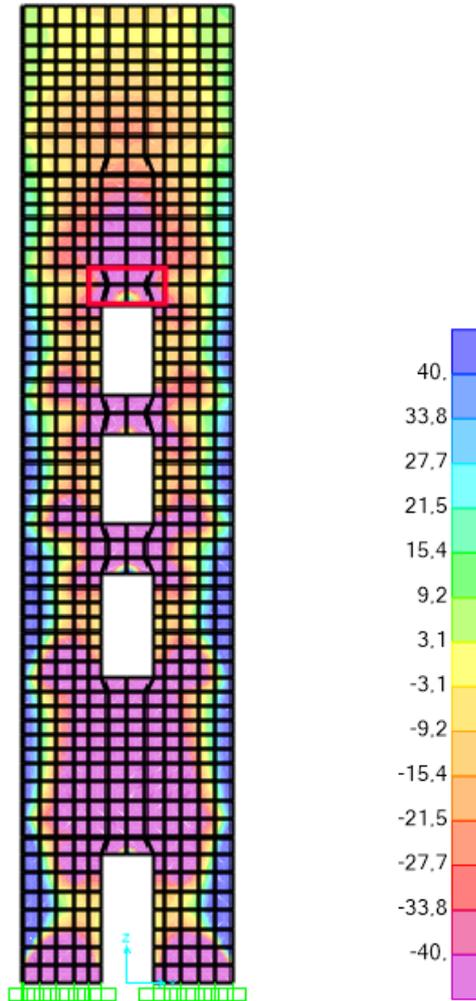


Figure IV.13: Zone F dans son intégralité

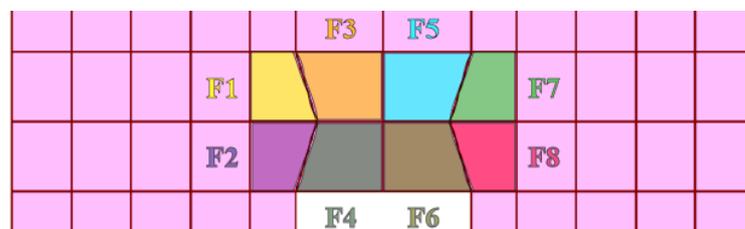


Figure IV.14: Subdivisions de la zone F

### 4.3.2 La génération d'une base de données :

Les étapes de la création de la base de données qui servira par la suite à l'apprentissage de notre réseau de neurones sont les suivantes :

- La sélection de la zone d'endommagement.
- La sélection des nœuds selon les trois directions x, y et z tels que : 30 nœuds selon DDL « x », 34 selon DDL « y » et 1 seul selon DDL « z ».
- La récupération des fréquences et des déformés propres du modèle à l'aide de l'interaction Matlab-SAP2000V22.
- Le calcul de la matrice de flexibilité à l'état sain  $[F_s]$  et à l'état endommagé  $[F_e]$  à l'aide de logiciel Excel utilisant les formules données précédemment dans la section 4.1.1.
- Le calcul de la variation de la matrice de flexibilité  $[\Delta F]$  entre l'état sain et chaque état d'endommagement repose sur la formule donnée précédemment dans la section 4.1.1.
- Refaire les mêmes étapes pour toutes les autres zones d'endommagements.
- A la fin les variations seront regrouper dans un nouveau fichier Excel, et qui seront utiliser par la suite comme étant des inputs à notre réseau de neurones.

On choisit de prendre une baisse de rigidité variant de 1 % à 80 % avec un pas de 1 % 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  $0,99 * E_0$  puis égale à  $0,98 * E_0$  ... jusqu'à  $0,2 * E_0$ .

#### 4.4 DETECTION DES DOMMAGES PAR RESEAU DE NEURONES

Dans notre étude, un réseau de neurones a été conçu en ayant comme entrée 65 neurones représentant la variation de flexibilité des 46 nœuds constitutifs et en sortie un vecteur de six composantes de localisation du dommage et la valeur de la sévérité du dommage.

On a utilisé la Librairie Keras écrite en Python qui permet d'interagir avec les algorithmes de réseaux de neurones profonds et d'apprentissage automatique, elle accède à une exécution rapide, capable d'aller de l'idée au résultat avec un délai optimal.

L'identification des dommages par la méthode des réseaux de neurones artificiels contient quatre (04) étapes essentielles :

- Choix de l'entrée et de la sortie.
- Choix de la structure du réseau.
- Algorithme d'apprentissage.
- Validation.

##### 4.4.1 Choix de l'entrée et de la sortie

Un modèle numérique en éléments finis de notre structure a été élaboré précédemment à l'aide du logiciel SAP2000V22 en prenant les dimensions réelles du Kalaa de Beni Hamad. Qui a été ensuite utilisée pour exécuter l'analyse modale et extraire les caractéristiques dynamiques du modèle.

Les endommagements ont été supposés se produire dans différents éléments surfaciques de la façade principale du Kalaa.

Les variations de la flexibilité ainsi calculées sont utilisées comme input au réseau de neurones sous forme de vecteurs de dimension 65. En sortie, on récupère un vecteur de localisation de dimension 6 contenant des zéros pour les zones non endommagées et 1 pour la zone endommagée ainsi que la valeur du taux de sévérité du dommage.

#### 4.4.1.1 Normalisation des données d'entrée et de sortie :

Pour assurer la précision des réseaux de neurones il faut normaliser les données d'entrée et de sortie.

Les réseaux de neurones fournissent habituellement des performances améliorées lorsque les données se situent dans la plage [0 ; 1]. Lorsqu'une fonction sigmoïde est utilisée, un lent taux d'apprentissage se produit près des points d'extrémité de la fonction sigmoïde [44].

Pour éviter cela, toutes les valeurs d'entrée et de sorties associées ont été transformées en valeurs allant de [0.1 ; 0.9] plutôt que de [0 ; 1].

La normalisation est donnée par l'équation suivante :

$$X_T = \frac{X - X_{max}}{X_{max} - X_{min}} \quad (15)$$

Où :

$X_T$  : La valeur normalisée.

$X$  : La valeur d'origine.

$X_{max}$  : La valeur maximale de l'attribut ou de la sortie.

$X_{min}$  : La valeur minimale de l'attribut ou de la sortie.

Pour les sorties, nous testerons ces cas de figures :

- Vecteur binaire de taille 1\*6, retournant 0 pour les éléments sains et 1 pour les éléments endommagés. Les numéros des colonnes correspondent aux numéros des éléments.
- L'ampleur est donnée directement en sortie par sa valeur en pourcentage.

#### 4.4.2 Topologie du réseau de neurones :

Le choix d'une topologie d'un réseau est difficile, si le nombre d'unités cachées est trop petit, alors le réseau peut ne pas être suffisant pour développer la représentation interne requise du problème et peut ne pas être en mesure d'effectuer la reconnaissance nécessaire (sous-apprentissage).

D'un autre côté, si le nombre d'unités cachées est trop élevé, le réseau peut apprendre à classer correctement toutes les données de la phase d'apprentissage, mais ses performances se détérioreront dans la phase de test. C'est le cas du sur-apprentissage, où le réseau mémorise les données d'apprentissage plutôt que le modèle incorporé dans les données d'apprentissage.

Comme il n'y a pas de moyen direct et précis de déterminer le nombre le plus approprié de couches cachées et le nombre de neurones à inclure dans chaque couche cachée pour un problème, une procédure d'essais et d'erreurs a été utilisée pour approcher la meilleure topologie de réseau pour ce problème. En se basant sur des travaux antérieurs [45] [46]. Dans cette étude, un seul type de réseau a été examiné.

Les scénarios d'endommagements ont été réalisés sur 6 zones d'endommagements, dans lesquels on supposait 80 cas de réduction de rigidité. Donnant au total 480 cas d'endommagement. 70% de la base de données a été utilisé pour l'apprentissage et 30% pour la validation et le test.

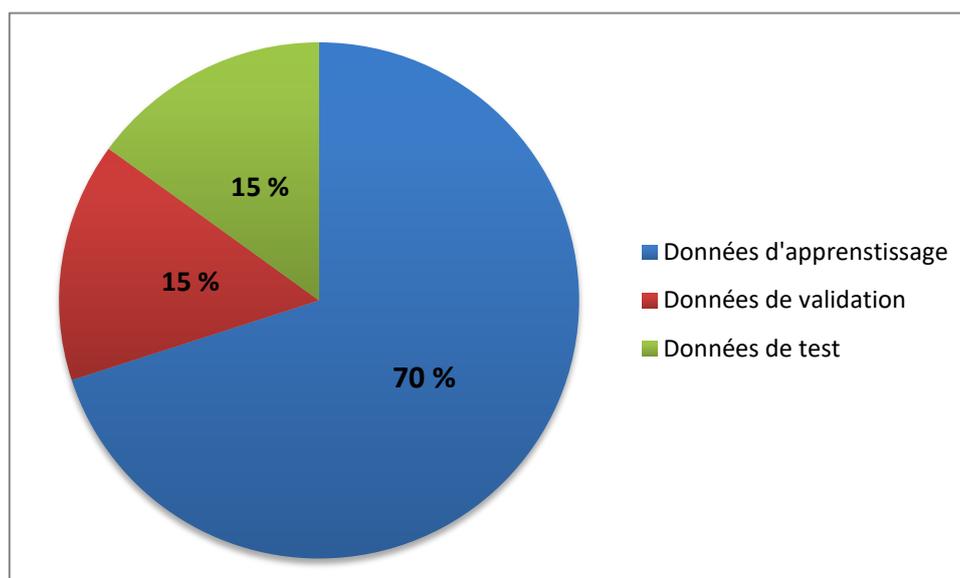


Figure IV 15: Sous ensemble de la base de données initiales

Le modèle utilisé de réseau de neurones qui reçoit la variation de flexibilité et donne en sortie la localisation en vecteur et la valeur de l'ampleur a été créé comme suit :

Layer (type)	Output Shape	Param #	Connected to
input_1 (InputLayer)	[(None, 65)]	0	
dense (Dense)	(None, 300)	19800	input_1[0][0]
dense_1 (Dense)	(None, 200)	60200	dense[0][0]
dense_2 (Dense)	(None, 100)	20100	dense_1[0][0]
cat (Dense)	(None, 6)	606	dense_2[0][0]
reg_lin (Dense)	(None, 1)	101	dense_2[0][0]

Total params: 100,807  
 Trainable params: 100,807  
 Non-trainable params: 0

Tableau IV.1: Tableau récapitulatif du nombre de couches et nombres de neurones du modèle

#### 4.4.3 Algorithme d'apprentissage :

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à ce que le comportement désiré soit obtenu.

La phase d'apprentissage du réseau est mise en œuvre en utilisant les réseaux statiques. Deux règles d'apprentissage ont été utilisées pour créer des perturbations dans notre réseau : Adam et Adamax.

Une fois que le modèle de réseau a été formé, la validation du réseau sur le modèle de test doit être validée. Cette étape consiste à évaluer la mesure de la performance du réseau à l'aide d'une mesure d'erreur sélectionnée basée sur les données d'apprentissage et du test. L'évaluation. La validation du modèle de prédiction élaboré a été effectuée l'aide de mesures de l'entropie croisée (cross-entropy) et de l'erreur quadratique moyenne (MSE).

Dans la phase d'apprentissage, pour chaque donnée d'apprentissage, l'algorithme calcule les sorties (output) observées en propageant les entrées (input) vers le réseau tout en ajustant les poids en rétro-propageant le gradient de l'erreur depuis la dernière couche vers la première couche. L'arrêt de l'apprentissage se fait selon les critères suivants :

- La tolérance sur l'erreur est atteinte.
- L'erreur sur les données de validation commence à augmenter.
- Nombre d'itération atteint.

#### 4.4.4 Résultats et Interprétations :

Comme le montre les figures ci-dessous, l'apprentissage a été très rapide au début et il aboutit à une bonne précision à partir de 500 itérations. L'apprentissage s'arrête après 1000 itérations en atteignant une précision d'apprentissage de la localisation de 97%. Dans la phase test, l'exactitude sur la prédiction de la localisation a atteint 95%. La précision de l'ampleur en termes d'erreur quadratique moyenne pour les deux phases a atteint  $10^{-4}$ . En traçant la courbe des prédictions contre les valeurs cibles, on remarque que les points sont centrés par rapport à la diagonale médiane, ce qui témoigne d'une bonne performance du réseau pour la prédiction de l'ampleur des dommages.

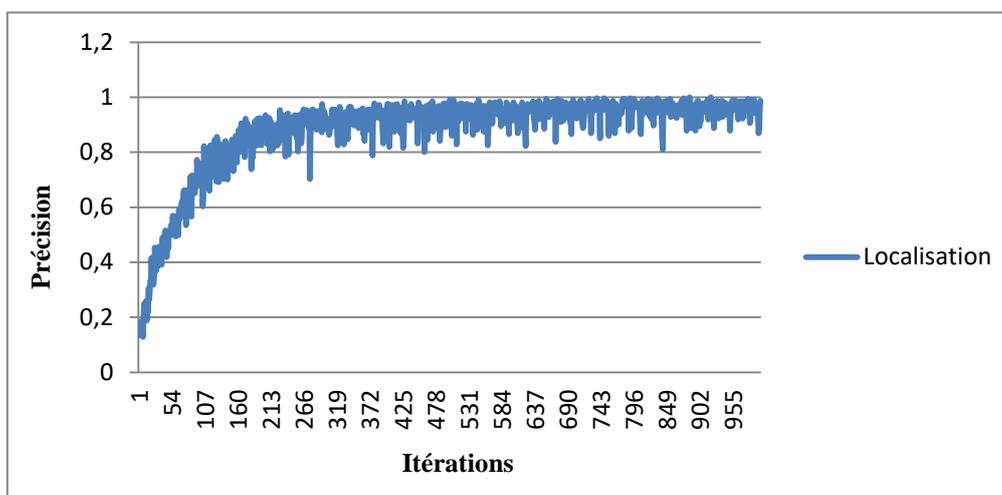


Figure IV.16: Courbe montrant l'évolution de la précision sur les données d'apprentissage en fonction des itérations

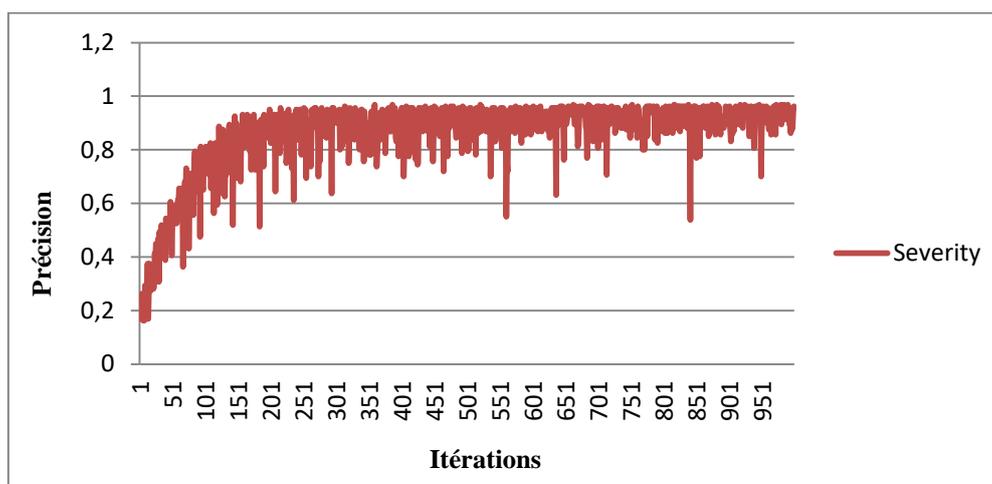


Figure IV.17: Courbe montrant l'évolution de la précision sur les données validation en fonction des itérations

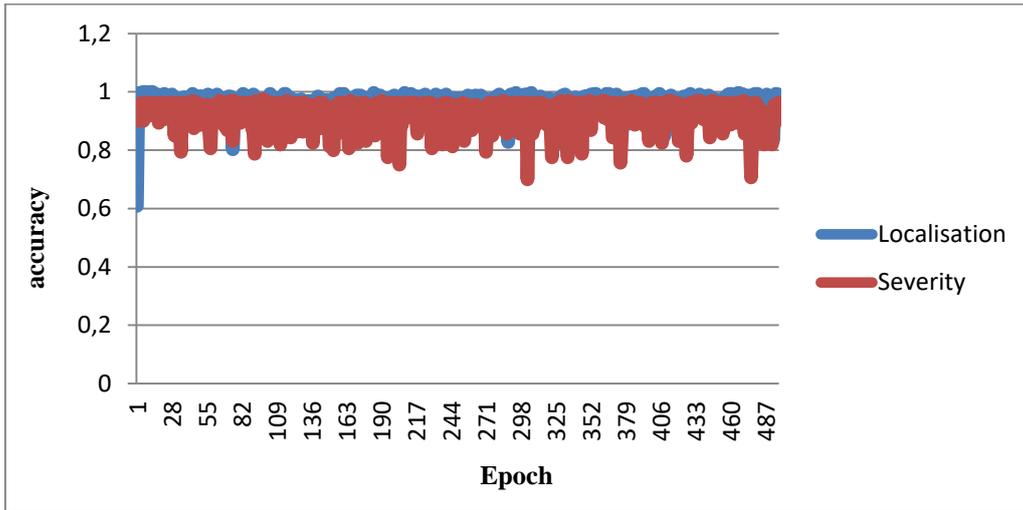


Figure IV 18: Histogramme de la précision de prédiction du modèle

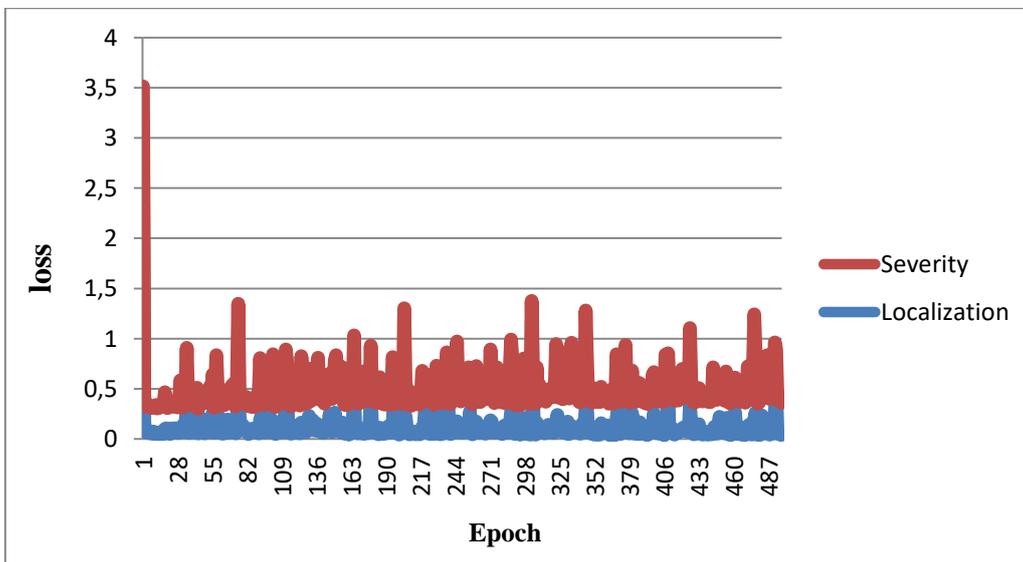


Figure IV 19: Histogramme de la fonction coût du modèle

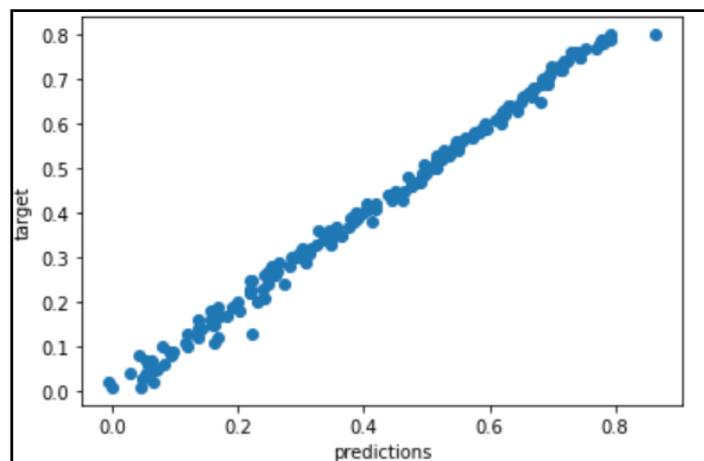


Figure IV 20: Courbe de régression de l'estimation de la rigidité sur données d'apprentissage

## 4.5 Conclusion

La matrice de variation de la flexibilité est un bon indicateur de dommage, mais ne permet pas de localiser directement les dommages ni leurs ampleurs. L'emploi des réseaux de neurones s'avère d'une grande utilité pour l'extraction des informations particulières à partir d'une base de données.

Ce chapitre a été consacré à l'identification des dommages en utilisant la méthode des réseaux de neurones artificiels. A l'entrée, le modèle du réseau de neurones adapté, reçoit les variations de la flexibilité à partir de 64 points sur la structure et en sortie on obtient un vecteur de six composantes indiquant la localisation du dommage et la valeur de l'ampleur du dommage. L'apprentissage du réseau utilise une base de données constituée des résultats d'analyse de modèles numériques de la structure saine et endommagée. 480 scénarios de dommages ont été cumulés en simulant des dommages potentiels dans 6 zones.

L'apprentissage du réseau étant très rapide au début, s'est stabilisé après 500 itérations environs et a atteint une précision de 97% sur la localisation. La performance du réseau dans la phase test a révélé des précisions de 95% pour la localisation avec une erreur quadratique moyenne inférieure à  $10^{-4}$  pour la prédiction de l'ampleur.

En se basant sur des travaux antérieurs, une architecture en termes de typologie cette méthode nous a permis d'apprécier l'apport des méthodes basées sur l'intelligence artificielle à résoudre des problèmes pratiques dans le domaine du Génie Civil.

# *Conclusion générale*

La surveillance de l'état de santé des monuments historiques devient un enjeu très important car leur préservation permet de prévoir les moindres détériorations structurelles afin de prolonger leur durée de vie et d'éviter leur écoulement en apportant les réparations nécessaires.

L'objectif principal du travail présenté dans ce mémoire était de mettre au point une Méthode pour détecter, localiser et quantifier l'endommagement dans Kalaa de Beni Hammad à partir de réponses vibratoires ambiantes.

Ce travail a débuté d'abord, par une étude bibliographique portant sur les méthodes de détection et de localisation des dommages, ainsi que les différentes méthodes qui permettent l'optimisation du nombre et d'emplacement des capteurs pour le monitoring des structures. Ensuite, nous avons présenté les réseaux de neurones, commençant par le neurone biologique, passant par l'architecture de réseau, jusqu'à l'apprentissage de réseau, qui ont été utilisés dans le 4<sup>ème</sup> chapitre.

Le deuxième chapitre, a été consacré pour une recherche profonde sur l'application de la SHM dans différents monuments historiques dans le monde, au cours de ce chapitre on a présenté quelques travaux réalisés sur ce sujet, dont le but était d'identifier l'importance de ces méthodes dans le domaine de Génie Civil.

Ensuite, une présentation du Kalaa de Beni Hammad et leur modélisation numérique en 3D qui a été faite en utilisant le logiciel aux éléments finis SAP2000® V22. Le nombre et l'emplacement des capteurs pour la surveillance vibratoire de la structure ont été optimisés en utilisant un algorithme génétique dont la fonction objective est basée sur le critère d'identification (MAC).

La méthode d'identification des dommages basée sur la variation de flexibilité, a été choisie comme indicateur de dommage pour la constitution d'une base de données des scénarios d'endommagements potentiels pour notre structure. Cette base dernière a servi à l'apprentissage d'un réseau de neurones qui a été élaboré pour prédire la localisation et l'ampleur des dommages en ayant à l'entrée les variations de flexibilité de 64 DDL. Une bonne performance du réseau a été obtenue avec une précision de localisation de 95% et une erreur quadratique moyenne de l'ampleur inférieure à  $10^{-4}$  en phase de test.

## *Conclusion générale*

A travers cette étude, il s'avère que la surveillance de l'état de santé des structures devient de plus en plus pratique et fiable pour un déploiement plus général aux édifices importants.

*Références  
bibliographiques*

- [1] C. R. Farrar et K. Worden, « An introduction to structural health monitoring », *New Trends Vib. Based Struct. Health Monit.*, p. 1-17, 2010.
- [2] H.-P. Chen et Y.-Q. Ni, *Structural health monitoring of large civil engineering structures*. Wiley Online Library, 2018.
- [3] J. Lemaitre et J.-L. Chaboche, « Aspect phénoménologique de la rupture par endommagement », *J Méc Appl*, vol. 2, n° 3, 1978.
- [4] A. Clément, « Détection de nouveauté pour le monitoring vibratoire des structures de Génie Civil : approches chaotique et statistique de l'extraction d'indicateurs », THÈSE DE DOCTORAT 2011.
- [5] M. Larbi DJEDJIGA, « Détection d'Endommagements Multiples dans les Structures Mécaniques par Mesures Vibratoires » MEMOIRE DE MAGISTER, Tizi-Ouzou, 2014.
- [6] Z. Wang, R. Lin, et M. Lim, « Structural damage detection using measured FRF data », *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 147, n° 1-2, p. 187-197, 1997.
- [7] P. Cawley et R. D. Adams, « The location of defects in structures from measurements of natural frequencies », *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 14, n° 2, p. 49-57, 1979.
- [8] J. Li, B. Wu, Q. Zeng, et C. W. Lim, « A generalized flexibility matrix based approach for structural damage detection », *J. Sound Vib.*, vol. 329, n° 22, p. 4583-4587, 2010.
- [9] E. Reynders et G. De Roeck, « A local flexibility method for vibration-based damage localization and quantification », *J. Sound Vib.*, vol. 329, n° 12, p. 2367-2383, 2010.
- [10] « Capteur Numérique à Fibre Optique » [En ligne]. Available: [https://keyence.fr/landing/lpc/fr\\_sem\\_24052017\\_fsn.jsp](https://keyence.fr/landing/lpc/fr_sem_24052017_fsn.jsp), consulté le 15 Avril 2021.
- [11] « Technologies de capteurs de fibre optique » [En ligne]. Available: <http://www.lightguidesolutions.com/fr/technologies-de-capteurs-de-fibre-optique>, consulté le 15 Avril 2021.
- [12] S. Harchi, « Un protocole de session dans les réseaux de capteurs sans fils », THÈSE DE DOCTORAT, UNIVERSITÉ DE LORRAINE décembre 2013.

- [13] « Schema dun reseau de capteurs sans fil » [En ligne]. Available: [https:// semanticscholar.org/paper/Conception/micro-capteur/](https://semanticscholar.org/paper/Conception/micro-capteur/) 2014, consulté le 17 Avril 2021.
- [14] « Capteur d'accéléromètre piézoélectrique » [En ligne]. Available: [https:// aliexpress.com](https://aliexpress.com), consulté le 26 Avril 2021.
- [15] « Accéléromètre » [En ligne]. Available: [https:// www.omega.fr/prodinfo/ accelerometre.html](https://www.omega.fr/prodinfo/accelerometre.html), consulté le 15 Avril 2021.
- [16] W. Tfaili, « Conception d'un algorithme de colonie de fourmis pour l'optimisation continue dynamique », THÈSE DE DOCTORAT, *Paris Val Marne Univ.*, décembre 2007.
- [17] « Algorithme génétique » [En ligne]. Available: [https:// recherche.ign.fr/jr/jr18/presentations/Presentation\\_Lion\\_et\\_al.pdf](https://recherche.ign.fr/jr/jr18/presentations/Presentation_Lion_et_al.pdf), consulté le 7 Mai 2021.
- [18] Dreyfus G., Martinez J-M., Samuelides M., Gordon M.B., Badran F., Thiria SS., HéraultL, Réseaux de neurones : Méthodologie et Applications, Eyrolles, 2002
- [19] « Les neurones biologiques et artificiels » [En ligne]. Available: <https://iatpe2015.wordpress.com/le-fonctionnement/le-reseau-de-neurones-artificiel/les-neurones-biologiques-et-artificiels/> , consulté le 10 Mai 2021.
- [20] L.Personnaz, I.Rivals, «*Réseau de neurones formels pour la modélisation, la commande, et la classification*», CNRS édition, collection sciences et Techniques de l'Ingénieurs, 2003.
- [21] A. Schmitt, B. Le Blanc, M.-M. Corsini, C. Lafond et J. Bruzek, « Les réseaux de neurones artificiels », *Bulletins et mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris* [En ligne], 13 (1-2) | 2001, mis en ligne le 14 janvier 2010, consulté le 19 mars 2021. URL : <http://journals.openedition.org/bmsap/4463>.
- [22] M.A Freman, D.M. Skapura, «*Neural networks: algorithm, applications and programming techniques*», CNS, computation and neural systems series 1992.
- [23] « Les 10 monuments les plus emblématiques du monde » [En ligne]. Available: <https://blog.infotourisme.net/les-10-monuments-les-plus-emblematisques-du-monde/>, consulté le 18 Mai 2021.

- [24] Protection au titre des « monuments historiques » [En ligne]. Available: <https://www.culture.gouv.fr/aides-demarches/protections-labels-et-appellations/protection-au-titre-des-monuments-historiques>, consulté le 20 Mai 2021.
- [25] « Comment faire protéger ou classer sa demeure aux monuments historiques ? » [En ligne]. Available: <https://www.arch-and-home.fr/architecte-et-maison-conseils/comment-faire-protoger-ou-classer-sa-demeure-aux-monuments-historiques-.html>, consulté le 20 Mai 2021.
- [26] « Wikipedia » [En ligne]. Available: Torre delle Ore — Wikipédia (wikipedia.org), consulté le 22 Mai 2021.
- [27] « Lucca, torre delle Ore » [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Lucca,\\_torre\\_delle\\_Ore\\_\(01\).jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Lucca,_torre_delle_Ore_(01).jpg), consulté le 22 Mai 2021.
- [28] « Ambient Vibrations of Age-old Masonry Towers: Results of Long-term Dynamic Monitoring in the Historic Centre of Lucca » [En ligne]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15583058.2019.1695155?journalCode=uarc20>, consulté le 22 Mai 2021.
- [29] Barsocchi, P., G. Bartoli, M. Betti, M. Girardi, S. Mammolito, D. Pellegrini, and G. Zini. 2021. Wireless sensor networks for continuous structural health monitoring of historic masonry towers. *International Journal of Architectural Heritage*. 15 (2) 22–44. doi:10.1080/15583058.2020.1719229.
- [30] « Le vieux pont de Mostar » [En ligne]. Available: Le pont de Mostar (merveilles-du-monde.com), consulté le 26 Mai 2021.
- [31] « Torre degli Sciri » [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Torre\\_degli\\_Sciri](https://fr.wikipedia.org/wiki/Torre_degli_Sciri) , consulté le 26 Mai 2021.
- [32] « Torre degli Sciri » [En ligne]. Available: <https://www.articity.it/en/must-see-perugia/sciri-tower/> , consulté le 26 Mai 2021.
- [33] García-Macías, E., L. Ierimonti, I. Venanzi, and F. Ubertini. 2021. An innovative methodology for online surrogate-based model updating of historic buildings using monitoring data. *International Journal of Architectural Heritage*. 15 (2) 113–131. doi:10.1080/15583058.2020.1719233.

- [34] « Wikipedia » [En ligne]. Available: [https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Eglise\\_de\\_San\\_Vigilio,\\_Gandria,\\_Lugano\\_02.jpg](https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Eglise_de_San_Vigilio,_Gandria,_Lugano_02.jpg), consulté le 30 Mai 2021.
- [35] « Monitoring Of Heritage Structures And Historical Monuments Using Long-Gage Fiber Optic Interferometric Sensors – An Overview » [En ligne]. Available://[www.monitoringofheritagestructuresandhistoricalmonumentsusinglong-gagefibreopticinterferometricsensors/](http://www.monitoringofheritagestructuresandhistoricalmonumentsusinglong-gagefibreopticinterferometricsensors/), consulté le 30 Mai 2021.
- [36] « Fiber-Optic » [En ligne]. Available: <https://www.smartec.ch> (2007), consulté le 30 Mai 2021.
- [37] « Exposition à la Villa royale de Monza » » [En ligne]. Available <https://www.alamyimages.fr/villa-royale-de-monza-villa-reale-milan-italie-la-villa-reale-a-ete-construite-entre-1777-et-1780-par-l-imperial-et-l-architecte-giuseppe-piermarini-image344216371>, consulté le 1 Juin 2021.
- [38] Del Grosso A., Torre A, Rosa M. and Lattuada B., Application of SHM techniques in the restoration of historical buildings: the Royal Villa of Monza, 2nd European Conference on Health Monitoring, Munich, Germany, 2004.
- [39] « pont-bolshoy-moskvo », 2012. [En ligne]. Available: <https://fr.dreamstime.com/moscou-pont-bolshoy-moskvoretsky-image103298140>, consulté le 1 Juin 2021.
- [40] «Architecture coréenne», [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Architecture\\_cor%C3%A9enne](https://fr.wikipedia.org/wiki/Architecture_cor%C3%A9enne), consulté le 3 Juin 2021.
- [41] «KALAA DES BENI-HAMMAD »[En ligne]. Available: [file:///C:/Users/hp/Downloads/kalaa%20des%20beni%20hammad%20historic%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/hp/Downloads/kalaa%20des%20beni%20hammad%20historic%20(1).pdf), consulté le 5 Juin 2021.
- [42] Aras F. and Altay G., Investigation of mechanical properties of masonry in historic buildings, GRAĐEVINAR 67 (2015) 5, 461-46. DOI: 10.14256/JCE.1145.201.
- [43] Sorour M. M., Parsekian G. A., Duchesne D., Paquette J., Mufti A., Jaeger L. and Shrive N. G., Evaluation of Young's Modulus for stone masonry walls under compression. 11th Canadian Masonry Symposium, Toronto, Ontario, May 31- June 3, 2009.

[44] « A Neural Network Model for Damage Detection of El-Ferdan Bridge », 2012. [En ligne]. Available:

[https://www.researchgate.net/publication/274373745\\_A\\_Neural\\_Network\\_Model\\_for\\_Damage\\_Detection\\_of\\_El-Ferdan\\_Bridge](https://www.researchgate.net/publication/274373745_A_Neural_Network_Model_for_Damage_Detection_of_El-Ferdan_Bridge), consulté le 14 Juin 2021.

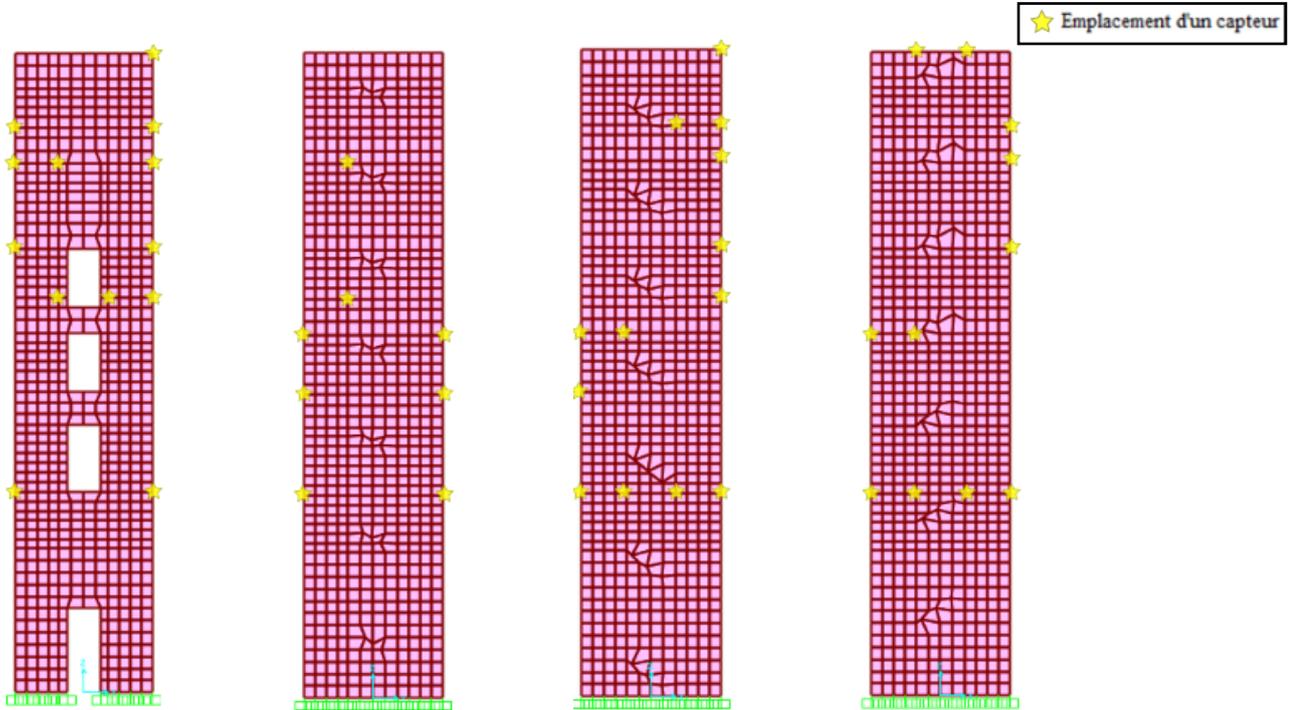
[45] Mlle. Deliah KHEMISSA «Application des réseaux de neurones à la détection des dommages d'un barrage en BCR» Alger, 2019.

[46] M. Mohamed Said LAGHOUB et Mlle Hanifa KRIDI, «Méthode hybride de détection et localisation des dommages : Application à un pont existant,» Alger, 2020.

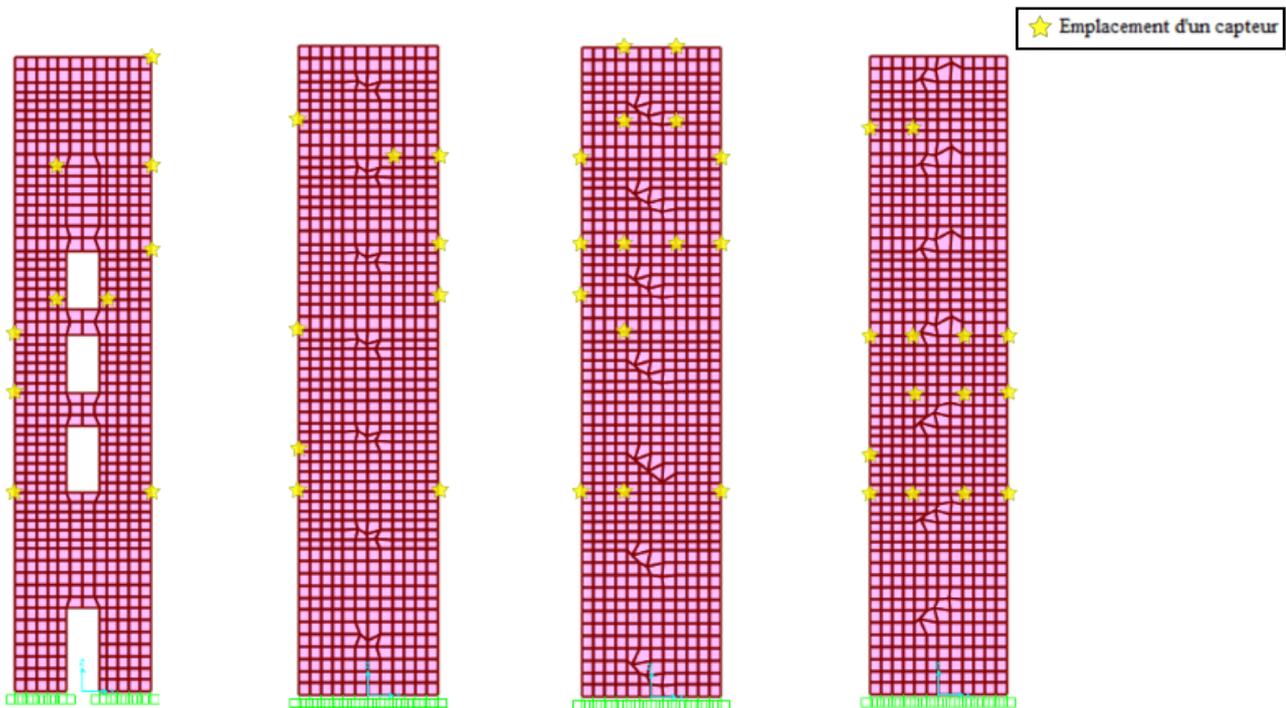
# *Annexes*

## Annexe A : Nœuds en compte dans le calcul de la variation de flexibilité

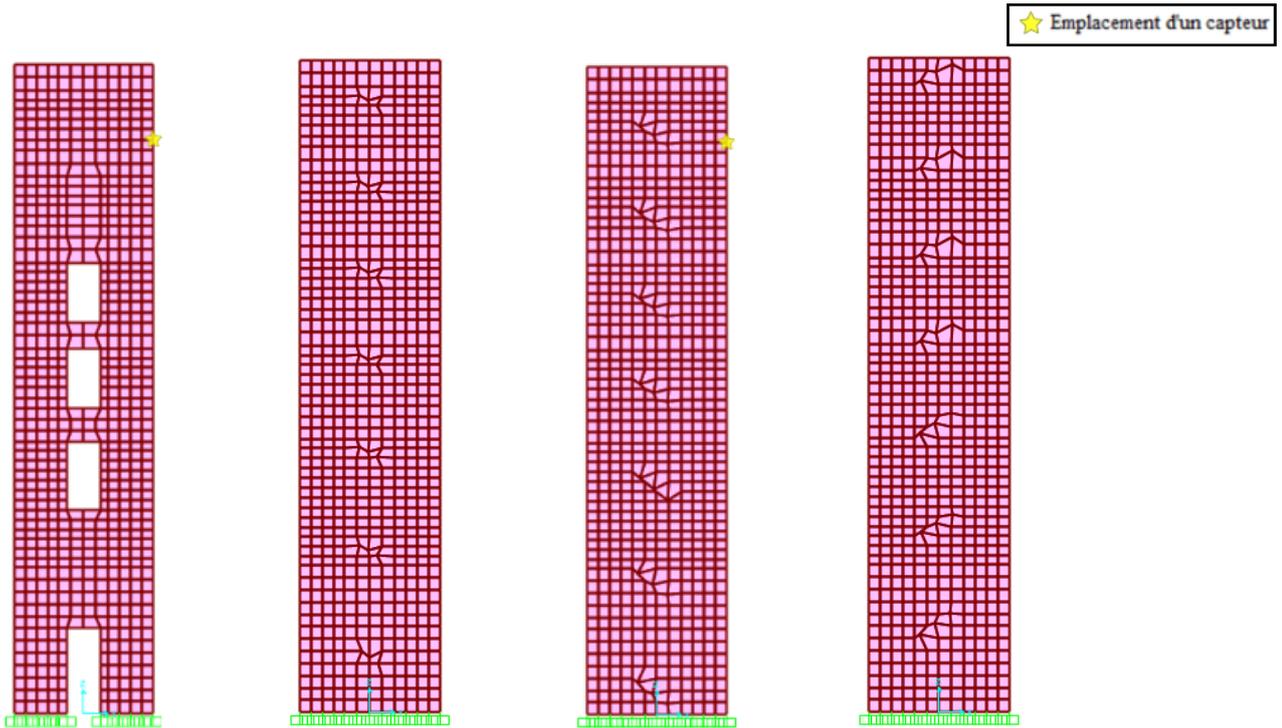
- **Suivant l'axe « x » :** Nombre des nœuds égal à 30, distribués comme suit :



- **Suivant l'axe « y » :** Nombre des nœuds égal à 34, distribués comme suit :



- **Suivant l'axe « z » :** Selon cette direction on a 1 seul nœud, situé comme suit :



## Annexe B : Interaction Matlab-SAP2000V20 pour la génération de la base de données

```

%clean-up the workspace and command window
clear all
clc

%%set the following flag to true to attach to an existing instance of the
program otherwise a new instance of the program will be started
AttachToInstance = false();% true(); %

% set the following flag to true to manually specify the path to
SAP2000.exe
% this allows for a connection to a version of SAP2000 other than the
latest installation
% otherwise the latest installed version of SAP2000 will be launched
SpecifyPath = false (); % true(); %

% if the above flag is set to true, specify the path to SAP2000 below
ProgramPath = 'C:\Program Files\Computers and Structures\SAP2000
22\SAP2000.exe';

% full path to API dll
% set it to the installation folder
APIDLPath = 'C:\Program Files\Computers and Structures\SAP2000
22\SAP2000v1.dll';

% full path to the model
% set it to the desired path of your model
ModelDirectory = 'C:\CSiAPIexample';
if ~exist(ModelDirectory,'dir')
    mkdir(ModelDirectory);
end
ModelName = 'API_1-001.sdb';
ModelPath = strcat(ModelDirectory, filesep, ModelName);

% create API helper object
a = NET.addAssembly(APIDLPath);
helper = SAP2000v1.Helper;
helper = NET.explicitCast(helper, 'SAP2000v1.cHelper');

if AttachToInstance
    %% attach to a running instance of Sap2000
    SapObject = helper.GetObject('CSI.SAP2000.API.SapObject');
    SapObject = NET.explicitCast(SapObject, 'SAP2000v1.cOAPI');
else
    if SpecifyPath
        %% create an instance of the SapObject from the specified path
        SapObject = helper.CreateObject(ProgramPath);
    else
        %% create an instance of the SapObject from the latest installed
SAP2000
        SapObject = helper.CreateObjectProgID('CSI.SAP2000.API.SapObject');
    end
end

```

```
end
SapObject = NET.explicitCast(SapObject, 'SAP2000v1.cOAPI');

%% start Sap2000 application
SapObject.ApplicationStart;
end
helper = 0;

%% create SapModel object
SapModel = NET.explicitCast(SapObject.SapModel, 'SAP2000v1.cSapModel');

% Initialize model
SapModel.InitializeNewModel;

%Open file
File = NET.explicitCast(SapModel.File, 'SAP2000v1.cFile');
ret = File.OpenFile('D:\pfe 2020-2021\Logiciels\CHAPITRE 04\Zone F\SAP
22\m7-v22.sdb');

%Unlock the model
SapModel.SetModelIsLocked(false);

%% assign plane properties to material
PropMaterial=
NET.explicitCast(SapModel.PropMaterial, 'SAP2000v1.cPropMaterial');
ret = PropMaterial.SetMPIIsotropic('BCR damaged', 5000000, 0.3, 0.00001);

%% define rectangular frame section property
PropArea = NET.explicitCast(SapModel.PropArea, 'SAP2000v1.cPropArea');
ret = PropArea.SetPlane('BCR damaged', 2, 'BCR damaged', 0, 1, true);
AreaObj = NET.explicitCast(SapModel.AreaObj, 'SAP2000v1.cAreaObj');
ret = AreaObj.SetProperty('dam', 'BCR damaged', SAP2000v1.eItemType.Group);

%Create model analysis
Analyze = NET.explicitCast(SapModel.Analyze, 'SAP2000v1.cAnalyze');

%Run analysis
Analyze.RunAnalysis;
AnalysisResults = NET.explicitCast(SapModel.Results,
'SAP2000v1.cAnalysisResults');
AnalysisResultsSetup = NET.explicitCast(AnalysisResults.Setup,
'SAP2000v1.cAnalysisResultsSetup');

% Create variables
NumberResults = 0;
LoadCase = NET.createArray('System.String', 1);
StepType = NET.createArray('System.String', 1);
StepNum = NET.createArray('System.Double', 1);
Period = NET.createArray('System.Double', 1);
Frequency = NET.createArray('System.Double', 1);
```

```

CircFreq = NET.createArray('System.Double', 1);
EigenValue = NET.createArray('System.Double', 1);

% Get modal frequencies
[~,~,~,~,~,~,Frequency,~,~] =
AnalysisResults.ModalPeriod(NumberResults, LoadCase, StepType, StepNum, Period,
Frequency, CircFreq, EigenValue);

f_n=(Frequency.double)';

% a modifier
filename = 'F1.xlsx';

xlswrite(filename, f_n, 1, 'A1');

%Run analysis
Analyze.RunAnalysis;
AnalysisResults = NET.explicitCast(SapModel.Results,
'SAP2000v1.cAnalysisResults');
AnalysisResultsSetup = NET.explicitCast(AnalysisResults.Setup,
'SAP2000v1.cAnalysisResultsSetup');

%Creation des variables
NumberResults = 0;
Obj = NET.createArray('System.String', 1);
Elm = NET.createArray('System.String', 1);
LoadCase = NET.createArray('System.String', 1);
StepType = NET.createArray('System.String', 1);
StepNum = NET.createArray('System.Double', 1);
U1 = NET.createArray('System.Double', 1);
U2 = NET.createArray('System.Double', 1);
U3 = NET.createArray('System.Double', 1);
R1 = NET.createArray('System.Double', 1);
R2 = NET.createArray('System.Double', 1);
R3 = NET.createArray('System.Double', 1);

% Get model response (displacements and rotations) at all nodes
[~,~,~,Elm,~,~,~,U1,U2,U3,R1,R2,R3] =
AnalysisResults.JointDisplAbs('reduit1', SAP2000v1.eItemTypeElm.GroupElm, Num
berResults, Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3);

u1 = (U1.double)';
u2 = (U2.double)';
u3 = (U3.double)';
r1 = (R1.double)';
r2 = (R2.double)';
r3 = (R3.double)';

for j=1:Elm.Length
Eelm{j, 1}= char(Elm(j));
end

% a modifier
filename = 'D1.xlsx';

xlswrite(filename, Eelm, 1, 'A1');
xlswrite(filename, u1, 1, 'B1');

```

## Annexes

```
xlswrite(filename, u2, 1, 'C1');

z = 2;
for i = 1:80

% Unlock the model
SapModel.SetModelIsLocked(false);

%% assign plane properties to material
E(i) = 5000000*(100-i)/100;

%% assign plane properties to material
PropMaterial =
NET.explicitCast(SapModel.PropMaterial, 'SAP2000v1.cPropMaterial');
ret = PropMaterial.SetMPIIsotropic('BCR damaged',E(i), 0.3, 0.00001);

%% define rectangular frame section property
ret = PropArea.SetPlane('BCR damaged',2, 'BCR damaged',0, 1, true);
AreaObj = NET.explicitCast(SapModel.AreaObj, 'SAP2000v1.cAreaObj');
ret = AreaObj.SetProperty('dam', 'BCR damaged', SAP2000v1.eItemType.Group);

% Create model analysis
Analyze = NET.explicitCast(SapModel.Analyze, 'SAP2000v1.cAnalyze');
Analyze.RunAnalysis;
AnalysisResults =
NET.explicitCast(SapModel.Results, 'SAP2000v1.cAnalysisResults');
AnalysisResultsSetup =
NET.explicitCast(AnalysisResults.Setup, 'SAP2000v1.cAnalysisResultsSetup');

% Create variables
NumberResults = 0;
LoadCase = NET.createArray('System.String', 1);
StepType = NET.createArray('System.String', 1);
StepNum = NET.createArray('System.Double', 1);
Period = NET.createArray('System.Double', 1);
Frequency = NET.createArray('System.Double', 1);
CircFreq = NET.createArray('System.Double', 1);
EigenValue = NET.createArray('System.Double', 1);

% Get modal frequencies
[~,~,~,~,~,~,Frequency,~,~] =
AnalysisResults.ModalPeriod(NumberResults,LoadCase,StepType,StepNum,Period,
Frequency,CircFreq,EigenValue);
f_n=(Frequency.double)';

% a modifier
filename = 'F1.xlsx';
xlswrite(filename, f_n, z, 'A1');
```

```

% Run analysis
Analyze.RunAnalysis;
AnalysisResults
=NET.explicitCast(SapModel.Results, 'SAP2000v1.cAnalysisResults');
AnalysisResultsSetup =
NET.explicitCast(AnalysisResults.Setup, 'SAP2000v1.cAnalysisResultsSetup');

% Create variables
NumberResults = 0;
Obj = NET.createArray('System.String', 1);
Elm = NET.createArray('System.String', 1);
LoadCase = NET.createArray('System.String', 1);
StepType = NET.createArray('System.String', 1);
StepNum = NET.createArray('System.Double', 1);
U1 = NET.createArray('System.Double', 1);
U2 = NET.createArray('System.Double', 1);
U3 = NET.createArray('System.Double', 1);
R1 = NET.createArray('System.Double', 1);
R2 = NET.createArray('System.Double', 1);
R3 = NET.createArray('System.Double', 1);

% Get model response (displacements and rotations) at all nodes
[~,~,~,Elm,~,~,~,U1,U2,U3,R1,R2,R3] =
AnalysisResults.JointDisplAbs('reduit1', SAP2000v1.eItemTypeElm.GroupElm,
NumberResults, Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2,
R3);

u1 = (U1.double)';
u2 = (U2.double)';
u3 = (U3.double)';
r1 = (R1.double)';
r2 = (R2.double)';
r3 = (R3.double)';

for j=1:Elm.Length
    Eelm{j,1}=char(Elm(j));
end

% a modifier
filename = 'D1.xlsx';
xlswrite(filename, Eelm, z, 'A1');
xlswrite(filename, u1, z, 'B1');
xlswrite(filename, u2, z, 'C1');
z = z+1;
end

```

## Annexe C : Modèle des réseaux de neurones

### Importation des librairies :

```
import pandas as pd
import numpy as np
import seaborn as sn
import matplotlib.pyplot as plt
```

### Normalisation des inputs :

```
df = pd.read_csv('input.csv', header=None)
vals = df.values
max_val, min_val = None, None
vals = np.log2(vals)
for i in range(len(vals)):
    for j in range(len(vals[i])):
        if max_val is None:
            max_val = vals[i, j]
            min_val = vals[i, j]
        else:
            if max_val < vals[i, j]:
                max_val = vals[i, j]
            elif min_val > vals[i, j]:
                min_val = vals[i, j]

print(min_val, max_val)
for i in range(len(vals)):
    for j in range(len(vals[i])):
        vals[i, j] = (vals[i, j] - min_val) / (max_val - min_val)
df = pd.DataFrame(vals, columns=None)
df.to_csv('input_normalized.csv', header=None, index=None)
```

### Importation des inputs et des outputs :

```
df = pd.read_csv('input_normalized.csv', header=None)
inp = df.values
inp = inp.transpose()
print(inp.shape)

target = pd.read_csv('target1.csv', header=None)
target = target.values
target = target.transpose()
target[:,1]
```

**Implantation de l'API fonctionnelle de Keras :**

```
from keras.layers import Input, Dense
from keras.models import Model, load_model
import numpy as np
```

**Empilement des couches :**

```
1 input_layer = Input((65,))
2 output = Dense(300, activation='relu')(input_layer)
3 output = Dense(200, activation='relu')(output)
4 # output = Dense(300, activation='relu')(output)
5 output = Dense(100, activation='relu')(output)
6 output1 = Dense(6, activation='softmax', name='cat')(output)
7 output3 = Dense(1, activation='linear', name='reg_lin')(output)
8 m1 = Model(input_layer, output1)
9 m3 = Model(input_layer, output3)
10 model = Model(input_layer, [output1, output3])
11 model.summary()
12 m3.summary()
```

**Définition de la fonction get\_targets :**

```
def get_targets(target, num_different_locations=None, num_different_severities=None):
    locations = target[:,0]
    severities = target[:,1]

    if num_different_locations is None:
        num_different_locations = len(set(list(locations)))
    if num_different_severities is None:
        num_different_severities = len(set(list(severities)))

    t1 = np.zeros((num_different_locations, len(locations)))
    t2 = np.zeros((num_different_severities, len(severities)))

    map_val_index = {}
    count = 0
    for i,v in enumerate(target[:,0]):
        if v not in map_val_index:
            map_val_index[v] = count
            count += 1
        t1[map_val_index[v],i] = 1
```

```

map_val_index = {}
count = 0
for i,v in enumerate(target[:,1]):
    if v not in map_val_index:
        map_val_index[v] = count
        count += 1
    t2[map_val_index[v],i] = 1

return t1, t2, severities.transpose()

# t1, t2, t3 = get_targets(target)

```

### Enregistrement des outputs :

```

x_val = np.array([x for i,x in enumerate(inp) if i%3==0])
x_train = np.array([x for i,x in enumerate(inp) if i%3!=0])
y_val = np.array([y for i,y in enumerate(target) if i%3==0])
y_train = np.array([y for i,y in enumerate(target) if i%3!=0])

t1, t2, t3 = get_targets(y_train)
t1 = t1.transpose()
print(t1.shape, t3.shape)
df = pd.DataFrame(t1, columns=None)
df.to_csv('target_one_6.csv', header=None, index=None)
df = pd.DataFrame(t3, columns=None)
df.to_csv('target_regression.csv', header=None, index=None)

```

### Configuration du processus d'apprentissage :

```

loss = {'cat': 'categorical_crossentropy', 'reg': 'categorical_crossentropy'}
loss2 = {'cat': 'categorical_crossentropy', 'reg_lin': 'mse'}
model.compile(optimizer='adamax', loss=loss2, metrics=['accuracy'])
m1.compile(optimizer='adamax', loss="categorical_crossentropy", metrics=['accuracy'])

vt = get_targets(y_val,6)
inp_val = x_val

target_val = [vt[0].transpose(), vt[2]]

```

### Création des itérations d'entraînement par lot du modèle, en utilisant le jeu de données d'entraînement pour le modèle:

```

t=[t1, t3]
model.fit(x_train, t, batch_size=8, epochs=1000, verbose=2, validation_data=(x_val, target_val))
# m1.fit(x_train, t1, batch_size=8, epochs=500, verbose=2, validation_data=(x_val, target_val[0]))

```

**Evaluation des performances du modèle :**

```
c, r = model.predict(x_val)
c = [np.argmax(i) + 1 for i in c]
print(c)
# print(r)
r = r.transpose()[0]
# r = [(np.argmax(i) + 1) / 80 for i in r]
# print(r)
# predicted = np.round(r[r:0])
ne = 0
for p, t in zip(c, target_val[0]):
    t = np.argmax(t) + 1
    if p != t:
        print('not equal', p, t)
        ne += 1
    else:
        print("equal", p, t)
print('evaluation: ', (len(r) - ne) / len(r))
print('not equal: ', ne, 'and equal: ', (len(r) - ne))

plt.scatter(r, target_val[1])
plt.xlabel("predictions")
plt.ylabel("target")
```