République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

فرنسيس جانسون

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

Francis Jeanson

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Infrastructures de Base

METHODES HYBRIDES DE DETECTION ET LOCALISATION DE DOMMAGES : APPLICATION AU SIEGE FADERCO

Présenté par :

BENNOUR MOUNA LIZA AMIRA

Encadré par :

Mme LARBI SELMA HANANE

M. BENREDOUANE MUSTAPHA

Remerciements

En premier lieu, je remercie Dieu Tout-Puissant et Miséricordieux pour m'avoir donné la force et la patience nécessaires pour accomplir ce travail. Sans Sa guidance et Ses bénédictions, rien de tout cela n'aurait été possible.

Je tiens à remercier avec grande reconnaissance mon encadrante, **Mme. Selma Hanane LARBI**, pour sa disponibilité constante, ses conseils et ses grands efforts tout au long de ce projet. Son orientation m'a été d'une précieuse aide pour surmonter les défis rencontrer au cours de ce mémoire.

Je remercie également la Société de Consulting et Testing Engineering (SCTE), en particulier **Mr. Mustapha BENREDOUANE,** de m'avoir accueilli au sein de leur société et de m'avoir offert l'opportunité d'apprendre et de réaliser le projet au sein de leur bureau.

C'est avec profonde reconnaissance que je remercie **Mr Salim TAFRAOUT**, pour son aide inestimable, pour le temps précieux qu'il m'a consacré, ainsi que son expertise qui ont été déterminants pour l'avancement de mes travaux.

Je n'oublie pas de remercier chaleureusement l'ensemble du **corps professoral et administratif** de notre école pour leur enseignement, leur soutien et leur engagement envers notre réussite académique

Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à **mes parents** pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral et financier, et leurs encouragements constants. Leur foi en moi et leurs sacrifices ont été une source inépuisable de motivation et de force.

Merci à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

العنوان

طرق هجينة لكشف وتحديد موقع الضرر، تطبيق على مبنى استراتيجي

ملخص

تشهد الجزائر تطورًا كبيرًا بفضل العديد من المباني الهيكلية في الوقت الحالي، ولا سيما مركز الأعمال في باب الزوار (الجزائر العاصمة)، الذي تكتسي أهميته الاقتصادية أهمية كبيرة. نظرًا للنشاط الزلزالي الشديد في هذه المنطقة، من الضروري ضمان مقاومة واستدامة هذا المبنى وفقًا للأنظمة الحالية في الجزائر، مثل التنظيم الزلزالي الجزائري RPA99 نسخة 2003.

المبنى الذي هو موضوع مشروعنا النهائي هو المقر الإداري الجديد لـFADERCO ، حيث يتم تطبيق طريقة للكشف عن الأضرار باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية. استنادًا إلى مصفوفة المرونة كمدخل لتدريبها، تساعد الشبكة العصبية الاصطناعية في التنبؤ بموقع وشدة الضرر في الهيكل.

تم استخدام خوارزمية جينية لمراقبة الهيكل، حيث يتم الحصول على الاستجابات الوضعية من عدد مثالي من أجهزة الاستشعار الموضوعة في المناطق المحتملة للتعرض للأضرار. للتحقق من استجابة الوضعية للهيكل النموذجي، تم إجراء اختبارات اهتزازات محيطة على الهيكل الفعلي. يمكن لهذه الأدوات المستندة إلى الذكاء الاصطناعي أن تشير إلى ظهور الأضرار الأولية، وهو ما يمكن أن يكون مفيدًا جدًا، خاصة في الهياكل الاستراتيجية والمعقدة أو ذات الأهمية الحيوية.

تندرج هذه المقاربة ضمن إطار مراقبة صحة الهيكل(SHM) ، التي تهدف إلى التنبؤ بنقاط الأضرار المحتملة في الهيكل.

الكلمات المفتاحية

المراقبة الاهتزازية، الذكاء الاصطناعي، الخوارزمية الجينية، الشبكات العصبية الاصطناعية، الحسابات الزلزالية

Titre

Méthodes hybrides de détection de dommage appliquées à une tour stratégique.

Résumé

L'Algérie connaît un grand développement de par ses nombreux édifices structurels en ce moment, notamment le centre d'affaires de Bab Ezzouar (Alger) dont l'importance économique est cruciale. En vue de la forte sismicité de cette région, il est nécessaire d'assurer la résistance et la pérennité de cette structure, conformément à la réglementation en vigueur en Algérie, tel que *le règlement parasismique Algérien RPA99 version 2003.

La structure faisant objet de notre projet de fin d'étude, est le nouveau siège administratif de FADERCO, où une méthode de détection de dommages est appliquée en utilisant les Réseaux de Neurones Artificiels. Basé sur la matrice de flexibilité comme input pour son apprentissage, le RNA aide à prédire la localisation ainsi que la sévérité du dommage produit dans la structure.

Un Algorithme Génétique a été utilisé pour la surveillance de la structure, où les réponses modales sont obtenues à partir d'un nombre de capteurs optimal, placés à des zones potentiellement dommageables. Afin de valider la réponse modale de la structure modélisée, des essais de vibrations ambiantes ont été menés sur la structure réelle. Ces outils, basés sur l'intelligence artificielle, peuvent nous indiquer l'apparition des premiers dommages, ce qui peut être d'un grand intérêt, spécialement dans les structures stratégiques, complexes ou d'une importance vitale.

Cette approche s'inscrit dans le cadre de la surveillance vibratoire de la structure (SHM), visant à prédire les potentiels points d'endommagements de la structure.

Mots clés

Surveillance vibratoire, intelligence artificielle, algorithme génétique, réseaux de

Neurones artificiels, calcul sismique,

Title

Hybrid method for detecting and locating damage, Application to a strategic building.

Abstract

Algeria is experiencing significant development with numerous structural buildings at the moment, particularly the business center of Bab Ezzouar (Algiers), which holds crucial economic importance. Given the high seismic activity in this region, it is necessary to ensure the resilience and longevity of this structure in accordance with the current regulations in Algeria, such as the Algerian Seismic Code RPA99 version 2003.

The structure under consideration in our final project is the new administrative headquarters of FADERCO, where a damage detection method is applied using Artificial Neural Networks. Based on the flexibility matrix as input for its training, the ANN helps predict the location and severity of damage within the structure.

A Genetic Algorithm was used for structural monitoring, where modal responses are obtained from an optimal number of sensors placed in potentially damage-prone areas. To validate the modal response of the modeled structure, ambient vibration tests were conducted on the actual structure. These AI-based tools can indicate the onset of initial damage, which can be highly beneficial, especially in strategic, complex, or vital structures.

This approach is part of the Structural Health Monitoring (SHM) framework, aimed at predicting potential damage points in the structure.

Keywords

Vibration monitoring, artificial intelligence, genetic algorithm, artificial neural networks, dynamic analysis.

Table des matières

Introduction Générale 1
I. Chapitre I : Recherche bibliographique 3
I.1. Introduction 3
I.2. L'étude sismique 4
I.2.1. L'objectif de l'étude sismique 4
I.2.2. Les méthodes de calculs sismiques 4
I.3. Les essais d'identifications des caractéristiques dynamique structurelles 6
I.3.1. Les types d'essais de vibrations 6
I.3.2. Les essais de vibrations ambiantes 7
I.4. La surveillance vibratoire des structures (Structural Health Monitoring : SHM) 7
I.4.1. Le principe de la surveillance vibratoire des structures 7
I.4.2. Les composantes de la SHM 8
I.5. L'endommagement structurel 9
I.5.1. Types de dommage 9
I.5.2. Les niveaux de dommages 11
I.5.3. La détection de dommages 13
I.5.4. La simulation d'un endommagement 16
II. Chapitre 02 : présentation du projet 17
II.1. Description du projet 17
II.1.1. Situation géographique du site 18
II.1.2. Dimensions en plan : 18
II.1.3. Dimensions en élévation : 19
II.1.4. Caractéristiques de l'infrastructures 19
II.2. Classification du projet 19
II.2.1. La classification selon la zone sismique 20
II.2.2. La classification selon l'importance de l'ouvrage 20
II.2.3. La classification du sol 20
II.2.4. Le système de contreventement 20
II.3. Les caractéristiques des matériaux 21
II.3.1. Le béton 21
II.3.2. L'acier 22
II.4. L'étude géotechnique 23
II.4.1. Les essais du laboratoire et in-situ 23

II.5. Les actions et les sollicitations 23
II.5.1. Les actions 23
II.5.2. Les sollicitations 24
II.6. Les charges et les surcharges d'exploitation 24
II.6.1. Plancher terrasse accessible 24
II.6.2. Plancher du rez-de-chaussée 25
II.6.3. Plancher du 1er étage 26
II.6.4. Plancher des étages courants 27
II.6.5. La façade extérieure 29
II.6.6. Les escaliers 29
II.7. Conclusion 30
III. Chapitre 03 : Modélisation 31
III.1. Présentation du logiciel SAP2000 31
III.2. Les étapes de travail 31
III.2.1. Introductions des éléments structuraux 32
III.2.2. Introduction des charges 32
III.3. Le modèle numérique 33
III.4. L'analyse modale 33
III.4.1. Résultats de l'analyse modale 34
III.4.2. Interprétation des résultats 35
III.5. Validation du modèle numérique par essais de vibrations ambiantes 36
III.5.1. Le matériel utilisé 36
III.5.2. Le mode opératoire de l'essai 38
III.5.3. Traitement de signa 39
III.5.4. Les résultats 41
III.5.5. L'interprétation des résultats 42
III.6. Conclusion 42
IV. L'étude sismique 43
IV.1. Introduction 43
IV.2. Calcul de la force sismique 43
IV.3. La méthode dynamique 47
IV.3.1. Introduction du spectre de réponse 47
IV.3.2. Interprétation des résultats 50
IV.4. Les vérifications réglementaires selon le RPA99 v2003 50
IV.4.1. La vérification de la force sismique 50

IV.4.2. La vérification du déplacement inter-étages. 51
IV.4.3. La vérification de l'effet P-DELTA 51
IV.5. Conclusion 52
V. Ferraillage des éléments structuraux 53
V.1. Introduction 53
V.2. Le ferraillage des poteaux 53
V.2.1. Le ferraillage longitudinal 53
V.2.2. Le ferraillage des armatures transversales 54
V.2.3. Les vérifications 58
V.2.4. Schéma d'un poteau 60
V.3. Le ferraillage des poutres 61
V.3.1. Le ferraillage longitudinal 61
V.3.2. Le ferraillage transversal 62
V.3.3. Les vérifications 64
V.3.4. Le recouvrement 64
V.3.5. Le schéma de ferraillage 64
V.4. Le ferraillage des voiles 65
V.4.1. Les aciers verticaux 66
V.4.2. Les aciers horizontaux 67
V.4.3. Le schéma d'un voile 67
V.5. Ferraillage des dalles 67
V.5.1. Schéma de la dalle 69
VI. Simulation d'une surveillance vibratoire 70
VI.1. Introduction 70
VI.2. Hypothèse de travail 70
VI.3. L'algorithme génétique 71
VI.3.1. Définition d'un algorithme génétique 71
VI.3.2. Processus d'un Algorithme Génétique 72
VI.3.3. Fonctions objectives 74
VI.3.4. L'application sur le model 75
VI.4. Résultats et interprétation 77
VI.4.1. Le nombre de capteur 77
VI.4.2. La qualité de la population 78
VI.4.3. Emplacement des capteurs 79
VI.5. Conclusion 79

VII. Chapitre 07 : Détection des endommagements 80
VII.1. Introduction 80
VII.2. Processus du monitoring d'une structure 80
VII.3. Simulation d'un dommage 81
VII.3.1. Les zones de dommages 82
VII.3.2. Degrés d'endommagement 83
VII.3.3. Processus de la simulation 83
VII.3.4. Résultats 84
VII.4. Machine Learning 84
VII.4.1. Définitions 84
VII.4.2. Fonctionnement des algorithmes 84
VII.4.3. Types d'apprentissages 85
VII.5. Réseau de neurones artificiels 85
VII.5.1. Définition 85
VII.5.2. Les composantes d'un réseau de neurones 86
VII.5.3. Deep Learning 90
..... 90
VII.5.4. Conception du réseau de neurones 90
VII.5.5. Apprentissage du réseau de neurones 91
VII.5.6. Interprétation des résultats 92
VII.6. Conclusion 94
VIII. Conclusion et perspectives 95
IX. Références 96
X. ANNEXE 1 : LES SCHEMAS DE FERRAILLAGE 102
XII. ANNEXE 2 : L'ALGORITHME DE L'OPTIMISATION DU NOMBRE ET DE L'EMPLACEMENT DES CAPTEURS 105
XIII. ANNEXE 3 : L'ALGORITHME DE RESEAU DE NEURONES ARTIFICIELS 111

Liste des figures

Figure I-1 : Schéma récapitulatif des méthodes d'analyse sismique 5
Figure I-2 : Processus du Structural Health Monitoring 8
Figure I-3 : Résumé des composantes du SHM 9
Figure I-4 : Illustration des degrés du phénomène d'écaillage 10
Figure I-5 : Visualisation de l'éclatement du béton 10
Figure I-6: Visualisation des fissures sur le béton 11
Figure I-7 : Les degrés d'endommagement selon l'EMS9 12
Figure I-8 : Schéma des méthodes de détection de dommage 16
Figure II-1 Vue en plan de la disposition des blocs 17
Figure II-2 : Vue en 3D de la structure 17
Figure II-3 : Localisation du siège de FADERCO 18
Figure II-4 : Vue en plan du rez-de-chaussée 18
Figure II-5 : Vue en plan du 1er étage 19
Figure II-6 : Vue en plan des étages courants 19
Figure II-7 : Système de contreventement de la structure 20
Figure II-8 : Coupe transversale du plancher de la terrasse accessible 24
Figure II-9 : Coupe transversale du plancher du rez-de-chaussée 25
Figure II-10 : La répartition des charges dans le rez-de-chaussée 26
Figure II-11 : La répartition des charges dans le 1er étage 27
Figure II-12 : Coupe transversale du plancher du 1er étage 27
Figure II-13 : La répartition des charges dans les étages courants 28
Figure III-1 : Vue en 3D du modèle SAP2000 33
Figure III-2 : Le processus des essais de vibration ambiantes 36
Figure III-3 : Le sismographe utilisé lors des essais de vibrations ambiante 36
Figure III-4 : Le système d'acquisition des données utilisé (CityShark II) 37
Figure III-5 : Mainframe de CitySharkII 37
Figure III-6 : Le display de Geopsy 38
Figure III-7 : L'emplacement des capteurs 39
Figure III-8 : Traitement du signal d'un essai 40
Figure III-9 ; Les fréquences trouvé lors de l'essai N°63 40
Figure IV-1 : Le spectre de réponse 48
Figure V-1 : le schéma de ferraillage du poteau libre 60x110 60
Figure V-2 : : Schème de ferraillage de la poutre 80 x 40 64
Figure V-3 : Les zones du voile 1 65
Figure V-4 : Les zone des voiles 2 et 3 65
Figure V-5 : Le schéma de ferraillage du voile N°02 67
Figure V-6 : Schéma de ferraillage de la dalle 8.1x6.9 69
Figure V-7 : Vue en plan de la dalle 8.1x 69
Figure VI-1 : Illustration des composantes d'un algorithme génétique 72
Figure VI-2 : Processus d'un AG 72
Figure VI-3 :Illustration d'un croisement 73
Figure VI-4 : Illustration d'une mutation 74
Figure VI-5 : L'initialisation du code Python 75
Figure VI-6: Définition des fonctions MAC et de fitness 76

Figure VI-7 : Evaluation de la population et sélection des parents 76
Figure VI-8 : Le nombre de capteurs obtenus par l'AG 77
Figure VI-9 : La qualité de la population 78
Figure VI-10 : L'emplacement des capteurs 79
Figure VII-1 : Schéma qui résume le principe de la détection de dommage 80
Figure VII-2 : Le processus de la détection des endommagements 81
Figure VII-3 : Exemple des sollicitations sur une des zones choisies 82
Figure VII-4 : Composantes d'un neurone artificiel 86
Figure VII-5 : Les types de cheminements d'un réseau de neurones 89
Figure VII-6 : La différence entre AI, ML et DL 90
Figure VII-7 : Le réseau de neurones 91
Figure VII-8 : La répartition des données 92
Figure VII-9 : La précision de la sévérité en phases d'apprentissage et de validation 93
Figure VII-10 : : La précision de la localisation des dommages en phases d'apprentissage ... 94

Liste des tableaux

Tableau II-1 : fe en fonction du type d'acier. 23
Tableau II-2 : Les charges dans le plancher de la terrasse 25
Tableau II-3 : Les charges dans le plancher du rez-de-chaussée 26
Tableau II-4 : Les charges dans le plancher du 1er étage 26
Tableau II-5 : Les charges dans le plancher de l'espace bureau des étages courants 28
Tableau II-6 : Les charges dans le plancher du noyau de étages courants 28
Tableau II-7 : Les charges de la façade extérieure 29
Tableau II-8 : Les charges du le palier 29
Tableau II-9 : Les charges du paillasse 30
Tableau III-1 : Les éléments structu raux 32
Tableau III-2 : résumé des charges introduites dans SAP2000 32
Tableau III-3 : Tableau de la participation massique 34
Tableau III-4 : Les résultats de chaque essai effectuer 41
Tableau III-5 : Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux 42
Tableau IV-1 : Les coefficients d'accélération de zone selon le RPA93 43
Tableau IV-2 : La vérification des critères du facteur de sécurtié 44
Tableau IV-3 : Les périodes caractéristiques du site selon RPA93 45
Tableau IV-4 : Tableau récapitulatif des paramètres calculé 47
Tableau IV-5 : résultats de la participation massique sous chargement 48
Tableau IV-6 : La vérification du déplacement inter-étages 51
Tableau IV-7 : La vérification de l'effet P-DELTA suivant X 51
Tableau IV-8 : La vérification de l'effet P-DELTA suivant Y 52
Tableau V-1 : Choix des barres longitudinales des poteaux 54
Tableau V-2 : La section transversale selon le BAEL 55
Tableau V-3: La section transversale minimale selon le RPA 56
Tableau V-4 : Le choix des armatures transversales 57
Tableau V-5 : Les vérifications de l'effort normal réduit 58
Tableau V-6 : Vérification des sollicitations tangentes selon le RPA 59
Tableau V-7 : Vérification des sollicitations tangentes selon le BAEL 60
Tableau V-8 : Choix des armatures longitudinales des poutres 61

Tableau V-9 : La section transversale selon RPA 62
Tableau V-10 : Section transversale selon BAEL 63
Tableau V-11 : Le choix des armatures transversales 63
Tableau V-12 : Vérification des contraintes tangentielles 64
Tableau V-13 : : Choix des barres des aciers verticaux des voiles 66
Tableau V-14 : Choix des barres des aciers horizontaux des voiles 67
Tableau V-15 : Le choix des barres horizontales de la dalle 8.1x6.9 68
Tableau V-16 : Le choix des barres verticales de la dalle 8.1x6.9 68
Tableau VII-1 : La diminution de la rigidité des 10 premiers degrés de sévérité 83

Introduction Générale

- **Introduction**

Quelques soient les structures en Génie Civil, courantes, à grande hauteur, d'importance stratégique ou même spatiales, elles représentent l'un des aspects clés de la puissance de l'économie d'un pays. Le rôle de l'ingénieur aujourd'hui connait un essor foudroyant en s'ouvrant sur de nouvelles pratiques, notamment l'utilisation de l'Intelligence Artificielle. En plus de concevoir, calculer et construire de nouvelles infrastructures, il doit entretenir, réparer et renforcer le bâti existant, prédire de potentiel ruines et agir en amont afin d'assurer simultanément la sécurité des usagers, la serviabilité des structures, la santé environnementale et l'économie.

- **Problématique**

Partout dans le monde, la surveillance de la santé des structures (Structural Health Monitoring ou SHM) est devenue de plus en plus courante et pratiquée afin de produire des diagnostics d'endommagements basés sur des enregistrements en temps réel de l'état des structures surveillées. Faisant partie du centre d'affaire de Bab Ezzouar (Alger), l'application d'un système de surveillance optimisé capable de prédire un endommagement quelconque dès les premiers signes paraît intéressant. Par ailleur, la prédiction de dommages potentiels en termes de sévérité et de localisation à l'aide d'outils d'Intelligence Artificiel est un réel challenge que cette présente étude accepte de relever.

- **Objectifs de l'étude**

Ce projet de fin d'études se concentre sur deux aspects primordiaux de la formation d'ingénieur en travaux publics, ou plus précisément en Génie Civil :

- Un calcul structurel conformément aux règles parasismiques algériennes, afin de garantir la résistance, la sécurité quant à l'exploitation future et la pérennité de la structure. Il comporte une modélisation numérique de la structure faisant cas d'étude, l'introduction de toutes les charges et combinaisons de charges, l'extraction des sollicitations dans les éléments structurels, leur calcul et leur ferraillage.
- L'application de méthodes hybrides basées sur des outils d'Intelligence Artificielle afin d'optimiser le nombre et l'emplacement des capteurs d'une future surveillance de la structure, mais aussi, la détection de dommage potentiels. Le but final étant de parvenir à détecter les dommages, leurs intensités et leurs emplacements à l'aide du signal vibratoire de la structure.

- **Organisation de la thèse**

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

- Le chapitre 1 consiste à une synthèse bibliographique sur le calcul sismique de structure conformément au règlement parasismique algérien en vigueur, ses objectifs et ses méthodes. Une recherche bibliographique sur la surveillance vibratoire des structures a également été menée en citant son principe, ses outils et son process.
- Le chapitre 2 porte sur la description de la structure étudiée, la présentation des caractéristiques des matériaux utilisés ainsi qu'un quantitatif des charges et surcharges qui lui sont appliquées.

- Le chapitre 3 présente le modèle numérique de la structure réalisé sur SAP2000, mais aussi sa validation expérimentale à l'aide d'essais de vibrations ambiantes réalisés sur la structure.
- Le chapitre 4 détaille l'étude sismique de la structure.
- Le chapitre 5 porte sur le ferraillage longitudinal et transversal de tous les éléments structuraux. Les croquis de ferraillage sont joints en annexe.
- Le chapitre 6 aborde la simulation de la surveillance vibratoire de la structure où un Algorithme Génétique a été conçu pour l'optimisation du nombre et de positions des capteurs.
- Le chapitre 7 étudie la performance d'un Réseau de Neurones Artificiels vis-à-vis de la détection des dommages potentiels de la structure, la prédiction de l'emplacement de l'apparition du dommage et son degré de sévérité.
- Enfin une conclusion générale qui revient sur les étapes clés et les accomplissements de ce projet de fin d'étude.
- Les annexes comporteront les plans de la structure (Annexe 1), les croquis de ferraillage des éléments structuraux (Annexe 2), l'algorithme de l'optimisation du nombre et de l'emplacement des capteurs codé par Python (Annexe 3), le RNA pour la prédiction des emplacements des dommages et de leurs sévérités codées par Python (Annexe4).

I.1. Introduction

Depuis la moitié du vingtième siècle, la société moderne a connu une croissance exponentielle et de grandes avancées technologiques et industrielles, notamment dans le domaine du génie civil et des techniques de construction et des matériaux. Cette dynamique du secteur du bâtiment a facilité l'émergence de structures imposantes et emblématiques, issues de l'ingéniosité et du progrès humain. Cependant, malgré cette évolution, le principe fondamental du génie civil reste inchangé, à savoir : garantir la durabilité, la sécurité et la fonctionnalité des structures.

Pour respecter ce principe, les systèmes structuraux doivent répondre à trois exigences : la solidité, la rigidité et la stabilité. Ces derniers garantissent que les bâtiments résistent aux différents risques et sollicitations auxquels ils sont confrontés.

L'activité sismique est l'un des phénomènes les plus dévastateurs qui peut nuire à la structure, et causer des dégâts irréversibles. Les ouvrages conçus en zones sismiques doivent respecter des mesures spécifiques afin de résister à l'action sismique. De ce fait, analyser la réponse des structures à travers une étude sismique est impérative pour les protéger, en veillant à ce qu'elles restent opérationnelles et résilientes à la suite des tremblements de terre.

Les dommages représentent la conséquence directe du séisme sur les systèmes structuraux et/ou non structuraux d'un ouvrage, se manifestant de différentes manières en fonction du type de structure et des facteurs environnementaux, selon des schémas et des degrés de gravité différents. Les dommages, étant une vulnérabilité inévitable, exigent une surveillance constante et une intervention rapide ; des évaluations régulières doivent être faites pour détecter et catégoriser les dommages, permettant des réparations rapides afin d'éviter leurs propagations et de réduire les répercussions potentielles.

Il existe plusieurs méthodes pour surveiller les ouvrages notamment la SHM (Structural Health Monitoring). Elle se distingue comme étant une solution de surveillance efficace et continue, qui utilise une variété de méthodes d'analyse pour faciliter la détection et la localisation des dommages, et fournir des informations inestimables sur la santé de la structure.

I.2. L'étude sismique

Un séisme est un tremblement soudain et intense du sol causé par le mouvement des plaques tectonique ou de la croûte terrestre accompagné par des vibrations.

Le séisme, phénomène naturel imprévisible engendre des dégâts consistants qui peuvent causer l'effondrement des ouvrages et des bâtiments, représentant ainsi un risque majeur pour la vie humaine. Il est donc plus que primordial de réaliser des études sismiques permettant de concevoir et de construire des structures résistantes aux chocs des séismes.

I.2.1. L'objectif de l'étude sismique

Durant leur période de vie, les structures sont constamment exposées à des charges permanentes et/ou quasi permanentes, statiques, ainsi qu'à des charges accidentelles plus dangereuses, telles que les charges sismiques. Ces dernières sont horizontales, et dynamiques, et peuvent générer d'autres forces comme les effets P-delta, les charges de vibrations et la liquéfaction du sol, entre autres [1]. Il est donc crucial de s'assurer que les structures peuvent résister à tous types de chargements, en particulier aux actions sismiques qui nécessitent une étude approfondie.

L'étude sismique a pour but de déterminer la réponse d'une structure face à un séisme en analysant les sollicitations et les déplacements engendrés par l'action sismique obtenus grâce aux caractéristiques dynamiques propres de la structure. Ces forces et les réactions de la structure permettent de vérifier la stabilité et la fiabilité de l'ouvrage, et de garantir la sécurité et la durabilité de la construction.

I.2.2. Les méthodes de calculs sismiques

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la réponse d'un ouvrage face à un séisme qui peuvent être classifier selon le type de force externe appliqué à la structure et le type de comportement de la structure.

Parmi ces méthodes, la réglementation algérienne préconise l'utilisation de 3 d'entre elles ; la méthode statique équivalente, la méthode d'analyse spectrale et l'analyse temporelle.

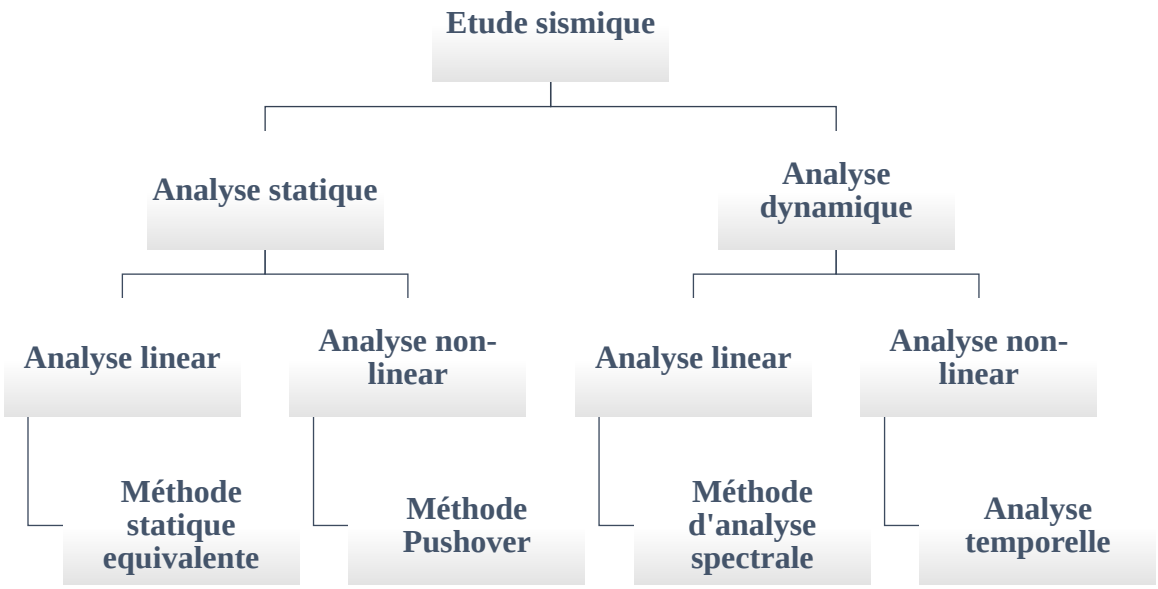


Figure I-1 : Schéma récapitulatif des méthodes d'analyse sismique

I.2.2.1. La méthode statique équivalente

La méthode statique équivalente est une méthode simplifiée dont le principe est de représenter la force sismique comme étant une force statique qui sera appliquée à la base de la structure, avec l'analyse d'un seul mode de vibration qui est le mode fondamental. Elle est utilisée sous condition que la structure ne dépasse pas une certaine hauteur, fixée par la réglementation algérienne, selon la zone sismique et le groupe d'usage. La formule pour obtenir cette force diffère selon la réglementation du pays, néanmoins, le principe reste le même ; le poids de l'ouvrage est multiplié par des facteurs à la zone sismique, la classification de la structure et le type de sol. Selon le RPA99/03, la formule de la force est comme suit :

$$V = \frac{A \times D \times Q}{R} \times W$$

Avec :

A : Coefficient d'accélération de zone

D : Facteur d'amplification moyen

Q : Facteur de sécurité

R : Facteur de sécurité

W : Le poids de la structure

I.2.2.2. La méthode d'analyse spectrale

C'est une méthode très utilisée qui donne des résultats plus précis que la méthode statique équivalente et qui est, contrairement à cette dernière, applicable à tout type de structures sans condition particulière. Le principe de la méthode est basé sur la réaction dynamique de la

structure face au séisme qui dépend de la fréquence naturelle et de l'amortissement de la structure [2].

La méthode s'utilise sur des modèles numériques des structures et appliquent les charges sismiques selon les directions principales de la structure sous forme de spectre de réponse. Ce dernier est la réponse maximale de la structure en fonction de la période naturelle de la structure.

Les résultats obtenus sont l'ensemble de déplacements, forces et efforts mesurés sur la structure

I.3. Les essais d'identifications des caractéristiques dynamique structurelles

Les structures sont caractérisées par un ensemble de paramètres qui décrivent le comportement de la structure sous différents cas de charges, et ils sont regroupés, selon leurs natures, en 3 catégories : les propriétés physiques, mécaniques, et dynamiques.

Les propriétés physiques rassemblent les paramètres qui décrivent la forme et les dimensions de la structure, à savoir la longueur, largeur, hauteur, poids, et la densité, et elles sont obtenues grâce à de simples outils.

Les propriétés mécaniques aident à déterminer la capacité de la structure à résister à différents cas de charges dans les domaines élasto-plastique, sans ou avec déformation et avant la rupture, ça comprend : la résistance, la rigidité, durabilité, et module d'élasticité. Il existe de nombreux essais pour tirer chacun de ces paramètres ; essais de dureté (Brinell, Rockwell, Vickers), essais de tractions, compression, cisaillement, et flexion, et essais de fatigues.

Les propriétés dynamiques aident à connaître le comportement dynamique de la structure, et prédire sa réponse face à des charges vibratoires (séisme, chocs, …etc), parmi ces paramètres : les fréquences, les modes propres, et l'amortissement.

Le mode propre est une caractéristique de la réponse dynamique du matériau, l'amortissement est la caractéristique de dissipation d'énergie du matériau, et la fréquence naturelle est une caractéristique associée au système de matériau et de structure. [3]

L'évaluation de ces propriétés, appelé l'analyse modale, est importante pour détecter les dommages, car lorsqu'une structure est endommagée, ses propriétés dynamiques sont affectées, ce qui diminue les performances de cette dernière. L'analyse modale se fait théoriquement grâce à la modélisation en faisant une analyse avec le spectre de réponse, via une analyse numérique par élément finis, ou en représentant le model par des équations différentielles, mais aussi en pratique à travers des essais sur la structure : essais de vibrations ambiantes.

I.3.1. Les types d'essais de vibrations

Les essais de vibrations sont catégorisés selon la nature de la source d'excitation, et le temps d'application. La première classification distingue deux types d'excitations : les excitations de chocs, et les excitations vibratoire. La différence réside dans le temps d'application ainsi que l'amplitude de l'effort, tandis que les excitations vibratoires sont de faibles amplitudes appliquées de manière répétitive, les excitations de chocs ou sont des évènements transitoires avec de fortes accélérations. [4]

Parmi les excitations transitoires, il y a l'essai avec marteau d'impact, l'excitateur électrodynamique, et l'excitation par choc. La sous-catégorie des excitations vibratoires, dîtes

impulsionnelles, englobe quant à elle : les excitations périodiques, à large bande, et ambiantes. [4]

I.3.2. Les essais de vibrations ambiantes

Le principe des essais de vibrations ambiantes est de capter les vibrations à très basses fréquences par les sismographes de très haute sensibilité. [5] Elle se distingue des autres car elle est économique et facile à réaliser : la structure reste en service lors des essais, et les vibrations enregistrées sont due aux micro-vibrations du sol, au trafic aux alentours, à l'effet du vent ...etc.

En revanche, malgré sa simplicité, elle ne peut pas être toujours choisit car elle n'estime pas la valeur de l'amortissement correctement car il dépend de l'amplitude, et dans les essais de vibrations ambiantes, l'excitation est inconnue [6]. Cette méthode est néanmoins utilisée pour valider le model numérique.

I.4. La surveillance vibratoire des structures (Structural Health Monitoring : SHM)

La Structural Health Monitoring est un processus établi pour surveiller de manière continue une structure et rester à jour sur son état. Une autre définition du SHM est « SHM est le processus d'implanter une stratégie d'identification de dommage, ou le dommage est identifié comme un changement dans les propriétés du matériau ou bien du système, ou même un changement dans les conditions aux limites et la connectivité du système, et tout autre élément qui peut nuire aux performances du système » [7] Méthode basée sur des techniques avancées, elle réduit, voire élimine les déplacements périodiques pour expertiser l'ouvrage visuellement, tout en supprimant la subjectivité de l'expert quant à l'état de la structure en question. Elle est devenue de plus en plus adoptée pour plusieurs raisons, notamment :

- Elle utilise de nouvelles technologies pour évaluer et maintenir l'état de fonctionnement des structures, et ainsi les déclarer sûres ou inexploitables, selon le cas.
- Elle détecte les risques potentiels dès leurs premières apparitions, permettant des interventions préventives et la prolongation de la durée de vie des structures.
- Elle aide à diminuer les pertes humaines et économiques.

Les questions à poser en SHM sont [8]:

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

I.4.1. Le principe de la surveillance vibratoire des structures

Le concept de base de la surveillance globale des structures est que l'existence d'un endommagement changera forcément la rigidité, la masse ou les propriétés d'amortissement de la structure et ainsi altérera ses propriétés dynamiques globales. L'avantage principal de ce type de méthode est qu'il n'est pas nécessaire de connaitre l'emplacement de l'endommagement avant l'installation du système, ce qui est souvent impossible à déterminer pour les structures complexes. Les méthodes de surveillance globale peuvent être basées sur différentes propriétés modales d'une structure. [9]

Le processus se fait sur plusieurs niveaux : en 1er lieu, des capteurs sont implantés tout au long de la structure et qui sont connectés à des systèmes d'acquisition de données, qui traitent les signaux, et en cas d'anomalie, alertent les ingénieurs afin qu'ils puissent vérifier la structure et prendre des décisions.

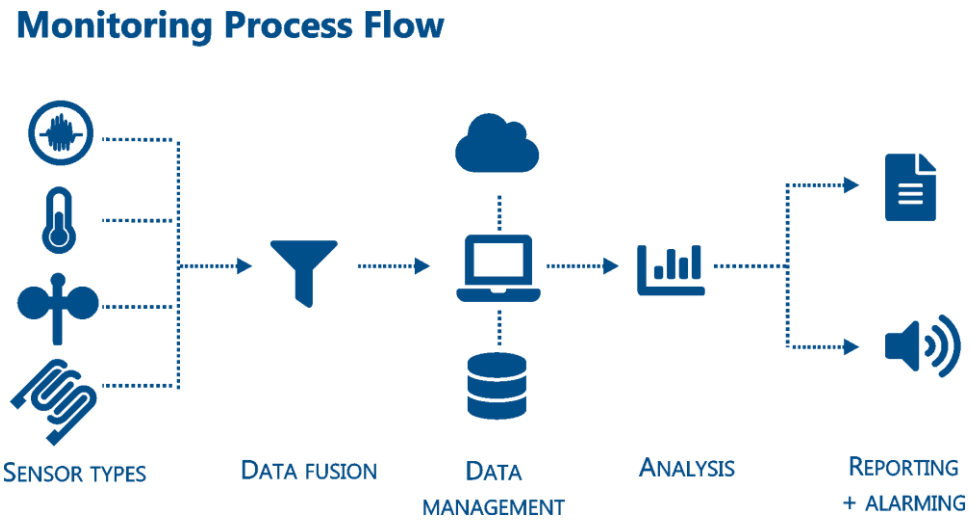


Figure I-2 : Processus du Structural Health Monitoring

I.4.2. Les composantes de la SHM

Le processus de la SHM se compose de 5 systèmes :

- **Système de capteurs**

Il comprend divers types de capteurs qui mesurent les réponses de la structure (caméra, transducteur de déplacement, jauge de contrainte, thermomètre, capteur à fibre optique, accéléromètre, GNSS (Global Navigation Satellite System)).

- **Système d'acquisition et de transmission des données**

Il est utilisé pour la collecte, la transmission, le traitement et la mise en cache des données qui ont été collectées par les capteurs. Il est composé d'unités d'acquisition de données, de réseau de transmission et de centre de données.

- **Système de traitement et de contrôle des données**

Ce système est situé dans le centre de données, il contrôle les acquisitions de données, surveille le statut opérationnel du système, prétraité et affiche les données.

- **Système de gestion des données**

Il est composé du système de base de données (stockage des données, sauvegarde et archivage). Ce module stocke divers types de données dans la base de données en format structuré et gère les données de manière à ce qu'elles puissent être recherchées, lues, traitées et mises à jour de manière efficace et précise.

- **Système d'évaluation de la performance structurelle**

Ce module comprend les opérations suivantes :

- Analyse complète des données de surveillance.

- Analyse structurelle.

- Évaluation de l'état de sécurité de la structure dans son état actuel.

- Prédiction de la performance future de la structure sous des charges extrêmes.
- Problèmes de prévention précoce au besoin.
- Initialisation des alarmes en cas d'accidents, de chocs ou d'endommagements. [10]

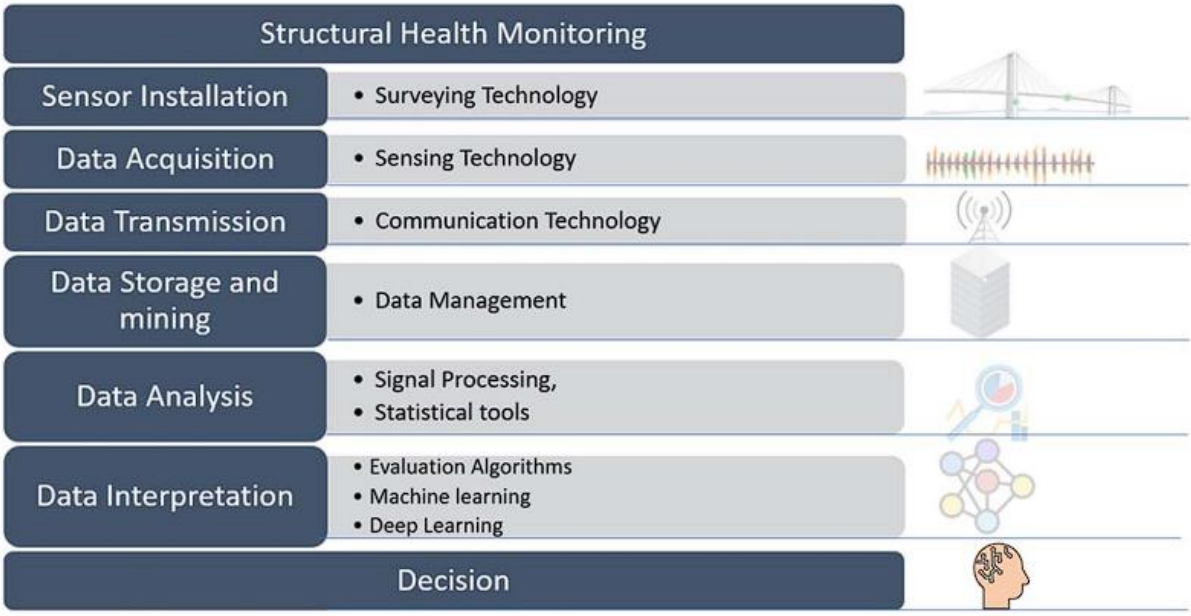


Figure I-3 : Résumé des composantes du SHM

I.5. L'endommagement structurel

Le mot endommagement ou dommage signifie d'une manière générale toute imperfection, défaillance ou défaut qui apparaît sur un matériau, qui altère son comportement naturel et de ce fait, nuit à ses performances et aux performances de la structure.

En ingénierie, le dommage est considéré comme une modification des propriétés matérielles et/ou des paramètres physiques structurels. Ces propriétés et paramètres peuvent être modifiés en raison de la plasticité du matériau, de la fatigue, de la corrosion ou autres.

I.5.1. Types de dommage

La classification des types de dommages est faite selon la cause principale de la dégradation, et elle diffère d'un matériau à un autre. L'intérêt porte sur les types de dommages du béton qui est le matériau principalement utilisé en construction.

I.5.1.1. Les dommages selon la manifestation visuelle

La classification des types de dommages est faite selon la cause principale de la dégradation, et elle diffère d'un matériau à un autre. L'intérêt porte sur les types de dommages du béton et de l'acier, qui sont les matériaux principalement utilisés en construction.

Il existe également différent type de dommages classé selon la manifestation visuelle comme l'écaillage, l'éclatement, la fissuration, le gondolage, etc.

- **L'écaillage**

L'écaillage est une déformation du béton qui est causée par des sollicitations thermiques, à savoir sous incendie, ou à l'exposition du gel-dégel. Ce phénomène se présente des pertes d'épaisseurs qui varient selon le degré de sévérité, avec dénudation des granulats, allant même parfois à l'arrachement du béton. [11]

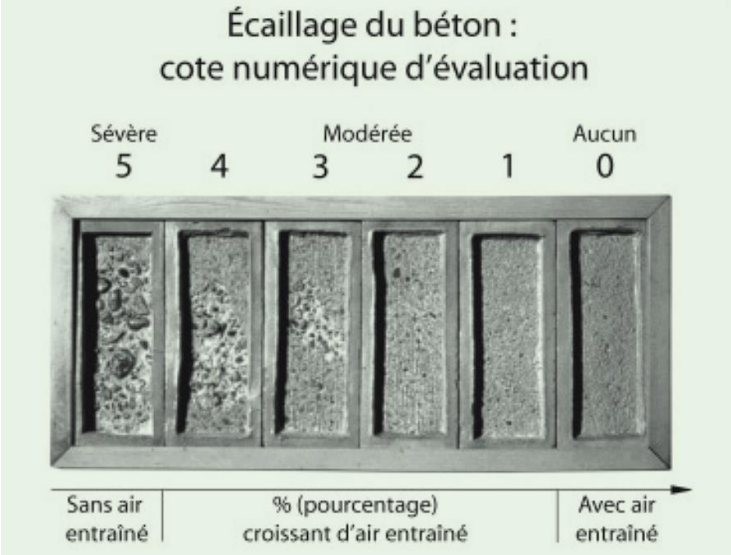


Figure I-4 : Illustration des degrés du phénomène d'écaillage

- **L'éclatement**

L'éclatement du béton est un phénomène soudain et violon qui se produit quand l'élément structurel est exposé a de grandes contraintes ou aux effets gels dégel. [12]



Figure I-5 : Visualisation de l'éclatement du béton

- **Les fissures**

Ce sont des déformations inévitables et qui arrivent pour plusieurs raisons, à savoir le retrait, les forces de cisaillement, le gonflement...etc. [12]



Figure I-6: Visualisation des fissures sur le béton

I.5.2. Les niveaux de dommages

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer le niveau de dommage causé par un seisme (e l'échelle Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS), de l'échelle Mercalli modifiée (MM-31 et MM-56) et l'échelle Medvedev) ainsi que European Macroseismic Scale (EMS). [13]

La dernière échelle mesure les effets sur les humains, sur les objets, et les dégâts causés aux bâtiments. Les dommages sont regroupés en dommage sur structure en maçonnerie, et dommage sur structure en béton armé. [14]

Les niveaux de dommage sont les mêmes, la différence réside dans la manière dont le dommage se montre sur chaque type de structure. Les niveaux de dommages varient entre de DL1, qui représente des dommages non structurels, à DL4, qui correspond à des dommages structurels importants (selon l'EMS98).

Les niveaux DL2 et DL3 englobent des fissures dans les colonnes et les joints de poutres-colonnes des cadres à la base et aux joints des murs couplés, l'éclatement du revêtement en béton, le flambement des barres d'armature, de grandes fissures dans les murs de séparation et les murs de remplissage, ainsi que la défaillance de panneaux de remplissage individuels. Les fissures dans les colonnes et les poutres des cadres, ainsi que dans les murs structurels, les fissures dans les murs de séparation et les murs de remplissage, la perte de revêtement fragile et de plâtre, et la chute de mortier des joints des panneaux muraux. [15]

Les niveaux de dommages les plus élevés (DL4, DL5) sont retrouvés en général dans le premier et le deuxième étage.

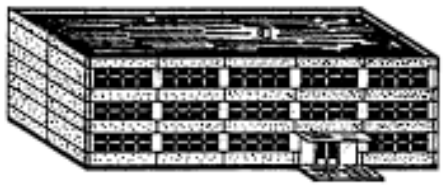
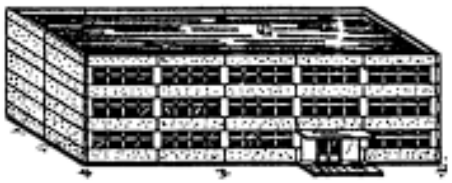
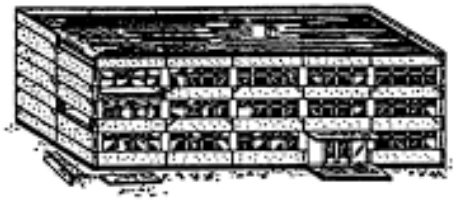
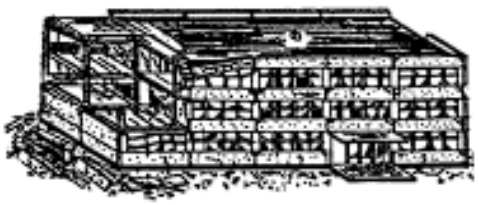
Classification des dégâts aux bâtiments en béton armé	
	**Degré 1: Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structural, légers dégâts non structurels)** Fissures fines dans le plâtre sur les parties de l'ossature ou sur les murs à la base. Fissures fines dans les cloisons et les remplissages.
	**Degré 2: Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)** Fissures dans les structures de types portiques (poteaux et poutres) et dans structures avec murs. Fissures dans les cloisons et les murs de remplissage; chute des revêtements friables et du plâtre. Chute du mortier aux jonctions entre les panneaux des murs.
	**Degré 3: Dégâts sensibles à importants (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants)** Fissures dans les poteaux et dans les nœuds à la base de l'ossature et aux extrémités des linteaux des murs avec des ouvertures. Ecaillage du revêtement de béton, flambement des barres d'armature longitudinale. Fissures importantes dans les cloisons et les murs de remplissage, défaillance de certains panneaux de remplissage.
	**Degré 4: Dégâts très importants (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)** Fissures importantes dans les éléments structuraux avec défaillance en compression du béton et rupture des barres à haute adhérence; perte de l'adhérence barres-béton; basculement des poteaux. Ecroulement de quelques poteaux ou d'un étage supérieur.
	**Degré 5: Destruction (dégâts structuraux très importants)** Effondrement total du rez-de-chaussée ou de parties de bâtiments.

Figure I-7 : Les degrés d'endommagement selon l'EMS9

I.5.3. La détection de dommages

La détection de dommage peut se faire sur le plan local ou global. Le plan local est quand la détection se fait sur une zone prédéfinie, et les méthodes classiques de détection utilisées sont

- **L'inspection visuelle**

Un ou plusieurs ingénieurs se déplacent sur site pour examiner la structure en question en prenant notes des dommages et l'ensemble des désordres visible, et en les capturant à l'aide d'un appareil photo. Un rapport d'expertise sera ensuite rédigé avec tous les dommages ayant été aperçus avec les causes probable ainsi que la proposition de solutions éventuelles.

- **Test non-destructif (Non-Destructive Testing)**

Pour cette méthode, une équipe d'ingénieurs et de techniciens sont mis en place avec les dispositifs qui conviennent pour faire des essais qui donnerons des résultats plus précis sur l'état de la structure, et ceci à travers une des plusieurs essais :

- Contrôle Ultrason (UT)
- Émissions Acoustiques (AE)
- Thermographie Infrarouge (IRT)
- Contrôle Radiographique (RT)
- Fuite de Flux Magnétique (MFL)
- Contrôle par Particules Magnétiques (MT)
- Corrélation d'Images Numériques (DIC)
- Contrôle par Liquide Pénétrant (PT)
- Méthodes de Test Laser (LM)
- Radar à Pénétration de Sol (GPR)

Toutes ces techniques exigent que la proximité du dommage soit connue et que la partie de la structure à inspecter soit facilement accessible. [16]

- **La méthode de surveillance vibratoire**

Le besoin de localiser et de quantifier le dommage a mené au développement-recherche de méthodes basées sur les changements des caractéristiques vibratoires de la structure. Leur efficacité a été approuvée dans les grands domaines du Génie Civil, de l'aéronautique et de la mécanique.

En effet, les développements relatifs aux méthodes basées sur l'analyse vibratoire ont permis, non seulement de détecter la présence d'endommagements dans les structures complexes, mais aussi d'identifier leur emplacement et la sévérité de leurs dommages, à un stade même précoce. Ce qui a motivé l'intérêt, pour les présenter dans ce chapitre.

Cette méthode est basée sur la réponse dynamique de la structure face aux vibrations. Cette approche est basée sur le fait que toute structure peut être considérée comme un système dynamique avec des propriétés de rigidité, de masse et d'amortissement. Le principe est que le dommage affecte les caractéristiques géométriques de la structure (la masse, la rigidité, …), ce qui cause un changement dans les paramètres dynamiques de la structure (fréquences propres, modes de vibration, taux d'amortissement). Trois catégories principales sont distinguées [17]:

- **Méthodes basées sur la variation des caractéristiques modales de la structure**

Les fréquences naturelles à elles seules peuvent uniquement indiquer la présence d'un dommage mais ne peuvent pas localiser précisément l'emplacement [18]. Une autre limitation des fréquences c'est qu'elles ne détectent pas toujours les dommages significatifs, et ceci particulièrement pour les grandes structures. [19] En vue de ces raisons, il est nécessaire d'avoir les modes propres car ils retiennent les coordonnées des dommages.

Cependant, les modifications des modes propres induites par les dommages sont souvent subtiles et nécessite l'utilisation d'un outil pour identifier le dommage. Pour cette raison, plusieurs indices ont été développés comme indices de corrélation entre deux modes, parmi eux, le critère d'assurance modale (MAC).

Le coefficient MAC (Modal Assurance Criterion) est un indicateur statistique très utilisé dans le SHM qui est la corrélation entre les modes propres de la structure saine et ceux de la structure endommagée. Il a des valeurs comprises entre 0 et 1 ; plus il tend vers 1, plus le risque de présence de dommage est petit, et plus il tend vers 0 plus le risque d'endommagement est grand. [20]

Il est calculé selon la formule suivante :

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

Avec :

ϕ_S : vecteur propre de la structure saine.

ϕ_D : vecteur propre de la structure endommagée.

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

Les éléments dans la matrice MAC sont inclus entre 0 et 1. [21]

$$MA = \begin{cases} 0 : \text{Pas (ou peu)de corrélation entre les éléments hors diagonale} \\ 1 : \text{grand degré de similitude entre les modes (presque impossible à distinguer)} \end{cases}$$

- **Méthodes basées sur des mesures de fonction de réponse fréquentielle (FRF)**

Les fonctions des réponses fréquentielles (FRF) d'une structure sont obtenues par la décomposition d'accélérogrammes, elle mesure la réponse d'une structure à des excitations harmoniques sur une gamme de fréquences. La signature vibratoire (FRF) d'une structure étant un indicateur sensible à l'intégrité de la structure peut être utilisée dans la détection des dommages et leurs emplacements. [22]

- **Méthodes basées sur la variation des matrices de flexibilité et de rigidité**

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

L'endommagement se traduit par une diminution de la rigidité de la structure ce qui implique une augmentation de la flexibilité des éléments proches de l'endommagement dans les termes diagonaux de la matrice de flexibilité. [17]

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

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

Une variation dans la matrice de flexibilité indique l'existence d'un endommagement, et la variation maximale ΔF observée dans la colonne de la matrice de flexibilité après l'apparition d'un dommage correspond à la localisation du dommage.

$$|\Delta F| = |F0 - Fd|$$

Avec :

F_0 : la matrice de flexibilité de la structure saine

F_d : la matrice de flexibilité de la structure endommagée.

ΔF représente donc la variation de la flexibilité.

- **Méthodes combinées entre les méthodes citées ci-dessous et des outils d'Intelligence Artificielle.**

Avec le développement des outils technologiques et notamment les outils d'intelligence artificielle, il devient de plus en plus commun de voir leurs utilisations dans la détection des dommages des structures. En effet, ils permettent l'identification des dommages car ces algorithmes peuvent résoudre de manière optimale des problèmes complexes sans avoir recours aux modèles analytiques ou mathématiques exactes du système.

Voici un schéma pour résumé les méthodes de détections de dommage :

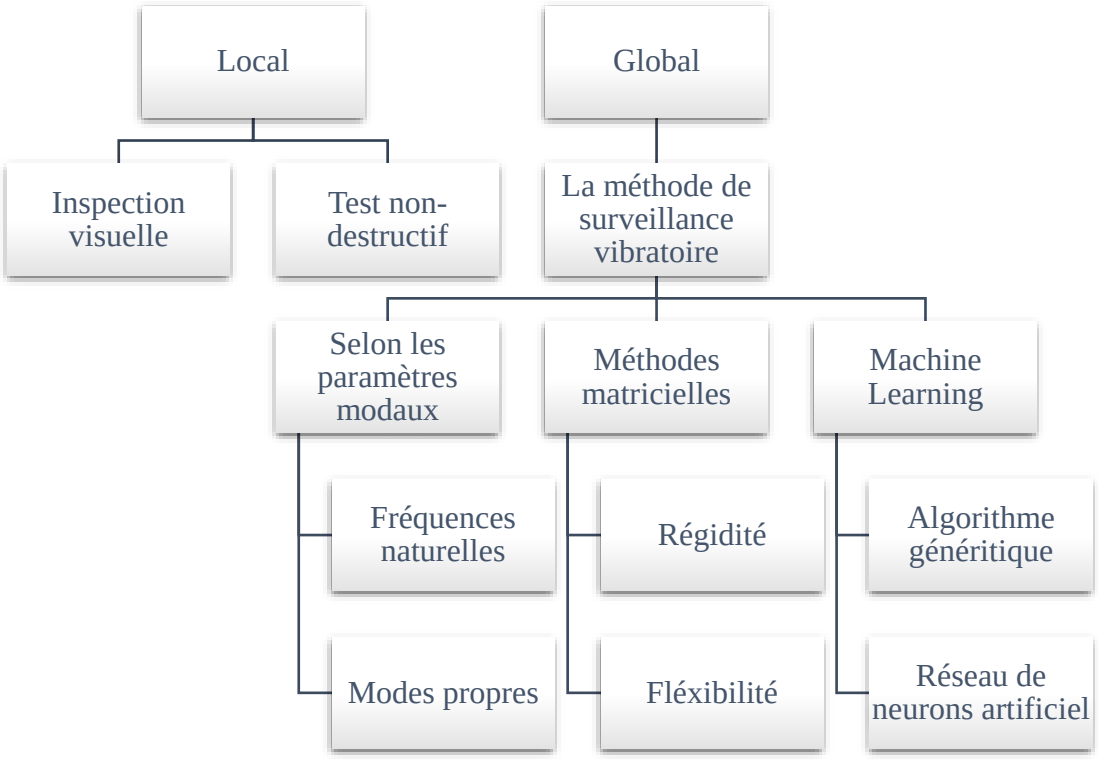


Figure I-8 : Schéma des méthodes de détection de dommage

I.5.4. La simulation d'un endommagement

La simulation d'un endommagement est une étape cruciale de la SHM et pour la détection de dommage, il s'agit d'arriver à imiter, numériquement ou réellement, le comportement d'un matériau quand il subit un certain type d'endommagement.

Pour simuler un dommage numériquement, plusieurs outils peuvent être employer, comme le logiciel ABAQUS, SAP2000, ou même avec une programmation en python. Mais le plus important est de comprendre le comportement adopté par le matériau lorsqu'il est confronté au dommage en question, afin de trouver la technique à utiliser pour le reproduire.

Par exemple, afin de simuler des fissurations de fatigue du béton, l'approche à suivre est de modéliser la structure dans un logiciel (ABAQUS, par exemple), et de lui attribuer des charges cycliques jusqu'à la rupture, et pour simuler les fissures, il faut diminuer les propriétés du matériau, plus précisément, la rigidité baisse. Le même principe s'applique pour les autres types de dommage, la différence réside dans la manière de représenté l'endommagement, chose qui est propre à chaque sorte de dommage.

II.1. Description du projet

La structure objet de cette étude porte sur le nouveau siège de FADERCO, spécialisée en la fabrication de produits d'hygiène. Ledit siège situer à Bab Ezzouar comporte 3 blocs en phase de finition ; un bâtiment (A) en R+7, le second (B) en R+2, et le dernier (C) en R+1. Les structures sont reliées par des joints sismiques.

Toutefois la présente étude sera concentrée sur la superstructure du bâtiment A.

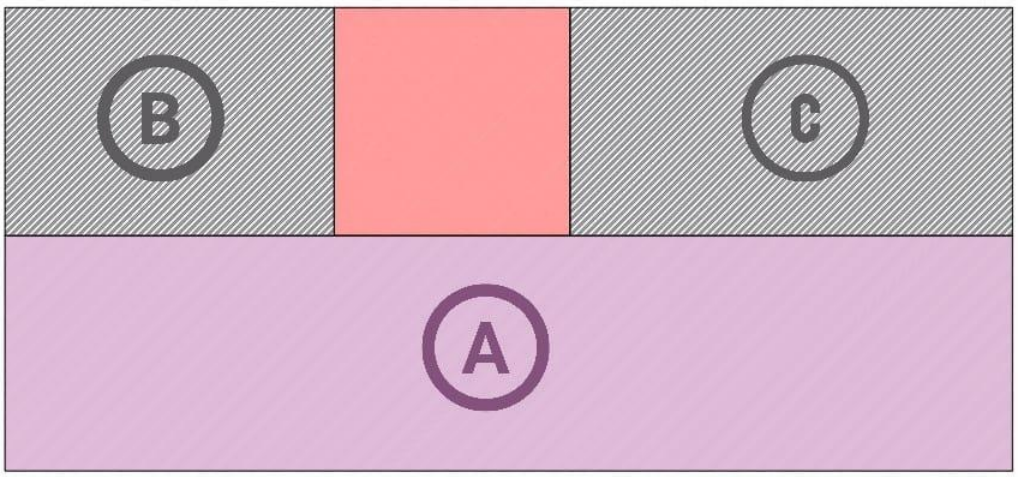


Figure II-1 Vue en plan de la disposition des blocs

Le bâtiment est composé d'un sous-sol qui sert de parking avec 4 niveaux. Quant à la superstructure, elle se compose de 7 étages et d'un rez-de-chaussée qui font usage de bureaux, ainsi qu'une terrasse privée accessible.

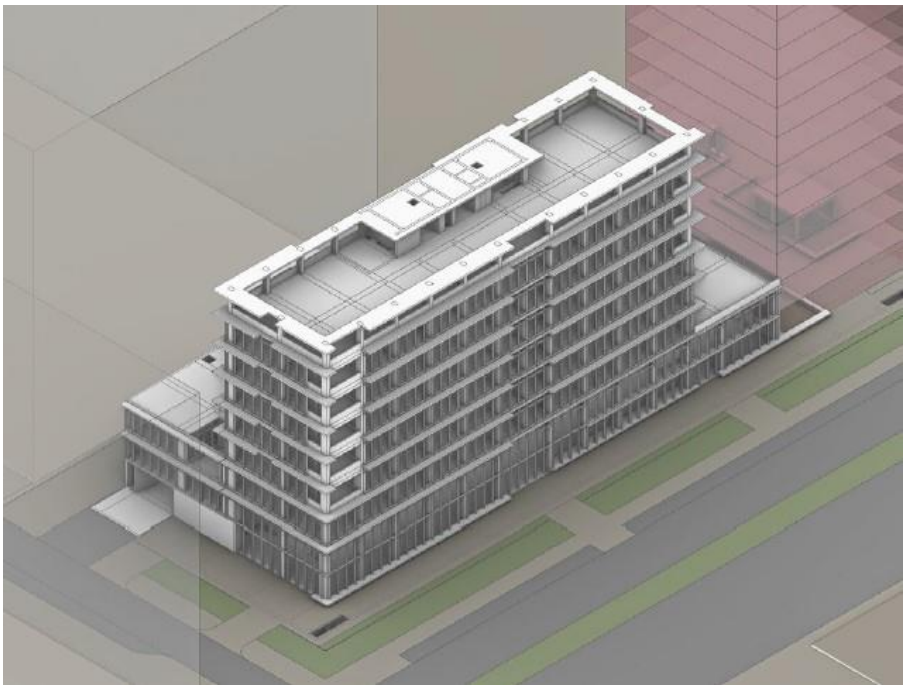


Figure II-2 : Vue en 3D de la structure

II.1.1. Situation géographique du site

Le projet est situé dans le centre d'affaire de Bab Ezzouar, Alger. La localisation du projet est stratégique étant donné que ce quartier regroupe de nombreux sièges sociaux de banques, de compagnies d'assurances, et de sociétés multinationales.



Figure II-3 : Localisation du siège de FADERCO

II.1.2. Dimensions en plan :

Le bâtiment est en forme rectangulaire avec 03 dimensions différentes, comme indiqué ci-dessous. Le rez-de-chaussée et le second étage ont une largeur de 15.50 mètres et une longueur de 70.70 mètres.



Figure II-4 : Vue en plan du rez-de-chaussée

Le 1er

étage qui est une mezzanine, avec un vide donnant sur le rez-de-chaussée, il est de longueur 57.25 mètres et de largeur 8.90 mètres.

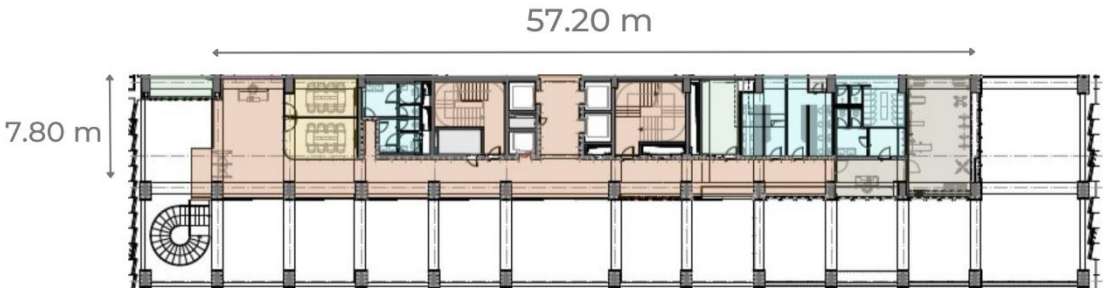


Figure II-5 : Vue en plan du 1er étage

Le reste de la structure (à partir du 3ème étage).



Figure II-6 : Vue en plan des étages courants

II.1.3. Dimensions en élévation :

- La hauteur totale du bâtiment est de 34.74 mètres.
- La hauteur est constante pour tous les étages et elle est de 3.96 mètres.

II.1.4. Caractéristiques de l'infrastructures

La hauteur de la partie ancrée est de 12.95 mètres.

La hauteur du premier étage du sous-sol est de 3.95 mètres, le reste des étages sont de 3 mètres.

La fondation est choisie suivant l'étude géotechnique faite par INZAMAC. Il s'agit d'un radier d'une épaisseur de 1.30 mètres.

II.2. Classification du projet

Avant de procéder à n'importe quel calcul ou dimensionnement, il est nécessaire de classifier le projet selon plusieurs critères, à savoir la sismicité de la zone où se trouve la structure, la nature du sol, et l'importance de l'ouvrage et ceci en se basant sur les Règles Parasismique Algériennes RPA99/version 2003.

II.2.1. La classification selon la zone sismique

D'après l'annexe I « Classification sismique des Wilayas et communes d'Algérie » du RPA 2003, la wilaya d'Alger (y compris la commune de Bab Ezzouar) appartient à la « Zone III », de sismicité élevée.

II.2.2. La classification selon l'importance de l'ouvrage

Le projet est un bâtiment à usage de bureaux dont la hauteur est inférieure à 48 mètres. Il appartient au groupe 02, c'est un ouvrage d'importance moyenne. (Article 3.2 du RPA)

II.2.3. La classification du sol

La classification du sol peut être faite selon plusieurs paramètres ; à partir de la vitesse d'onde de cisaillement, la résistance de pointe de l'essai du pénétromètre statique, le nombre de coup de l'essai SPT, le module pressiométrique ou la pression limite de l'essai du pressiomètre, ou la résistance en compression.

Selon le rapport géotechnique le sol est meuble, et selon le tableau 3.2 du RPA, le site du projet appartient donc à la catégorie S3.

II.2.4. Le système de contreventement

Le bâtiment est une structure en béton armée avec contreventement par noyau centrale.

Le noyau central est un massif en béton armé, composé de voiles très rigides encastrés, leur but est de reprendre les charges horizontales (l'action sismique, le vent…etc) et de les transmettre aux fondations. Le noyau central de cette structure contient des vides pour les ascenseurs ainsi que les escaliers de secours.

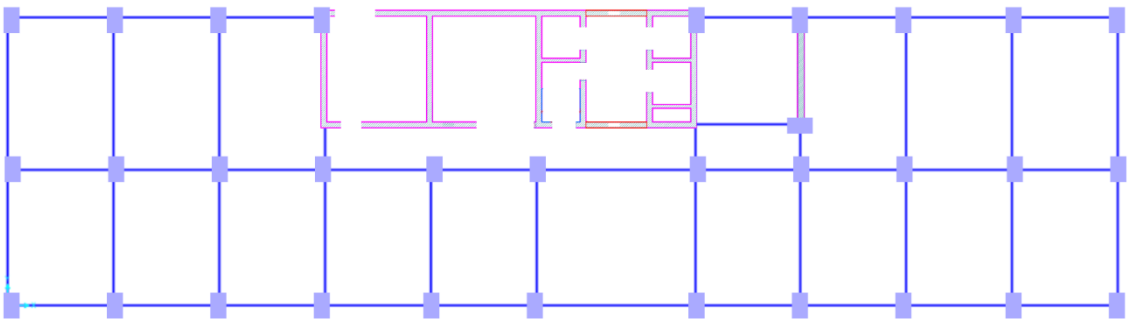


Figure II-7 : Système de contreventement de la structure

II.3. Les caractéristiques des matériaux

II.3.1. Le béton

Le béton constitue un matériau vital pour le domaine de la construction, il est utilisé dans toutes les branches du génie civil (les bâtiments, les ponts, les barrages, routes, …etc). Pour s'assurer de la rigidité de la structure, il est important de déterminer les paramètres qui caractérisent le béton à savoir : la résistance caractéristique, la déformation longitudinale du béton, et le coefficient de poisson.

II.3.1.1. Résistance caractéristique du béton

- **Résistance à la compression**

Dans les constructions courantes, le béton est défini par sa résistance caractéristique à la compression (à 28 jours d'âge noté « f_{c28} »).

Le durcissement étant progressif, f_{cj} est fonction de l'âge du béton. Sa valeur peut être obtenue, selon le cas, à travers les formules suivantes :

- Pour des résistances $f_{c28} \leq 40$ MPa.

$$\begin{cases} si\ j\ \leq 28\ \text{jours} & f_{cj} = \dfrac{j}{4.76 + 0.83\ j}\ f_{c28} \\ si\ j > 28\ jours & f_{cj} = f_{c28} \end{cases}$$

- Pour des résistances $f_{c28} > 40$ MPa.

$$\begin{cases} si\ j\ \leq 28\ \text{jours} & f_{cj} = \dfrac{j}{1.4 + 0.95}\ f_{c28} \\ si\ j > 28\ jours & f_{cj} = f_{c28} \end{cases}$$

La résistance moyenne du béton est de **35 MPa.**

- **La Résistance de béton à la traction f_{tj}**

La résistance caractéristique à la traction du béton à j jours, notée f_{tj}, est conventionnellement définie par les formules suivantes :

$$\begin{cases} Pour\ f_{c28} \leq 60\ \text{MPa} & f_{tj} = 0{,}6\ + 0{,}06 f_{cj} \\ Pour\ f_{c28} > 60\ \text{MPa} & f_{tj} = 0.275\ f_{cj} \end{cases}$$

La résistance à la compression du béton à 28 jours est de 35 MPa, f_{tj} est donc de **2.7 MPa.**

II.3.1.2. La déformation longitudinale du béton

On distingue deux modules de déformation longitudinale du béton : le module de Young instantané E_{ij} et différé E_{vj}

- **Le module de déformation longitudinale instantané**

Sous les contraintes normales d'une durée d'application inférieure à 24h la formule pour calculer le module de Young instantané comme suit :

$$E_{ij} = 11000 \times (f_{cj})^{1/3}$$

Pour une résistance à la compression du béton à 28 jours, le module de déformation instantanée du béton est égal à **35982.0 MPa**.

- **Le module de déformation longitudinale différé**

Sous des chargements de longue durée (cas courant), le module de déformation longitudinale différé permet de calculer la déformation finale du béton (qui prend en compte les déformations de fluage du béton). Il est calculé comme suit :

$$E_{vj} = \frac{1}{3} E_{ij}$$

Pour f_{c28} de 35 MPa, le module de déformation longitudinale différé est de **11994.0 MPa**.

II.3.1.3. Le coefficient de poisson

Le coefficient de poisson ν est le rapport de la déformation transversale relative à la déformation longitudinale (BAEL91, art A1.1.3)

Il est pris égal :

$$\begin{cases} \nu = 0 & \text{pour le calcul des sollicitations} \\ \nu = 0.2 & \text{pour le calcul des déformations} \end{cases}$$

II.3.2. L'acier

II.3.2.1. Définition

Le matériau acier est un alliage Fer et Carbone en faible pourcentage, il est caractérisé par une bonne résistance aussi bien en traction qu'en compression, mais également pour une bonne adhérence au béton.

Le module d'élasticité longitudinal de l'acier est pris égale à : Es=**210 000 MPa.**

II.3.2.2. Résistance caractéristique de l'acier

On définit la résistance caractéristique de l'acier « f_e » comme étant sa limite d'élasticité.

Les armatures généralement utilisées :

Tableau II-1 : fe en fonction du type d'acier.

	Aciers à hautes adhérences		**Treillis soudé à fils à lisses**	**Treillis soudés haute adhérence**
Désignation	FeE400	FeE500	TLE500	FeTE500
f_e [MPa]	400	500	500	500

L'armature de ce projet s'agit d'aciers à hautes adhérences avec une limite d'élasticité de 500 MPa, FeE500.

II.4. L'étude géotechnique

L'étude géotechnique a été faite par l'entreprise INZAMAC. L'étude inclus la reconnaissance du sol à travers des essais in-situ et des essais au laboratoire, ainsi que l'étude des fondations.

II.4.1. Les essais du laboratoire et in-situ

2 Sondages carottés ont été prélevé sur le site, et les échantillons ont été transportés au laboratoire pour obtenir les caractéristiques du sol, cela comprend : la teneur en eau, la densité apparente, l'analyse granulométrique, l'analyse sédimentométrique, les limites d'Atterberg, l'essai de cisaillement rectiligne non consolidé et non drainé, l'essai de compressibilité à l'œdomètre, et l'analyse chimique

Quant aux essais in-situ, ils comprennent les essais SPT et les essais pressiométriques.

L'ensemble des essais de laboratoire indiquent que le sol est un sable argileux, présentant des argiles et des limons fermes, ainsi que des sables et des graves moyennement compacts. La classification du site en tant que sol meuble de catégorie S3 est également obtenue par les essais in-situ. Par ailleurs, aucun signe d'instabilité n'a été observé sur le site.

II.5. Les actions et les sollicitations

II.5.1. Les actions

Toute force appliquée à une structure est définit comme une action qui a un impact sur la stabilité et la durée de vie de la structure, ce sont les charges, les déformations imposées, et les accélérations. Elles sont classées selon leurs variations au fil du temps :

- Les charges permanentes (G) :

Les actions permanentes sont des forces constantes qui ne varient pas au cours du temps, elles comprennent :

  - Le poids propre de la structure.
  - Cloisons, revêtement, superstructures fixes.
  - Les déformations imposées à la structure.
- Les charges d'exploitations Q

Les charges d'exploitations sont l'ensemble des forces qui varient en fonction du temps, elles comprennent :

- Les charges d'exploitations.
- Les charges climatiques (neige et vent).
- Les effets thermiques.

- Des actions accidentelles (FA).

Les actions accidentelles proviennent des événements exceptionnels qui se produisent rarement et avec une courte durée, par exemple :

- Les chocs.
- Les séismes.
- Les explosions.
- Les feux.

La force sismique est l'action qui sera prise en compte et sa valeur sera calculée dans le prochain chapitre.

II.5.1.1. Les combinaisons de calcul

Les combinaisons de calcul à considérer pour la détermination des sollicitations et des déformations sont :

- Situations durables :
  - ELS : 1.35 G + 1.5 Q
  - ELU :1.35 G + 1.5 Q
- Situations accidentelles :
  - 0.8 G ± E + Q ± E

II.5.2. Les sollicitations

Les sollicitations sont les efforts (effort normal, effort tranchant, moment de flexion, moment de torsion) développés dans une combinaison d'action donnée.

Les sollicitations extrêmes min et max seront tirées du modèle numérique et utilisées par la suite dans le ferraillage des éléments structuraux et secondaires.

II.6. Les charges et les surcharges d'exploitation

II.6.1. Plancher terrasse accessible

La terrasse sera un espace accessible et accueillera des évènements, (conférences, réunions ... etc.) et donc des charges supplémentaires. Pour cette raison, la charge d'exploitation a été prise supérieure à celle proposée par le DTR.

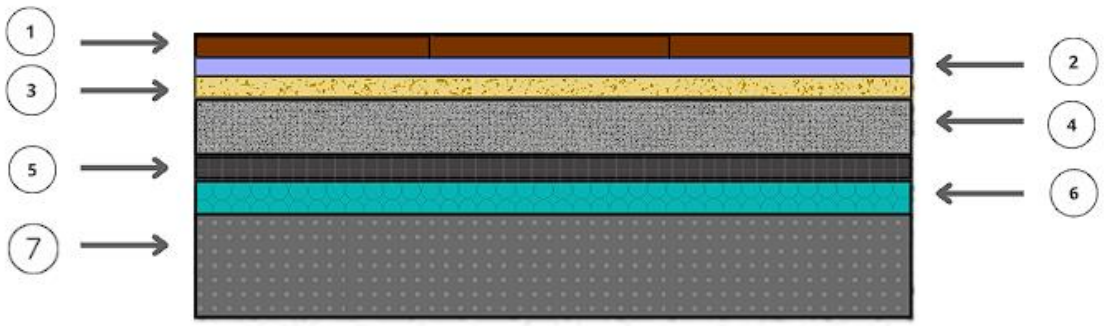


Figure II-8 : Coupe transversale du plancher de la terrasse accessible

Tableau II-2 : Les charges dans le plancher de la terrasse

N°	Elément	Epaisseur (cm)	Poids volumique (KN/m^3)	La charge (KN/m^2)
01	Revêtement en carrelage	2	0.60	0.60
02	Mortier de pose	2	0.20/cm	0.40
03	Lit de sable	2	18	0.36
04	Béton de pente	10	0.22/cm	2.2
05	Etanchéité multicouche	2	0.12 (pour 2 cm)	0.12
06	Isolation thermique	4	40 kg/m^3	0.16
07	Dalle pleine	18	0.25 /cm	4.50
08	Enduit en plâtre	2	0.10/cm	0.20
La charge permanente				8.54
La charge d'exploitation				3

II.6.2. Plancher du rez-de-chaussée

Le rez-de-chaussée est un espace de 1095.85 m², il comporte un hall, un restaurant ainsi qu'un auditoire.

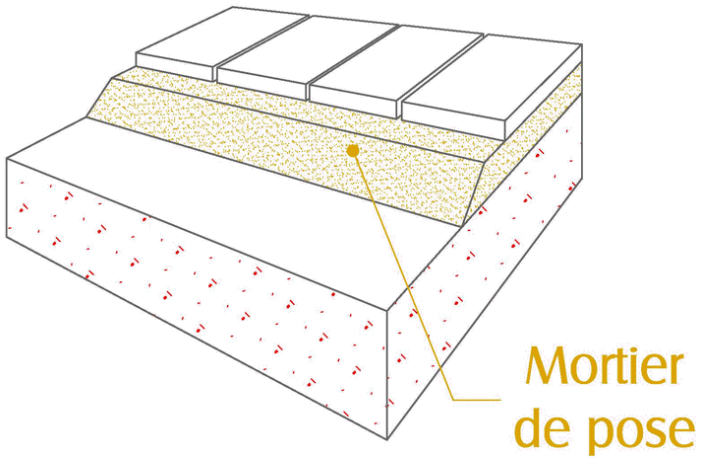


Figure II-9 : Coupe transversale du plancher du rez-de-chaussée

Tableau II-3 : Les charges dans le plancher du rez-de-chaussée

N°	Elément	Epaisseur (cm)	Poids volumique (KN/m^3)	La charge (KN/m^2)
01	Eléments suspendus	-	-	0.2
02	Mortier de pose léger	9	14	1.26
03	Carrelage en grés	0.9	25	0.23
05	Dalle pleine	18	0.25/cm	4.5
La charge permanente				6.19
La charge d'exploitation				3

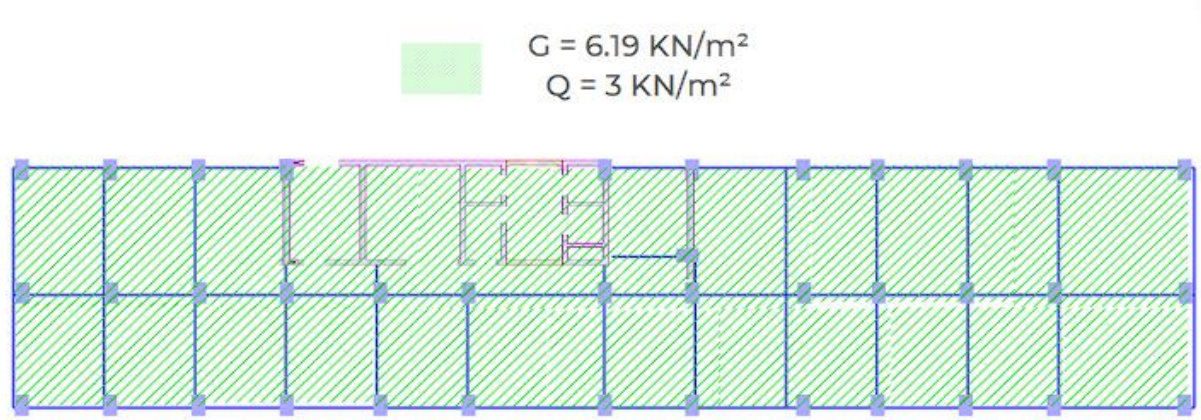


Figure II-10 : La répartition des charges dans le rez-de-chaussée

II.6.3. Plancher du 1er étage

Le 1er étage est un étage intermédiaire de 511.12 m² avec un espace vide qui surplombe le rez-de-chaussée. L'étage est composé d'une salle de prière et salle d'ablution.

Tableau II-4 : Les charges dans le plancher du 1er étage

N°	Elément	Epaisseur (cm)	Poids volumique (KN/m^3)	La charge (KN/m^2)
01	Eléments suspendus	-	-	0.2
02	Mortier de pose léger	9	14	1.26
03	Carrelage en grés	0.9	25	0.23
05	Dalle pleine	18	0.25/cm	4.5
06	Faux plafond	-	-	0.16
La charge permanente				6.35
La charge d'exploitation				2.5

La majorité du 1er étage est réalisé avec des dalles pleines de 18 cm, d'autres parties sont d'épaisseurs différentes, à savoir :

- Une partie adjacente au noyau centrale faite avec une dalle de 30 cm à cause de la portée qui est de 18.90 mètres et de la retombée de poutre.
- Une partie avec une dalle de 22 cm.

Cette disposition est valable pour le restant des étages.

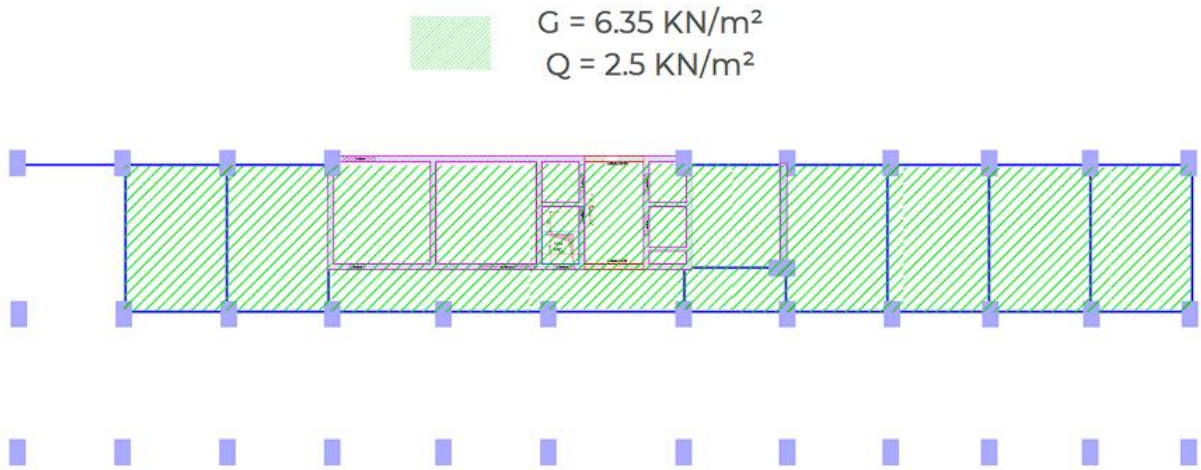


Figure II-11 : La répartition des charges dans le 1er étage

II.6.4. Plancher des étages courants

Les étages courants sont composés d'espaces de bureaux ouverts (open-space), sans séparation, ainsi que de la partie du noyau centrale comportant les sanitaires et les escaliers.

II.6.4.1. Plancher de l'espace bureau

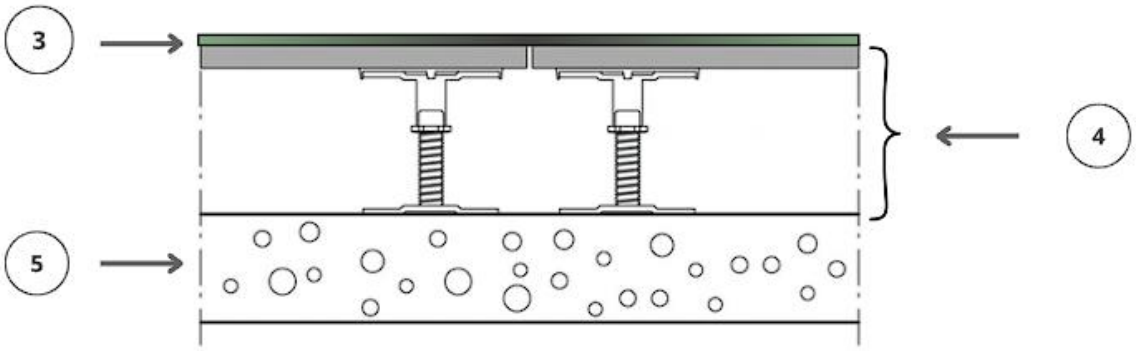


Figure II-12 : Coupe transversale du plancher du 1er étage

Tableau II-5 : Les charges dans le plancher de l'espace bureau des étages courants

N°	Elément	La charge (KN/m^2)
01	Eléments suspendus	0.20
02	Faux plancher	0.44
03	Moquette	0.05
04	Faux plafond	0.16
05	Dalle pleine	4.50
La charge permanente		5.35
La charge d'exploitation		3.5

II.6.4.2. Plancher de noyau

Tableau II-6 : Les charges dans le plancher du noyau de étages courants

N°	Elément	Epaisseur (cm)	Poids volumique (KN/m^3)	La charge (KN/m^2)
01	Eléments suspendus	-	-	0.20
02	Mortier de pose léger	10	14	1.40
03	Carrelage en grés	0.9	25	0.23
05	Dalle pleine	30	0.25/cm	7.5
06	Faux plafond	-	-	0.17
La charge permanente				9.5
La charge d'exploitation				3.5

Voici un schéma pour mieux illustrer la répartition des charges dans les étages courants :

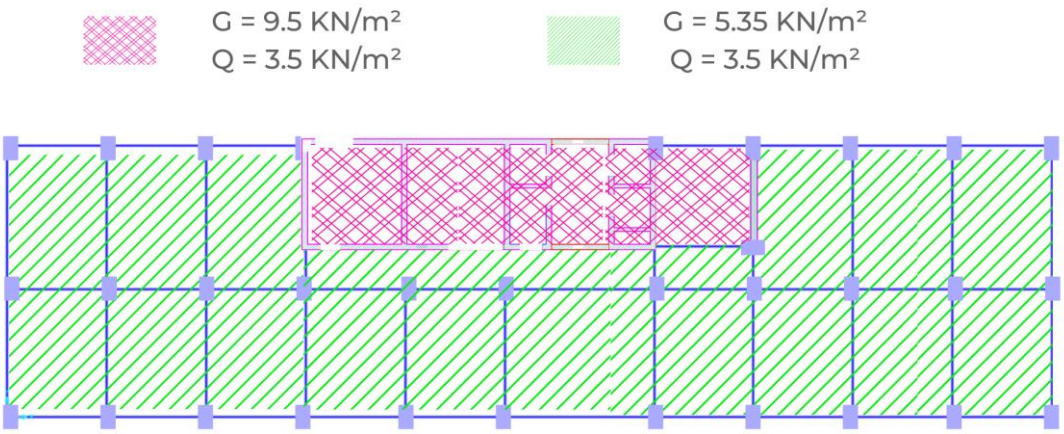


Figure II-13 : La répartition des charges dans les étages courants

II.6.5. La façade extérieure

La façade extérieure est une façade vitrée.

Tableau II-7 : Les charges de la façade extérieure

N°	Elément	Hauteur	Poids volumique (Kg/m^3)	La charge (KN/m^2)
01	Façades cadres/grille	10	3.52	0.352
02	Vitrage	50	3.52	1.76
03	Caillebotis (habillage)	30	1.00	0.30
04	Garde-corps	5	1.00	0.05
05	Personne	-	-	2.00
La charge permanente				4.47

II.6.6. Les escaliers

II.6.6.1. Le palier

Tableau II-8 : Les charges du le palier

N°	Elément	Epaisseur (cm)	Poids volumique (KN/m^3)	La charge (KN/m^2)
01	Revêtement en carrelage	2	0.60	0.6
02	Mortier de pose	2	0.20/cm	0.4
03	Lit de sable	2	18	0.36
04	Dalle pleine	18	0.25 / cm	4.5
05	Enduit de plâtre	2	0.10/cm	0.2
La charge permanente				6.1
La charge d'exploitation				2.5

II.6.6.2. Le paillasse

Tableau II-9 : Les charges du paillasse

N°	Elément	Epaisseur (cm)	Poids volumique (KN/m^3)	La charge (KN/m^2)
01	Revêtement en carrelage	2	0.60	0.6
02	Mortier de pose	2	0.20/cm	0.4
03	Lit de sable	2	18	0.36
04	Dalle pleine	18	0.25 / cm	4.5
05	Enduit de plâtre	2	0.10/cm	0.2
07	Poids de marche	0.16/2	22	1.76
La charge permanente				7.8
La charge d'exploitation				2.5

II.7. Conclusion

Ce chapitre sert comme contextualisation pour introduire le projet mais il présente également des informations importantes sur qui vont être utilisés dans les chapitres suivant comme les charges, la classe du béton, la classification de l'ouvrage …etc.

III.1. Présentation du logiciel SAP2000

Le SAP2000, développé par CSi (Computer and Structures, Inc.), est un logiciel de génie civil et parasismique. Il permet de modéliser et de concevoir les superstructures et fait l'analyse structural en se basant sur la méthode des éléments finis. Il évalue les performances et vérifie que l'ouvrage respecte les normes utilisées afin de garantir la sécurité et la fiabilité. Cet outil a un grand nombre de caractéristiques qui le distinguent d'autres logiciels, parmi eux :

- Le SAP2000 est un logiciel polyvalent, il est adapté pour tout type de structure (bâtiment, pont, silo, barrage…).
- Il offre un range important de types d'analyses : l'analyse statique linéaire, l'analyse modale, l'analyse dynamique et l'analyse statique non-linéaire, et donne des résultats précis.

III.2. Les étapes de travail

Les étapes de modélisation avec le SAP2000

1. Créer la géométrie de base de la structure.

2. Définir les éléments de structures (poteaux, poutres, dalles) et les propriétés des matériaux utilisés (le module d'élasticité, la densité…).

3. Etablir la structure selon le plan.

4. Déterminer les conditions aux limites (appuis, encastrement… etc.).

5. Définir les charges et les surcharges appliquées sur la structure (charges permanentes, surcharges d'exploitations et charge sismique).

6. Attribuer les combinaisons de charge.

7. Spécifier le nombre de modes et choisir le type d'analyse.

8. Exécuter l'analyse et interpréter les résultats.

III.2.1. Introductions des éléments structuraux

Tableau III-1 : Les éléments structu raux

Type d'élément	L'élément	Section (cmxcm)
Frame	Poteau	60x100
		50x90
		50x80
		50x70
		80x40
	Poutre	30x40
		30x60
		30x100
		40x40
		80x40
Shell	Dalle	18 cm
		22 cm
		30 cm
	Voile	20 cm
		30 cm

III.2.2. Introduction des charges

Les charges de plancher sont introduites sans le poids des dalles pleines car elles seront tenues en compte par le logiciel.

Tableau III-2 : résumé des charges introduites dans SAP2000

Localisation		Charge permanente [KN]	Charge d'exploitation [KN]
Terrasse		4	3
Etage courant	**Noyau**	2	3.5
	Bureau	0.85	3.5
Les escaliers		1.6	2.5
La façade		4.47	-

III.3. Le modèle numérique

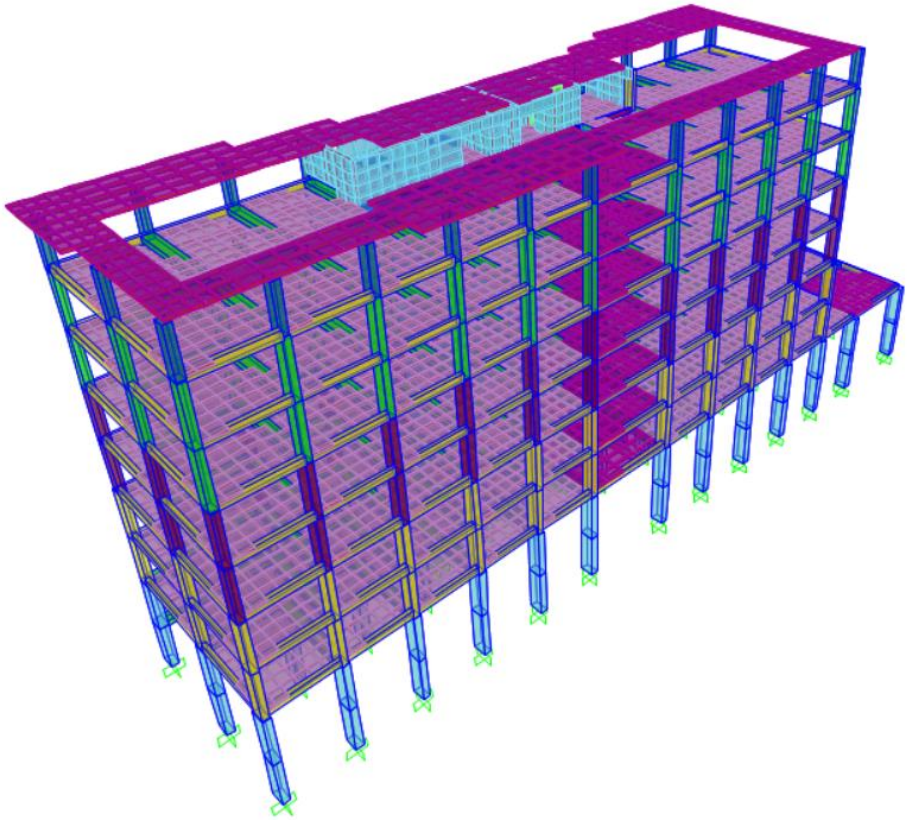


Figure III-1 : Vue en 3D du modèle SAP2000

III.4. L'analyse modale

Afin de pouvoir faire une étude dynamique, il convient de faire préalablement une analyse modale afin d'obtenir les caractéristiques intrinsèques de la structure.

Une structure peut se déformer sous plusieurs formes avec des fréquences différentes qui correspondent à différentes actions (translation, torsion… etc). La réponse de la structure diffère selon la charge dynamique appliquer : la charge harmonique, vibration aléatoire, dynamique transitoire ou spectre de réponse. Dans le cas des études sismiques, l'action du séisme est représentée par un spectre de réponse.

Il existe une infinité de degré de liberté dans chaque structure, et donc un nombre infini de modes, ce qui rendrait impossible l'analyse de chacun d'entre eux. Un paramètre est utilisé pour déterminer le nombre optimal de modes qui sont important : le facteur de participation massique, il représente le pourcentage de la masse de la structure qui participe dans la vibration d'un mode.

Le nombre de mode à retenir est obtenu lorsque la participation massique atteint 90% de la masse.

Pour ce projet, l'analyse a été faite, dans un premier lieu, théoriquement grâce au logiciel, ensuite, afin de vérifier les résultats obtenus par SAP2000 et de s'assurer que le model est

conforme à la réalité, une analyse de vibrations ambiantes a été effectuer sur la structure avec le sismographe. Puisque le bâtiment est pratiquement complet et manque le revêtement et le vitrage extérieur, le model qui sera analyser ne sera pas charger afin de pouvoir comparer les deux résultats.

III.4.1. Résultats de l'analyse modale

Tableau III-3 : Tableau de la participation massique

Mode	Période	UX	UY	∑UX	∑UY
1	0.5955	0.1107	0.0138	0.1107	0.0138
2	0.5029	0.0030	0.6605	0.1137	0.6743
3	0.3192	0.6280	0.0000	0.7417	0.6743
4	0.1932	0.0186	0.0136	0.7602	0.6879
5	0.1442	0.0066	0.1410	0.7669	0.8289
6	0.1301	0.0001	0.0300	0.7670	0.8590
7	0.1184	0.0000	0.0000	0.7670	0.8590
8	0.1088	0.1356	0.0043	0.9025	0.8633
9	0.1032	0.0000	0.0000	0.9026	0.8633
10	0.1008	0.0000	0.0000	0.9026	0.8633
11	0.1006	0.0000	0.0001	0.9026	0.8634
12	0.1004	0.0057	0.0031	0.9083	0.8665
13	0.0987	0.0001	0.0003	0.9083	0.8667
14	0.0951	0.0002	0.0014	0.9085	0.8682
15	0.0895	0.0032	0.0111	0.9116	0.8792
16	0.0889	0.0000	0.0002	0.9117	0.8794
17	0.0875	0.0001	0.0000	0.9118	0.8794
18	0.0871	0.0002	0.0000	0.9120	0.8794
19	0.0867	0.0000	0.0000	0.9120	0.8794
20	0.0847	0.0000	0.0004	0.9120	0.8799
21	0.0846	0.0001	0.0002	0.9121	0.8801
22	0.0827	0.0000	0.0000	0.9121	0.8801
23	0.0820	0.0000	0.0000	0.9122	0.8801
24	0.0819	0.0000	0.0000	0.9122	0.8801
25	0.0814	0.0000	0.0000	0.9122	0.8801
26	0.0813	0.0001	0.0002	0.9123	0.8803
27	0.0807	0.0000	0.0000	0.9123	0.8803

28	0.0806	0.0000	0.0004	0.9124	0.8807
29	0.0801	0.0000	0.0000	0.9124	0.8808
30	0.0790	0.0004	0.0068	0.9128	0.8875
31	0.0786	0.0004	0.0038	0.9131	0.8913
32	0.0782	0.0000	0.0000	0.9131	0.8913
33	0.0781	0.0000	0.0016	0.9131	0.8929
34	0.0775	0.0003	0.0000	0.9134	0.8929
35	0.0772	0.0028	0.0000	0.9162	0.8929
36	0.0772	0.0000	0.0002	0.9162	0.8931
37	0.0770	0.0005	0.0000	0.9167	0.8931
38	0.0765	0.0001	0.0001	0.9168	0.8932
39	0.0764	0.0001	0.0004	0.9169	0.8935
40	0.0760	0.0051	0.0125	0.9220	0.9060
41	0.0758	0.0001	0.0001	0.9220	0.9061
42	0.0757	0.0016	0.0032	0.9236	0.9092
43	0.0757	0.0008	0.0006	0.9243	0.9099

III.4.2. Interprétation des résultats

Le choix de nombre de mode total à analyser sur le logiciel est 50 modes afin d'assurer que le pourcentage de participation massique sera atteint dans les deux directions X et Y.

- **La masse effective**

La somme des masses modale effective atteint les 90% au bout du :

- 7ème mode suivant le sens X.
- 40ème mode suivant le sens Y.

- **La participation modale**

La participation modale est maximale dans :

- 3ème mode suivant X.
- 2ème mode suivant Y.

- **Le type de modes de vibration observés**
  - Le 1er mode est un mode couplé de torsion.
  - Le 2ème mode est un mode de translation suivant l'axe Y.
  - Le 3ème mode est également un mode de translation, il est en revanche suivant l'axe X.
- **Les caractéristiques dynamiques**
  - La période est de 0.59 s
  - La fréquence est de 1.67 HZ

III.5. Validation du modèle numérique par essais de vibrations ambiantes

Les essais de vibrations ambiantes peuvent être résumés en 3 étapes :

- Les capteurs sont placés dans des endroits stratégiques, ils captent les vibrations à faibles amplitudes.
- Le traitement de signal avec un logiciel dédié.
- La comparaison entre les fréquences du modèle numériques et de la structure réelle.

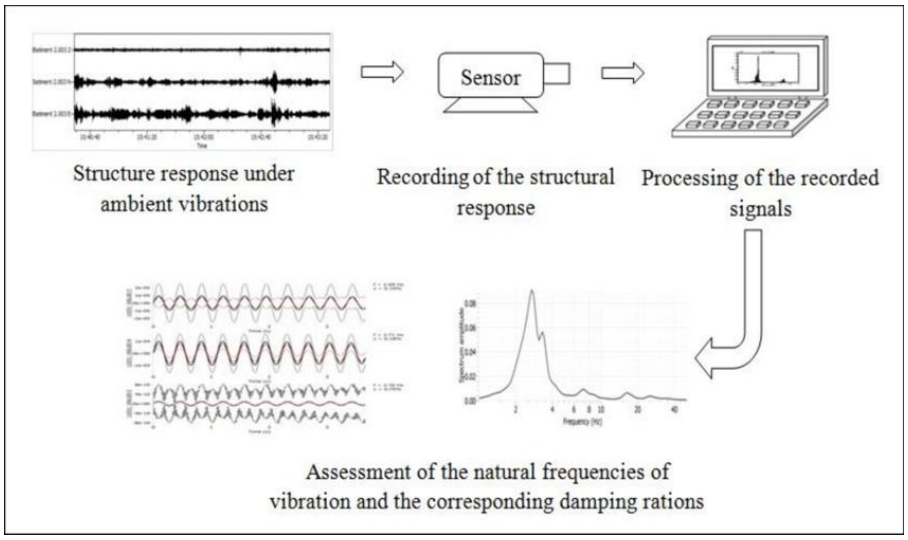


Figure III-2 : Le processus des essais de vibration ambiantes

III.5.1. Le matériel utilisé

- **Un sismomètre**

C'est un capteur qui détecte les vibrations de la structure. Le capteur utilisé est celui de Lennartz Electronics, il opère dans les 3 dimensions Nord-Sud, Est-West et selon Z.



Figure III-3 : Le sismographe utilisé lors des essais de vibrations ambiante

- **Un système d'acquisition des données**

Les données détecter par le capteur sont transmises par des câbles au système d'acquisition de données qui les enregistres dans une carte mémoire. Le système utilisé est City Shark II, il a la capacité d'enregistrer les signaux à faibles amplitudes.



Figure III-4 : Le système d'acquisition des données utilisé (CityShark II)

L'écran montre la station en plein enregistrement avec un gain de 512, un temps restant d'enregistrement de 4 minute (le temps initial était de 5 minutes). 'Ovf' indique le pourcentage d'échantillons saturés de l'enregistrement précédent. Le niveau de bruit montré par les barres à droite de 'Amp Max' est l'amplitude maximale parmi les échantillons.



Figure III-5 : Mainframe de CitySharkII

- **Le logiciel Geopsy**

Geopsy (Geophysical Signal Database for Noise Array Processing) est un logiciel open-source qui permet le traitement et l'analyse des données sismiques, y compris l'analyse de vibrations et des fréquences. Il est utilisé pour convertir les données temporelles en données fréquentielles, effectuer des analyses spectrales, déterminer les propriétés du sol, et analyser les enregistrements sismiques pour des applications en géophysique et en génie civil.

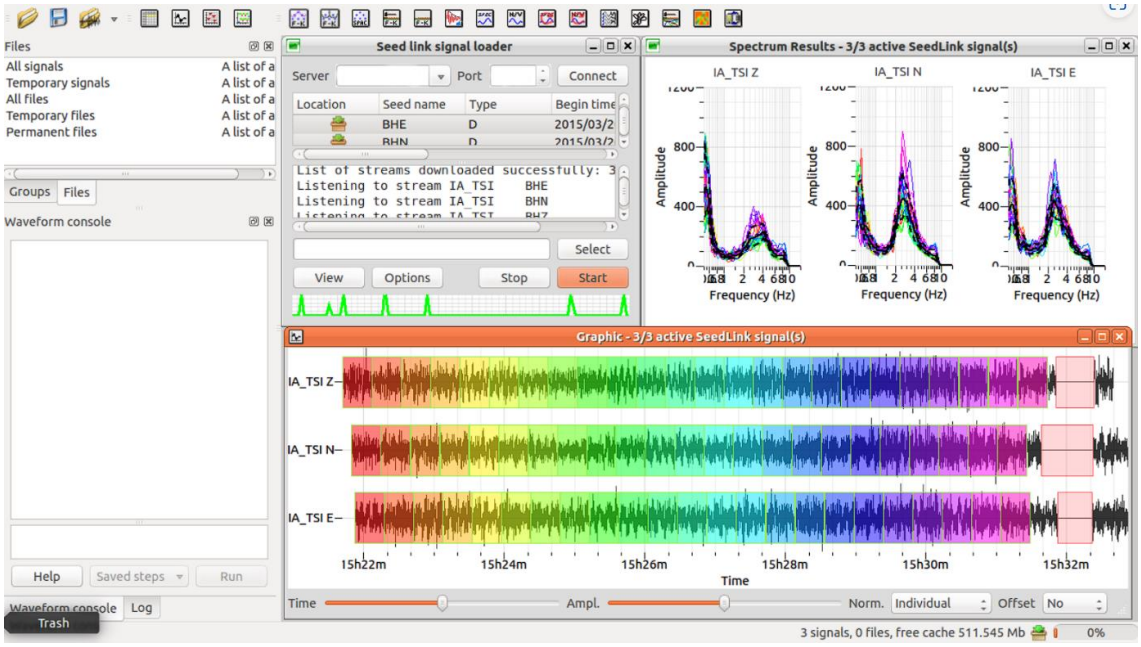


Figure III-6 : Le display de Geopsy

III.5.2. Le mode opératoire de l'essai

- **L'emplacement des capteurs**

L'essai a été effectué sur 6 niveaux : RDC, 1er, 3ème, 4ème, 6ème étage, et la terrasse.

La 1ère étape est de choisir l'emplacement du géophone, ceci dépend du type de mode à détecter, dans ce cas c'est l'effet de translation et de torsion. La translation a une amplitude maximale au centre de la structure, puisque le centre de torsion coïncide avec le centre de gravité, son effet est donc quasiment nul, le capteur doit donc être placé à proximité du centre de gravité. L'amplitude du mode de torsion est maximale dans les extrémités de la structure, le capteur sera donc placé dans un des coins de la structure. Il faut s'assurer de la planéité du capteur grâce à la nivelle.

La figure suivante présente un schème de repérage des essais réalisés sur la structure, afin d'illustrer toutes les positions du capteur choisies à chaque étage :

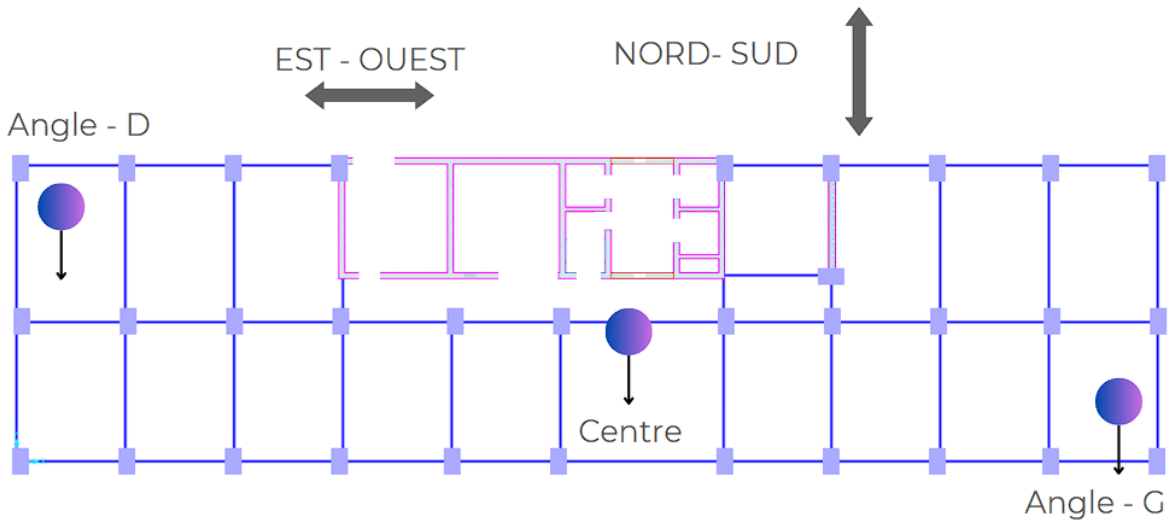


Figure III-7 : L'emplacement des capteurs

- **L'enregistrement**

Une fois le capteur mis en place, il faut configurer le système d'acquisition de données. Il convient de choisir la durée de l'enregistrement, elle doit être suffisante pour enregistrer la réponse de la structure à l'excitation stationnaire, pour ce cas, elle a été fixée à 5 minutes. Ensuite, il faut déterminer le taux d'enregistrement par seconde, il doit être supérieur à deux fois la fréquence maximale, il est fixé à 150 HZ. L'amplitude est ajustée selon la position du capteur ; sur les extrémités elle est grande donc les gains sont diminués, et elles sont plus faibles au centre. La variation de l'amplitude est également notée entre les étages : elle est moindre dans les étages inférieurs.

III.5.3. Traitement de signa

Les données collectées qui sont sous forme de signaux temporels ont été transférées vers le logiciel Geopsy pour traitement. Ensuite, les données du domaine temporel collectées par l'instrument ont été converties en données du domaine fréquentiel par l'algorithme de transformation de Fourier rapide présent dans le logiciel.

La transformation de Fourier rapide (FFT) est un outil de calcul qui transforme les données du domaine temporel en données du domaine fréquentiel en décomposant le signal en ses parties individuelles : les ondes sinusoïdales et cosinusoidales. Ce calcul permet d'observer les composantes fréquentielles du signal plutôt que la somme de ces composantes.

La FFT aide à déterminer les fréquences d'excitation dans un signal complexe et leur amplitude. Elle met également en évidence les variations de fréquence et d'amplitude dans la bande de fréquences sélectionnée.

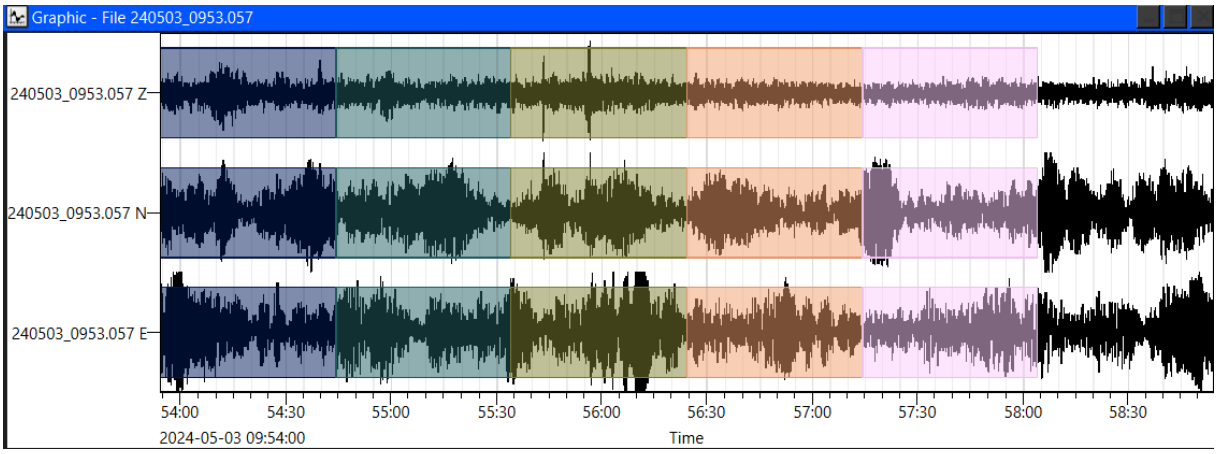


Figure III-8 : Traitement du signal d'un essai

Les fichiers sont donc téléchargés, puis le signal est traité grâce à la fonction Spectrum qui donne des courbes en fonctions des fréquences selon les 3 directions : Nord-Sud, Est-West, et selon la hauteur Z. Les fréquences sont négligeables suivant la dernière direction, et donc seulement les deux premières sont prises en considérations.

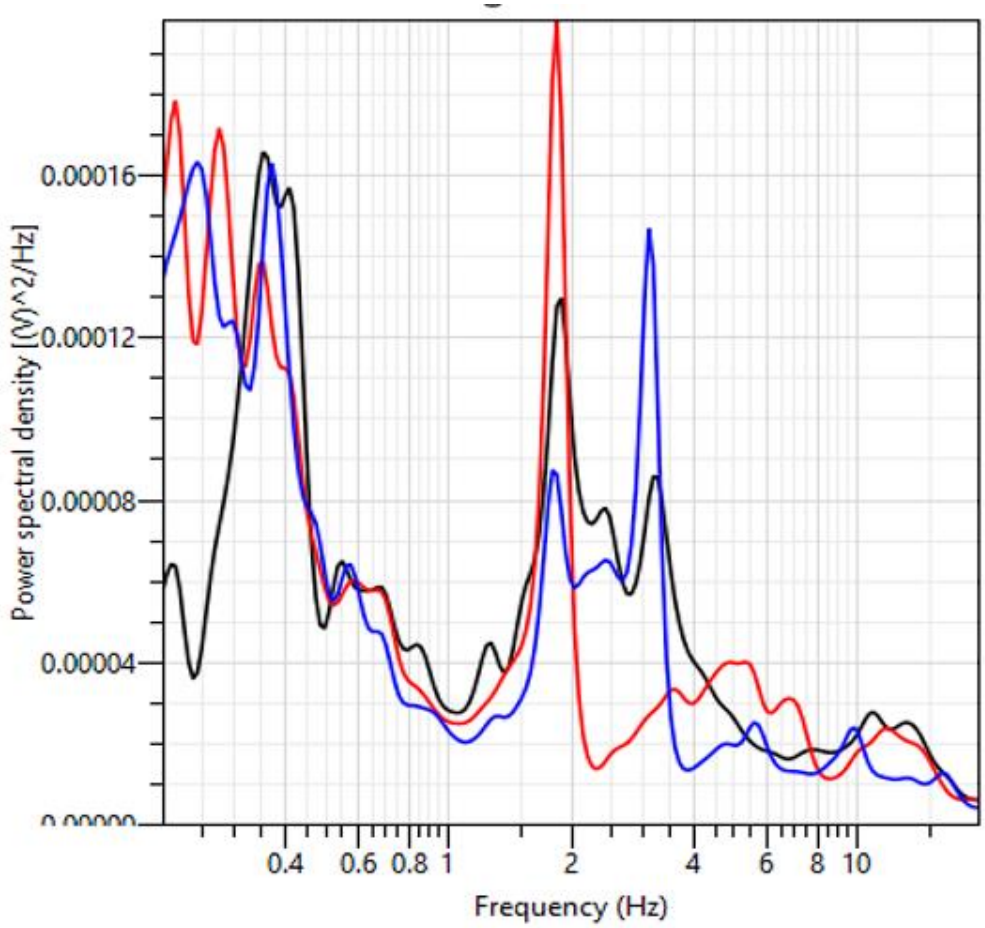


Figure III-9 ; Les fréquences trouvé lors de l'essai N°63

III.5.4. Les résultats

Les résultats sont sous forme de graphe à partir duquel les fréquences peuvent de chaque mode être tirés. En total, les 4 premiers modes ont été trouvés. Dans le tableau ci-dessous sont résumé les deux modes qui ont été retrouvés dans tous les étages, pour les deux autres modes, la moyenne de chacun sera prise dans l'interprétation des résultats.

Tableau III-4 : Les résultats de chaque essai effectuer

Niveau	Position	N°	N° de série	Fréquence	Direction	Fréquence	Direction
Terrasse	Centre	1	57	1.85	Nord	3.19	Nord
				1.83	Est	3.16	Est
	Angle	2	58	1.88	Nord	3.16	Nord
				1.85	Est	3.19	Est
6ème	Centre	3	59	1.85	Nord	3.12	Nord
				1.86	Est	3.19	Est
	Angle-D	4	60	1.9	Nord	3.11	Nord
				1.85	Est	3.19	Est
	Angle-G	5	61	1.85	Nord	3.19	Nord
				1.85	Est	3.19	Est
4ème	Centre	6	62	1.85	Nord	3.11	Nord
				1.85	Est	3.11	Est
	Angle-D	7	63	1.9	Nord	3.11	Nord
				1.81	Est	3.11	Est
3ème	Centre	8	64	1.85	Nord	3.18	Nord
				1.85	Est	3.12	Est
	Angle-D	9	65	Erroné	Nord	Erroné	Nord
					Est		Est
	Angle-D	9'	66	1.9	Nord	3.19	Nord
				1.85	Est	3.19	Est

III.5.5. L'interprétation des résultats

Pour que le modèle soit valide, il faut comparer les résultats obtenus lors de l'analyse modale faite par SAP2000 avec les résultats des essais de vibrations ambiantes, et la différence ne doit pas être dépasser les 20% :

Tableau III-5 : Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux

Fréquence		**La différence (%)**
Numérique	Expérimentale	
1.68	1.83	8.97
1.99	2.33	17.18
3.13	3.15	0.56
5.18	5.55	7.24

III.6. Conclusion

La modélisation est l'étape initiale de chaque étude, et il est important qu'il soit faîte soigneusement afin d'avoir de bons résultats et d'éviter les erreurs.

Le modèle conçu doit être fait conformément à la structure existante afin que la détection de dommage puisse donner de résultats concrets et qui s'appliquent à la structure.

Les résultats obtenus des essais de vibrations ambiantes confirment que la modèle reflète la structure actuelle.

IV.1. Introduction

La réglementation parasismique en Algérie propose trois méthodes de calcul : la méthode statique équivalente, l'analyse modale spectrale et l'analyse dynamique par accélérogrammes. L'étude sismique débute par le choix des méthodes à utiliser, il faut donc que les caractéristiques de la structure remplisse les conditions de la méthode choisit.

Pour cette structure particulière, la méthode utilisée est l'analyse modale spectrale. Cette dernière est réalisée grâce au logiciel SAP2000. Après avoir réalisé la modélisation de la structure, l'action sismique est appliquée sous forme de spectre de réponse. Ensuite, le logiciel procède à une analyse approfondie et fournit des résultats, incluant les réponses à l'action sismique.

La force sismique de la méthode statique équivalente sera calculée, car, même si la hauteur du bâtiment dépasse la limite imposée par la méthode, cette dernière est néanmoins utilisée à titre comparatif afin de faire les vérifications nécessaires. La force sismique est calculée en utilisant la formule 4.1 du règlement parasismique Algérien, puis elle sera comparée aux résultats obtenus par le logiciel.

Ensuite, une analyse des résultats obtenus par la méthode modale spectrale est effectuée, en justifiant les critères pour garantir la sécurité et la stabilité de la structure. Une fois les vérifications réglementaires achevées, la dernière étape consiste à réaliser le ferraillage des éléments structuraux, une opération qui peut être effectuée avec le logiciel SAP2000 avec la méthode de la courbe d'interaction N-M.

IV.2. Calcul de la force sismique

La force sismique obtenue grâce à la méthode statique équivalente pour représenter l'action du tremblement de terre prend en compte plusieurs paramètres liée à la structure, la zone sismique, et le type de sol.

- **Le coefficient d'accélération de zone**

Il dépend du groupe de la structure et de la zone sismique donné par le tableau 4.1 du RPA.

Tableau IV-1 : Les coefficients d'accélération de zone selon le RPA93

Catégorie	**Zone**			
	I	**II-a**	**II-b**	**III**
1 A	0.15	0.25	0.30	0.40
1 B	0.12	0.20	0.25	0.30
2	0.10	0.15	0.20	0.25
3	0.07	0.10	0.14	0.18

Cette structure est de catégorie 02 et est située en zone III, le coefficient d'accélération à prendre dans ce cas est **A = 0.25**.

- **Facteur de sécurité**

C'est un facteur qui est calculé selon des critères liés à la structure ainsi que son exécution. Il est donné par la formule suivante :

$$Q = 1 + \sum_{1}^{6} P_q$$

P_q étant la pénalité à retenir selon le critère soit satisfait ou pas.

Tableau IV-2 : La vérification des critères du facteur de sécurtié

Critère P_q	**P_q Suivant X**		**P_q Suivant Y**	
	Observé	**Non-observé**	**Observé**	**Non-observé**
Conditions minimales sur les files de contreventement	O	-	N	0.05
Redondance en plan	N	0.05	N	0.05
Régularité en plan	N	0.05	N	0.05
Régularité en élévation	O	-	O	-
Contrôle de qualité des matériaux	N	0.05	N	0.05
Contrôles de qualité de l'exécution	N	0.1	N	0.1
Total	0.25		0.30	

La valeur du facteur de sécurité diffère selon le sens choisis ;

- Suivant l'axe X : **Q = 1.25**
- Suivant l'axe Y : **Q =1.30**

- **Coefficient de comportement**

Le coefficient de comportement dépend du système de contreventement, il est donné par le tableau 4.3 du RPA. L'ouvrage est en béton armé et contreventé par noyau central, il est donc de catégorie A-3. Le coefficient de comportement correspondant à cette catégorie est **R = 3.5**

- **Le poids de la structure**

Le poids de la structure comprend le poids des charges permanentes ainsi que des charges d'exploitations qui sont multipliée par un coefficient de pondération qui dépend du type d'ouvrage et qui obtenu par le tableau 4.5 du RPA. Le projet étant un bâtiment à usage de bureau, la valeur du coefficient de pondération est de $\beta = 0.20$

Le poids des charges permanentes et d'exploitation sont tirées du logiciel SAP2000, avec W_G = 89 390.1 KN et W_I = 97 102.4 KN.

Le poids total de la structure est donc de **108 810.6 KN.**

- **La période fondamentale**

Selon le cas, il existe plusieurs formules pour estimer la valeur de la période fondamentale. La formule la plus utilisée est la formule empirique :

$$T = C_T H_N^{3/4}$$

Avec :

H_N représente la hauteur du bâtiment, sa valeur est de 34.74 m.

C_T est un coefficient qui dépend du système de contreventement. La structure est contreventée par des voiles en béton armée, elle se trouve donc dans le cas n°04. Selon le tableau 4.6 du RPA la valeur du coefficient C_T qui correspond au cas n°04 est 0.050

Le résultat obtenu avec la formule empirique est de 0.71 s.

Il convient de noter que dans le cas n°04, une autre formule doit être appliquer, la formule 4.7 du RPA, elle donne deux périodes différentes selon la direction de calcul considérer.

$$T = \frac{0.09 \times H_N}{\sqrt{D}}$$

Avec D_x étant la longueur du bâtiment à la base et qui est de 70.70 mètres et D_y étant la largeur qui est de 15.50 mètres.

La période suivant l'axe X est de 0.37 s, suivant l'axe Y elle est de 0.79 s.

La période fondamentale retenue est le minimum entre les résultats obtenus par les deux formules suivant chaque direction, donc :

- Suivant X : T_x = min {0.71 s, 0.37s} ; T_x = 0.37 s.
- Suivant Y : T_y = min {0.71 s, 0.79s} ; T_y = 0.71 s.

- **Les périodes caractéristiques du site**

Les valeurs des périodes caractéristiques dépendent principalement de la nature et la catégorie du sol. Elles sont tirées à partir du tableau 4.7 du règlement.

Tableau IV-3 : Les périodes caractéristiques du site selon RPA93

Site	**S_1**	**S_2**	**S_3**	**S_4**
T_1 (sec)	0.15	0.15	0.15	0.15
T_2 (sec)	0.30	0.40	0.50	0.70

D'après la classification faite dans le chapitre précédent, le sol est de catégorie S3 et donc les périodes caractéristiques T_1 et T_2 sont respectivement **0.15** sec et **0.50** sec.

- **Le pourcentage d'amortissement critique**

Sa valeur est tirée du tableau 4.2 du RPA. Ce paramètre est en fonction du matériau et du système de contreventement. L'ouvrage est contreventé avec des voiles en béton armée, le pourcentage d'amortissement critique est égal à **10%**

- **Facteur de correction d'amortissement**

Il est donné par la formule 4.3 du RPA :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}} \geq 0.70$$

Sa valeur est de : **0.76**

- **Facteur d'amplification moyen**

Ce paramètre est en fonction du facteur de correction d'amortissement, de la période caractéristique du site T_2 et de la période fondamentale T. Le RPA donne trois formules à utiliser selon la valeur de la période fondamentale.

$$D = \begin{cases} 2.5\,\eta & 0 \leq T < T_2 \\ 2.5\,\eta \times (\frac{T_2}{T})^{2/3} & T_2 \leq T < 3.0 \\ 2.5\,\eta \times (\frac{T_2}{3})^{2/3} \times (\frac{3}{T})^{5/3} & T \geq 3.0 \end{cases}$$

Puisqu'il y a deux valeurs différentes des périodes fondamentales, il en est de même pour le facteur d'amplification.

- Suivant l'axe X

La période T_x est nettement inférieure à T_1, la formule à utiliser est donc :

$$D_x = 2.5\,\eta$$

Le facteur d'amplification moyen est égal à **1.90**

- Suivant l'axe Y

La période fondamentale T_y étant nettement inférieur à 3.0 sec et supérieur à T_2, la formule à utiliser est la suivante :

$$D = 2.5\,\eta \times (\frac{T_2}{T})^{2/3}$$

Le facteur d'amplification moyen est égal à **1.50**

- **La force sismique**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$V = \frac{A \times D \times Q}{R} \times W$$

En remplaçant les paramètres par les valeurs obtenues et en appliquant la formule, la valeur de la force sismique est trouvée :

- Suivant l'axe X : **V_x = 18539.4 KN**
- Suivant l'axe Y : **V_y = 15221.8 KN**

- **Tableau récapitulatif**

Tableau IV-4 : Tableau récapitulatif des paramètres calculé

N°	Paramètre	Notation	Justification	Valeur
01	Coefficient d'accélération de zone	A	$\begin{cases} Zone\ III \\ Groupe\ 02 \end{cases}$	0.25
02	Facteur de sécurité	Q_x	4 critères non-observés	1.25
		Q_y	5 critères non-observés	1.30
03	Coefficient de comportement	R	$\begin{cases} Catégorie\ A \\ Système\ 03 \end{cases}$	3.5
04	Le poids de la structure	W	$W = W_G + \beta W_i$	109,284.7 KN
05	La période fondamentale	T_x	$T = \frac{0.09 \times H_N}{\sqrt{D}}$	0.37 s
		T_y	$T = C_T H_N^{3/4}$	0.71 s
06	Périodes caractéristiques du site	T_1 & T_2	Le sol est un S3	$\begin{cases} T1 = 0.15\ s \\ T2 = 0.50\ s \end{cases}$
07	Pourcentage d'amortissement critique	ξ	Voiles en Béton Armé	10%
08	Facteur de correction d'amortissement	η	$\sqrt{\frac{7}{2+\xi}} \geq 0.70$	0.76
09	Facteur d'amplification moyen	D_x	$2.5\ \eta$	1.90
		D_y	$2.5\ \eta \times (\frac{T_2}{T})^{2/3}$	1.50

IV.3. La méthode dynamique

IV.3.1. Introduction du spectre de réponse

Le spectre de réponse est obtenu à travers l'application RPA99, en introduisant les paramètres obtenus lors du calcul de la force sismique à savoir le coefficient d'accélération de zone, le type de site, le facteur de qualité, le coefficient de comportement et l'amortissement. Dans notre cas, le facteur de sécurité choisit est Q_y, afin de tomber dans un cas plus défavorable. L'allure du spectre est présentée dans la figure suivante ;

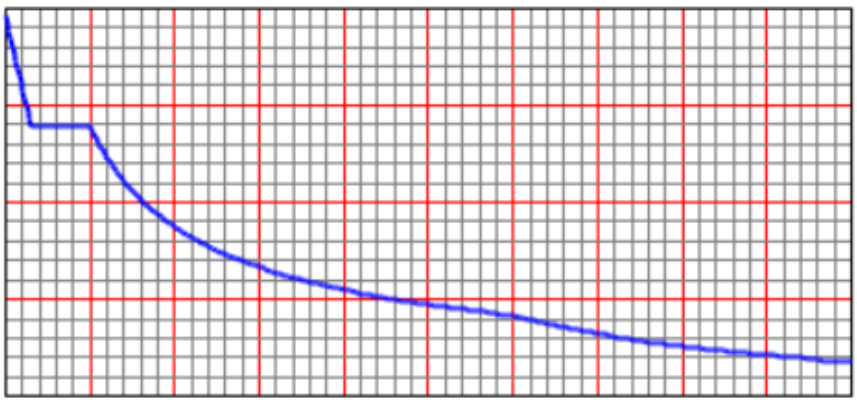


Figure IV-1 : Le spectre de réponse

Tableau IV-5 : résultats de la participation massique sous chargement

Mode	Période	UX	UY	SumUX	SumUY
1	0.68	0.11	0.01	0.11	0.01
2	0.56	0.00	0.67	0.11	0.68
3	0.35	0.63	0.00	0.74	0.68
4	0.22	0.02	0.01	0.76	0.69
5	0.16	0.01	0.14	0.77	0.83
6	0.15	0.00	0.03	0.77	0.86
7	0.13	0.00	0.00	0.77	0.86
8	0.12	0.10	0.00	0.87	0.86
9	0.12	0.00	0.00	0.87	0.86
10	0.12	0.00	0.00	0.87	0.86
11	0.12	0.03	0.00	0.90	0.86
12	0.11	0.00	0.00	0.90	0.86
13	0.11	0.01	0.01	0.91	0.87
14	0.11	0.00	0.00	0.91	0.87
15	0.11	0.00	0.00	0.91	0.87
16	0.11	0.00	0.00	0.91	0.87
17	0.10	0.00	0.00	0.91	0.87
18	0.10	0.00	0.00	0.91	0.87
19	0.10	0.00	0.00	0.91	0.87
20	0.10	0.00	0.00	0.91	0.87
21	0.10	0.00	0.01	0.91	0.88

22	0.10	0.00	0.00	0.91	0.88
23	0.10	0.00	0.00	0.91	0.88
24	0.09	0.00	0.00	0.91	0.88
25	0.09	0.00	0.00	0.91	0.88
26	0.09	0.00	0.00	0.91	0.88
27	0.09	0.00	0.00	0.91	0.88
28	0.09	0.00	0.00	0.91	0.88
29	0.09	0.00	0.00	0.91	0.88
30	0.09	0.00	0.00	0.91	0.88
31	0.09	0.00	0.00	0.91	0.88
32	0.09	0.00	0.00	0.91	0.88
33	0.09	0.00	0.00	0.91	0.88
34	0.09	0.00	0.00	0.91	0.88
35	0.09	0.00	0.00	0.91	0.88
36	0.09	0.00	0.01	0.91	0.89
37	0.09	0.00	0.00	0.91	0.89
38	0.09	0.00	0.00	0.91	0.89
39	0.09	0.00	0.00	0.91	0.89
40	0.09	0.00	0.00	0.91	0.89
41	0.09	0.00	0.00	0.91	0.89
42	0.09	0.00	0.00	0.91	0.89
43	0.09	0.00	0.00	0.91	0.89
44	0.09	0.00	0.00	0.91	0.89
45	0.08	0.00	0.00	0.92	0.89
46	0.08	0.00	0.00	0.92	0.89
47	0.08	0.00	0.00	0.92	0.89
48	0.08	0.01	0.02	0.92	0.91
49	0.08	0.00	0.00	0.92	0.91
50	0.08	0.00	0.00	0.92	0.91

IV.3.2. Interprétation des résultats

- **La masse effective**

La somme des masses modale effective atteint les 90% au bout du :

- 13ème mode suivant le sens X.
- 48ème mode suivant le sens Y.

- **La participation modale**

La participation modale est maximale dans :

- 3ème mode suivant X.
- 2ème mode suivant Y.

- **Le type de mode de vibration observés**
  - Le 1er mode est un mode couplé de torsion.
  - Le 2ème mode est un mode de translation suivant l'axe Y.
  - Le 3ème mode est également un mode de translation, il est en revanche suivant l'axe X.
- **Les caractéristiques dynamiques**
  - La période est de 0.70 sec.
  - La fréquence est de 1.40 HZ

- **La vérification de la période**

Selon l'article 4.2.4.4 du règlement parasismique, la période numérique doit être inférieure à 30% de plus que la période calculée théoriquement, or :

$$T_{NUM} < 1.30 \times T_{TH}$$

Après calcul, il s'est avéré que la période fondamentale numérique ne vérifie pas. Cependant, rien ne peut être conclus avant d'avoir fait la vérification réglementaire de la force sismique. Seulement dans le cas où cette dernière ne serait pas vérifiée que des mesures doivent être prises.

IV.4. Les vérifications réglementaires selon le RPA99 v2003

IV.4.1. La vérification de la force sismique

Selon l'article 4.3.6 du RPA, la résultante des forces sismiques à la base Vt obtenue par combinaison des valeurs modales doit être supérieure à la résultante des forces sismiques déterminés par la méthode statique équivalente.

$$\begin{cases} V_x = \ 15922.735 \text{ KN} \ \geq 14831.5\ KN \\ V_y = \ \ 15739.622 \text{ KN} \ \geq 1277.4\ KN \end{cases}$$

Conclusion : la résultante des forces sismiques à la base Vt obtenue par combinaison des valeurs modales est en effet, supérieure à la résultante des forces sismiques déterminés par la méthode statique équivalente.

IV.4.2. La vérification du déplacement inter-étages.

Tableau IV-6 : La vérification du déplacement inter-étages

Etage	Déplacement X	δ_K selon X	Δ_K selon X	Déplacement Y	δ_K selon Y	Δ_K selon Y
Story8	0.0119	4.17025	0.45465	0.0233	8.1529	1.1123
Story7	0.0106	3.7156	0.55685	0.0201	7.0406	1.25755
Story6	0.0090	3.15875	0.5978	0.0165	5.78305	1.25545
Story5	0.0073	2.56095	0.62475	0.0129	4.5276	1.2285
Story4	0.0055	1.9362	0.61145	0.0094	3.2991	1.14205
Story3	0.0038	1.32475	0.55475	0.0062	2.15705	1.03705
Story2	0.0022	0.77	0.525	0.0032	1.12	0.7651
Story1	0.0007	0.245	0.245	0.0010	0.3549	0.3549

Conclusion : La hauteur la plus petite du bâtiment est de 318 cm et 1% de cette dernière est nettement supérieur à tous les déplacements relatifs.

IV.4.3. La vérification de l'effet P-DELTA

Tableau IV-7 : La vérification de l'effet P-DELTA suivant X

Forces - Analysis	U_x	P_k	Δ	Hk	Θ
S-TOIT	174.605	2374.385	0.455	318	0.019457128
S-ET7	6815.741	29366.537	0.525	396	0.005712205
S-ET6	6815.741	38123.389	0.595	396	0.008404274
S-ET5	9286.178	41930.285	0.595	396	0.006784418
S-ET4	11313.324	54506.486	0.595	396	0.007239019
S-ET3	12959.291	67226.463	0.56	396	0.007335874
S-ET2	14282.554	79945.792	0.455	396	0.006431406
S-ET1	15500.5	96116.884	0.245	396	0.003836409

Tableau IV-8 : La vérification de l'effet P-DELTA suivant Y

Forces - Analysis	U_y	P_k	Delta	H_K	Theta
S-TOIT	198.431	2374.385	1.155	318	0.043460677
S-ET7	7308.266	29366.537	1.33	396	0.013495682
S-ET6	7308.266	38123.389	1.33	396	0.01751998
S-ET5	9780.718	41930.285	1.26	396	0.013640567
S-ET4	11703.237	54506.486	1.19	396	0.013995679
S-ET3	13195.65	67226.463	1.05	396	0.01350839
S-ET2	14327.235	79945.792	0.805	396	0.011343156
S-ET1	15290.368	96116.884	0.42	396	0.006667083

Conclusion : L'effet P-DELTA est vérifié dans les deux directions.

IV.5. Conclusion

Cette étude dynamique prouve que la structure justifie les vérifications préconisées par la réglementation algérienne RPA93/03, ce qui appui sur le fait que l'ouvrage a une bonne structure parasismique.

V.1. Introduction

Les éléments structuraux sont les parties porteuses d'une structure. Ils reprennent tout type d'efforts et les transmettent aux fondations. Ils sont composés en béton armé, car le béton à lui seul ne peut pas résister aux efforts de traction et de cisaillement engendré par les actions accidentelles. Le ferraillage du béton est donc une étape cruciale afin de choisir l'armature nécessaire pour supporter les forces appliqués à la structure. Ce calcul se fait en suivant les règlementations (RPA 99/2003, et BAEL91).

V.2. Le ferraillage des poteaux

Les poteaux sont des éléments qui sont soumis à des efforts de traction, de compression, et aux moments fléchissant, ils seront calculés en flexion composés. Le ferraillage se fera pour le cas le plus défavorable. La structure est composée de 7 sections de poteaux, et pour chaque section, il y aura un ferraillage pour les poteaux libres, et un autre pour les poteaux liés aux voiles, et ceci due à la différence dans leurs comportements.

Les sollicitations seront tirées du logiciel SAP2000, et le ferraillage sera fait avec le logiciel SOCOTEC.

V.2.1. Le ferraillage longitudinal

Les sections d'armatures étant tirés du SOCOTEC, il reste à vérifier les recommandations du RPA et du BAEL :

- BAEL91 modifié 99 :

La section minimale d'armature est égale à 4cm²/ml du périmètre.

- RPA99 version 2003 :
  - Les armatures longitudinales doivent être à haute adhérence droites et sans crochets.
  - Leur pourcentage minimal sera de 0.9 % (zone III).
  - Leur pourcentage maximal sera de 3% en zone courante et de 6% en zone de recouvrement.
  - Le diamètre minimum est de 12 mm.
  - La longueur minimale de recouvrement est de 50 Φ (zone III).
  - La distance entre les barres verticales dans une surface du poteau ne doit pas dépasser 20 cm (zone III).

Tableau V-1 : Choix des barres longitudinales des poteaux

Section	Etat	As	As min RPA	As min BAEL	Choix des barres		St	
					Selon X	Selon Y	X	Y
60x110	Libre	25.37	59.4	13.6	5T20	2T14 8T16	8.6	9.8
	Lié	81.11			6T25	2T25 8T14	8.2	10.1
50x100	Libre	15.11	45	12	4T25	6T20	9.8	9.1
	Lié	45.58						
50x90	Libre	12.8	40.5	11.2	2T16 3T20	6T16	8.7	9.1
	Lié	17.6			2T20 3T16	2T20	9.0	12.3
50x80	Libre	44.4	36	10.4	2T20 3T16	2T20 6T16	8.4	9.1
	Lié	9.5			2T14 3T16	2T14 6T12	9.1	9.1
50x70	Libre	3.41	31.5	9.4	2T12 3T16	7T12	8.7	10.8
	Lié $2^{ème}$ –$3^{ème}$	54.90			2T16 3T20	7T16	8.7	8.8
	Lié $4^{ème}$– $5^{ème}$	53.10					9.2	9.1
	Lié $6^{ème}$ – $7^{ème}$	21.57			5T16	6T16	9.2	9.3
	Lié RDC – 1^{er}	6.45					8.9	9.1
80x40	Lié RDC – 1^{er}	35.95	28.8	9.4	5T20	4T16 2T20	8.9	9.1
	Lié $2^{ème}$ –$3^{ème}$	20.45			3T12 2T16	4T12 2T14	6.8	16.8
	Lié $4^{ème}$– $5^{ème}$	9.02						
	Lié $6^{ème}$ – $7^{ème}$	5.40						

V.2.2. Le ferraillage des armatures transversales

Le diamètre de la section d'armature transversale se calcul suivant la formule BAEL :

$$\Phi_t \leq \min\left(\frac{h}{35}; \frac{b}{10}; \Phi_l\right)$$

Les espacements soient :

La section d'armatures transversales se calcul selon la formule RPA :

$$\frac{A_t}{t} = \frac{\rho_a \times V_u}{h_1 \times f_e}$$

Et la quantité minimale d'armatures se vérifie comme suit :

$$\frac{A_t}{t \times b_1} = \begin{cases} 0.3\% & \text{si } \lambda_g \leq 5 \\ 0.8\% & \text{si } \lambda_g > 3 \end{cases}$$

Le RPA recommande les espacements suivants selon la zone sismique et selon la position dans le poteau :

- En zone nodale :

$$\begin{cases} t \leq \min(10\Phi l\,, 15cm) & en\ zone\ I\ et\ II-a \\ t \leq 10\ cm & en\ zone\ \ II-b\ et\ III \end{cases}$$

- En zone courante

$$\begin{cases} t \leq 15\Phi l & en\ zone\ I\ et\ II-a \\ t \leq min\left(\frac{b}{2}, \frac{h}{2}, 10\Phi l\right) & en\ zone\ \ II-b\ et\ III \end{cases}$$

Tableau V-2 : La section transversale selon le BAEL

Section	Φt Retenu	St mécanique	St2 (cm)	St3 (cm)	St retenu (cm)
60x110	8	-0.37	40	62.5	40
	8	-1.06	40	62.5	40
50x100	8	-1.59	40	75	40
	8	-0.44	40	75	40
50x90	8	-4.47	40	75	40
	8	-0.41	40	75	40
50x80	8	1.25	40	75	40
	8	-0.44	40	75	40
80x40	8	-1.56	40	93.75	40
	8	-1.08	40	93.75	40
	8	-6.55	40	93.75	40
	8	-4.20	40	93.75	40
50x70	8	-0.37	40	75	40
	8	-1.35	40	75	40
	8	4.64	40	75	40
	8	-0.53	40	75	40
	8	-0.49	40	75	40

Tableau V-3: La section transversale minimale selon le RPA

Section	Type	L	VU	Landag	Rho A	At nodal	At courant	At min RPA
60x110	Lié	3.81	123.2	4.45	3.75	0.84	1.26	2.70
	Libre	3.81	354.7	2.42	3.75	2.42	3.63	4.80
50x100	Lié	3.96	288	2.77	3.75	2.16	3.24	4.00
	Libre	3.96	85.8	2.77	3.75	0.64	0.97	4.00
50x90	Lié	3.96	303.6	3.08	3.75	2.53	3.79	4.00
	Libre	3.96	58.2	5.54	2.5	0.32	0.49	1.50
50x80	Lié	3.96	369.6	3.46	3.75	3.47	5.20	3.40
	Libre	3.96	69.2	5.54	2.5	0.43	0.65	1.50
80x40	RDC – 1er	3.81	170.9	3.33	3.75	1.60	2.40	2.84
	2ème –3ème	3.96	142.9	3.46	3.75	1.34	2.01	2.72
	4ème– 5^{èm}	3.96	218.4	3.46	3.75	2.05	3.00	2.72
	6ème – 7ème	3.96	210.1	3.46	3.75	1.97	2.96	2.72
50x70	Libre	3.18	24.4	4.45	3.75	0.26	0.39	2.25
	RDC – 1er	3.81	192.3	3.81	3.75	2.06	3.00	3.00
	2ème –3ème	3.96	273.5	5.54	2.5	1.95	2.93	1.50
	4ème– 5ème	3.96	95.3	5.54	2.5	0.68	1.02	1.50
	6ème – 7ème	3.96	80.7	5.54	2.5	0.58	0.86	1.50

Tableau V-4 : Le choix des armatures transversales

Section	Type	At retenu	Choix des barres	St (cm)	
				Nodal	Courant
60x110	Lié	2.70	4T10	10	15
	Libre	4.80	6T10	10	15
50x100	Lié	4.00	6T10	10	15
	Libre	4.00	6T10	10	15
50x90	Lié	4.00	6T10	10	15
	Libre	1.50	4T10	10	15
50x80	Lié	5.20	4T10	10	15
	Libre	1.50	4T10	10	15
80x40	RDC – 1er	2.84	4T10	10	15
	2ème –3ème	2.72	4T10	10	15
	4ème– 5^{èm}	3.00	4T10	10	15
	6ème – 7ème	2.96	4T10	10	15
50x70	Libre	2.25	4T10	10	15
	RDC – 1er	3.00	4T10	10	15
	2ème –3ème	2.93	4T10	10	15
	4ème– 5ème	1.50	4T10	10	15
	6ème – 7ème	1.50	4T10	10	15

V.2.3. Les vérifications

- Vérification sollicitations normales

Dans le but d'éviter une rupture fragile, l'effort normal est calculé est doit être inférieur à une valeur déterminer par le RPA :

$$\nu = \frac{N_d}{B_c \times F_{c28}} \leq 0.30$$

Tableau V-5 : Les vérifications de l'effort normal réduit

Section	Type	Nd	Nrd	Observation
60x110	Lié	-1526.66	-0.07	Observée
	Libre	4055.50	0.18	Observée
50x100	Lié	712.79	0.04	Observée
	Libre	2278.72	0.13	Observée
50x90	Lié	415.04	0.03	Observée
	Libre	871.30	0.06	Observée
50x80	Lié	96.12	0.01	Observée
	Libre	325.88	0.03	Observée
80x40	RDC – 1er	-750.99	-0.05	Observée
	2ème –3ème	36.05	0.00	Observée
	4ème– 5^{èm}	1022.43	0.09	Observée
	6ème – 7ème	433.99	0.03	Observée
50x70	Libre	1847.77	0.16	Observée
	RDC – 1er	2745.04	0.22	Observée
	2ème –3ème	2655.24	0.22	Observée
	4ème– 5ème	605.48	0.05	Observée
	6ème – 7ème	32.58	0.00	Observée

- Vérification sollicitations tangentes

Tableau V-6 : Vérification des sollicitations tangentes selon le RPA

Section	Type	VU	Tau	Rho D	Tau Bu	Observations
60x110	Lié	123.16	0.21	0.04	1.40	Vérifiée
	Libre	354.72	0.60	0.08	1.40	Vérifiée
50x100	Lié	288.06	0.64	0.04	1.40	Vérifiée
	Libre	85.79	0.19	0.04	1.40	Vérifiée
50x90	Lié	303.57	0.75	0.04	1.40	Vérifiée
	Libre	58.23	0.14	0.08	2.63	Vérifiée
50x80	Lié	369.63	1.03	0.04	1.40	Vérifiée
	Libre	69.22	0.19	0.04	2.63	Vérifiée
80x40	RDC – 1er	170.87	0.59	0.04	1.40	Vérifiée
	2ème –3ème	142.95	0.50	0.08	1.40	Vérifiée
	4ème– 5^{èm}	218.43	0.76	0.08	1.40	Vérifiée
	6ème – 7ème	210.14	0.73	0.08	1.40	Vérifiée
50x70	Libre	24.36	0.08	0.04	1.40	Vérifiée
	RDC – 1er	192.32	0.61	0.04	1.40	Vérifiée
	2ème –3ème	273.47	0.87	0.04	2.63	Vérifiée
	4ème– 5ème	95.28	0.30	0.04	2.63	Vérifiée
	6ème – 7ème	80.70	0.26	0.04	2.63	Vérifiée

Tableau V-7 : Vérification des sollicitations tangentes selon le BAEL

Section	Type	VU	Tau	Tau adm (m)	Observations
60x110	Lié	123.16	207.34	5000	Vérifiée
	Libre	354.71	597.16	5000	Vérifiée
50x100	Lié	288.06	640.13	5000	Vérifiée
	Libre	85.79	190.65	5000	Vérifiée
50x90	Lié	303.57	749.56	5000	Vérifiée
	Libre	58.23	143.78	5000	Vérifiée
50x80	Lié	369.63	1026.75	5000	Vérifiée
	Libre	69.21	192.27	5000	Vérifiée
80x40	RDC – 1er	170.87	593.31	5000	Vérifiée
	2ème –3ème	142.95	496.35	5000	Vérifiée
	4ème– 5^{èm}	218.43	758.44	5000	Vérifiée
	6ème – 7ème	210.13	729.64	5000	Vérifiée
50x70	Libre	24.35	77.32	5000	Vérifiée
	RDC – 1er	192.31	610.53	5000	Vérifiée
	2ème –3ème	273.46	868.15	5000	Vérifiée
	4ème– 5ème	95.28	302.48	5000	Vérifiée
	6ème – 7ème	80.70	256.19	5000	Vérifiée

V.2.4. Schéma d'un poteau

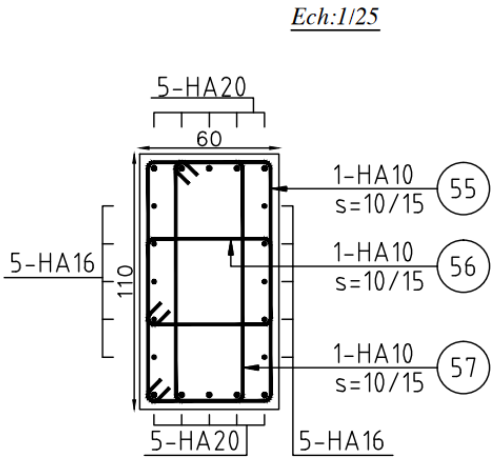


Figure V-1 : le schéma de ferraillage du poteau libre 60x110

V.3. Le ferraillage des poutres

Les poutres sont des éléments qui sont soumis à des moments fléchissant, ils seront calculés en flexion simple. Le ferraillage se fera pour le cas le plus défavorable. La structure est composée de 5 sections de poutres.

Les sollicitations seront tirées du logiciel SAP2000, et le ferraillage sera fait avec le logiciel SOCOTEC.

V.3.1. Le ferraillage longitudinal

Les sections d'armatures étant tirés du SOCOTEC, il reste à vérifier les recommandations du RPA :

Le pourcentage total minimum des aciers longitudinaux sur toute la longueur de la poutre est de 0,5% en toute section.

Le pourcentage total maximum des aciers longitudinaux est de :

- 4% en zone courante
- 6% en zone de recouvrement

Les poutres supportant de faibles charges verticales et sollicitées principalement par les forces latérales sismiques doivent avoir des armatures symétriques avec une section en travée au moins égale à la moitié de la section sur appui.

La longueur minimale de recouvrement est de : 50 Φ en zone III.

Tableau V-8 : Choix des armatures longitudinales des poutres

La section	Position	As	As min RPA	As CNF	Choix des barres	Espacement
30x40	Sur appui	6.3	6	1.49	3T12 2T14	10.2
	Mi-travée	3.1				
30x60	Sur appui	13.01	9	2.24	3T25	9.0
	Mi-travée	6.1			3T20	9.3
30x100	Sur appui	10.5	15	3.73	3T16 2T25	9.6
	Mi-travée	4.8				
40x40	Sur appui	7.4	8	2.00	4T16	9.2
	Mi-travée	3.9				
80x40	Sur appui	17.9	16	3.97	6T20	12.4
	Mi-travée	10.5				

V.3.2. Le ferraillage transversal

- Selon le BAEL

Le diamètre de la section d'armature transversale se calcul suivant la formule BAEL :

$$\Phi_t \leq \min\left(\frac{h}{35}; \frac{b}{10}; \Phi_l\right)$$

- L'espacement mécaniquement nécessaire :

En considérant les cadres droits et un bétonnage avec reprise :

St≤11.77cm Soit St1=10cm o

- Dispositions constructives :

L'espacement des cours d'armatures transversal art.A.5.1,22 du BAEL :

St ≤ min (0.9d, 40cm)

- L'espacement minimale

Il est calculé selon la formule suivante :

$$St \leq \frac{At \times Fe}{0.4 \times b_0}$$

Tableau V-9 : La section transversale selon RPA

La section	Position	Φt Retenu	St mécanique	St2 (cm)	St3 (cm)	St retenu (cm)
30x40	Sur appui	10	-0.37	40	197.50	40
	Mi-travée	10	-1.06	40	131.67	40
30x60	Sur appui	10	-1.59	40	131.67	40
	Mi-travée	10	-0.44	40	98.75	40
30x100	Sur appui	10	-4.47	40	49.38	40
	Mi-travée	10	-0.41	40	197.50	40
40x40	Sur appui	10	1.25	40	197.50	40
	Mi-travée	10	-0.44	40	197.50	40
80x40	Sur appui	10	-1.56	40	148.13	40
	Mi-travée	10	-1.08	40	74.06	40

- Selon les règles du RPA :

La section d'armatures transversales est donnée par le règlement selon la formule suivante :

$$At = 0.003 \times s \times b$$

L'espacement maximal est trouvé selon la zone :

- Zone nodale $St \leq \min\left(\frac{h}{4}, 12\Phi\right)$
- Zone courante $St \leq \frac{h}{2}$

Tableau V-10 : Section transversale selon BAEL

La section	Position	S	S retenu	At
30x40	Sur appui	10.00	10	0.90
	Mi-travée	20.00	20	1.80
30x60	Sur appui	15.00	10	0.90
	Mi-travée	30.00	20	1.80
30x100	Sur appui	19.20	10	0.90
	Mi-travée	50.00	20	1.80
40x40	Sur appui	10.00	10	1.20
	Mi-travée	20.00	20	2.40
80x40	Sur appui	10.00	10	2.40
	Mi-travée	20.00	20	1.80

Tableau V-11 : Le choix des armatures transversales

La section	Position	At retenu	Choix des barres	St (cm)	
				Nodal	Courant
30x40	Sur appui	2	4T10	10	20
	Mi-travée	2	4T10	10	20
30x60	Sur appui	2	4T10	10	20
	Mi-travée	2	4T10	10	20
30x100	Sur appui	2	4T10	10	20
	Mi-travée	2	4T10	10	20
40x40	Sur appui	3.16	4T10	10	20
	Mi-travée	3.16	4T10	10	20
80x40	Sur appui	3.16	6T10	10	20
	Mi-travée	3.16	6T10	10	20

V.3.3. Les vérifications

- **Vérification des contraintes tangentielles**

Tableau V-12 : Vérification des contraintes tangentielles

La section	VU	Tau	Tau adm (m)	Observations
30x40	109.25	1011.61	5000	Vérifiée
30x60	170.78	1054.17	5000	Vérifiée
30x100	216.32	801.17	5000	Vérifiée
40x40	112.83	783.56	5000	Vérifiée
80x40	389.19	1351.35	5000	Vérifiée
	281.77	978.37	5000	Vérifiée

V.3.4. Le recouvrement

La longueur minimale de recouvrement est de 50Φ en zone III :

Φ = 2.5 cm

L =2.5 *x* 50 = 125 cm

V.3.5. Le schéma de ferraillage

Voici le schéma de ferraillage de la poutre 80x40 :

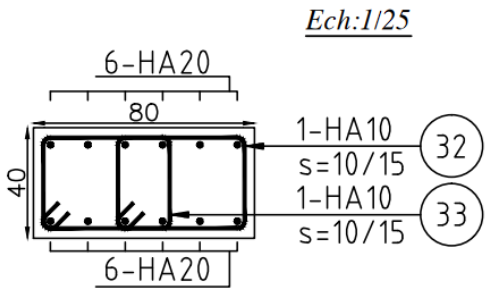


Figure V-2 : : Schème de ferraillage de la poutre 80 x 40

V.4. Le ferraillage des voiles

La structure étant contreventée par un noyau central, les voiles du noyau ont un comportement différent des voiles libres.

En effet, quand le noyau est sollicité par les forces sismiques, ses voiles se déplacent tous ensembles, et l'effet sismique divise le noyau en deux parties en forme U ; une partie qui subit la compression et l'autre la traction, et vice-versa.

En prenant cette notion en compte, le ferraillage va se faire sur la section la plus sollicitée qui se trouve au rez-de-chaussée et particulièrement sur un voile libre et deux faces du noyau sachant qu'il en est de même pour les deux autres faces.

Les sollicitations engendrées dans les voiles sont :

- Moments fléchissant et efforts tranchants provoqués par l'action sismique.
- Effort normal dû à la combinaison des charges permanentes et d'exploitation.

En revanche, l'effet de l'action sismique étant bien plus important, les sollicitations tirées du SAP200 proviennent des combinaisons sismiques.

Ainsi les voiles seront calculées en flexion composée et au cisaillement, ce qui nécessite la disposition du ferraillage suivante :

- Des aciers verticaux.
- Des aciers horizontaux.

L'approche faite est de diviser le voile en un certain nombre de zones selon les forces de tractions, prendre la résultante, et calculer la section d'armature en utilisant SOCOTEC. La division se fera comme suit :

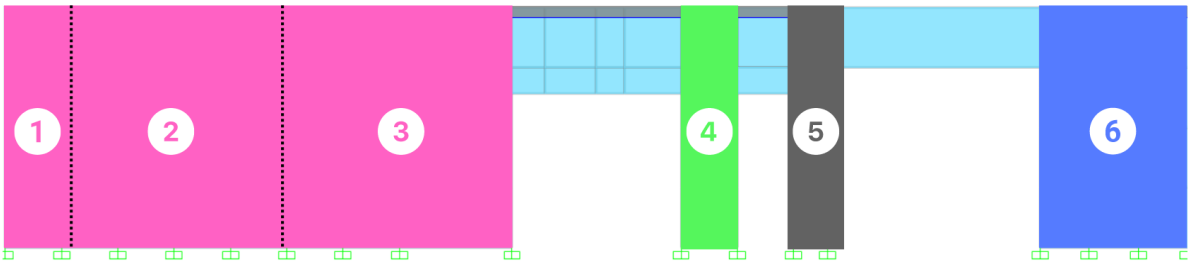


Figure V-3 : Les zones du voile 1

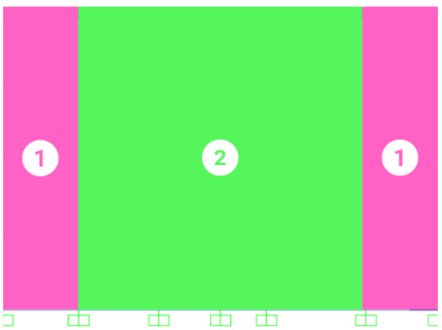


Figure V-4 : Les zone des voiles 2 et 3

- Le pourcentage minimum d'armatures verticales et horizontales doit être respecté comme suit :
- 0,15 % globalement dans la section du voile.
- 0,10 % en zone courante.
- L'espacement des barres horizontales et verticales doit être inférieur au minimum entre 1,5 de l'épaisseur du voile et 30 cm, dans ce cas, il doit être inférieur à 30 cm.

Le diamètre des barres verticales et horizontales des voiles (à l'exception des zones d'about) ne doit pas dépasser 1/10 de l'épaisseur du voile, donc le diamètre maximal est celui des barres de T25.

V.4.1. Les aciers verticaux

Tableau V-13 : : Choix des barres des aciers verticaux des voiles

Section	**Type**	**Force**	**As 2 nappes**	**As min**	**Choix des barres**		**St**	
					Par zone	Total	Zone Nodal	Zone courante
Voile 1 Noyau Y = 9.25 m	Zone I	1530	30.6	5.4	10T20	104T20	10	24
	Zone II	4500	90	21.6	30T20			
	Zone III	5400	106	21.6	56T16			
	Zone IV	17565	35.10	5.4	12T20			
	Zone V	960	19.60	3	8T20			
	Zone VI	1280	25.40	4.80	20T20			
Voile 2 Noyau X = 35.1 m	Zone I	1377.5	27.54	5.7	10T20	40T20	12	24
	Zone II	1305	26.1	5.4	10T20			
	Zone III	2520	50.4	21.6	20T20			
Voile 3 Libre X = 40.5 m	Zone I	1377.5	27.54	5.7	10T20	28T20	15	25
	Zone II	1305	26.1	5.4	10T20			
	Zone III	800	16.2	6	20T14			

V.4.2. Les aciers horizontaux

Tableau V-14 : Choix des barres des aciers horizontaux des voiles

Section	Force	As	As min RPA	Choix des barres	St
Voile 1 **Y = 9.25 m**	612.5	12.26	35.46	40T16	18
Voile 2 **Y = 35.1 m**	950	19	17.15	40T12	18
Voile 3 **Y = 40.5 m**	228	4.56	17.12	40T12	18

V.4.3. Le schéma d'un voile

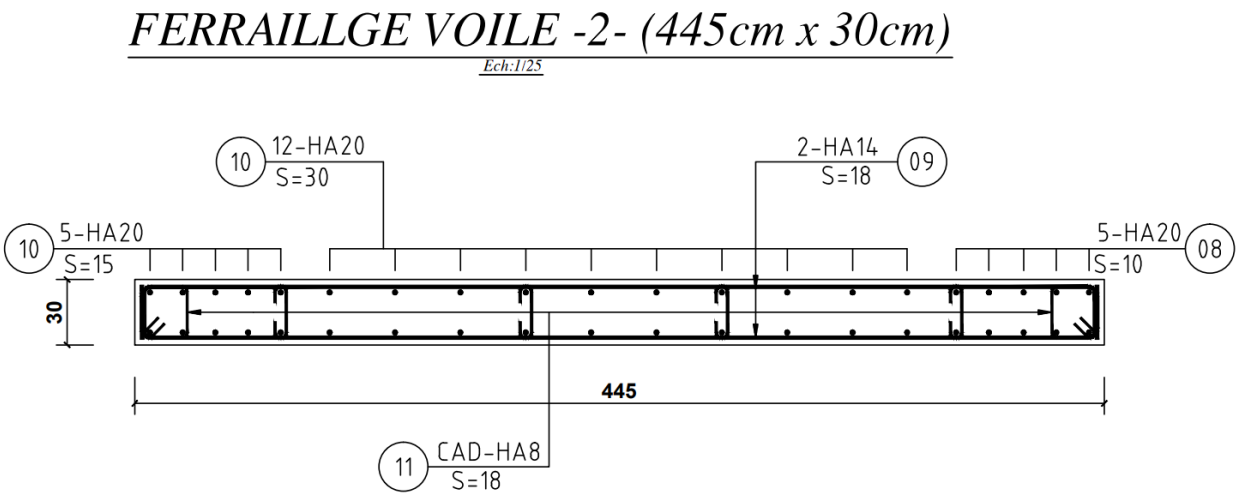


Figure V-5 : Le schéma de ferraillage du voile N°02

V.5. Ferraillage des dalles

La structure est composée de dalles avec trois épaisseurs. Le ferraillage se fera pour la dalle le plus sollicité sous la combinaison ELU, et les sections d'aciers sont obtenue avec SOCOTEC.

La section minimale est calculée selon le BAEL comme suit :

$$a_{x,min} = a_{y,min} \times \frac{3-\alpha}{2}$$

Avec :

$$\begin{cases} a_{y,min} = 6 \times h \\ \alpha = \frac{L_x}{L_y} \end{cases}$$

H : l'épaisseur de la dalle.

$L_x \; et \; L_y$: la longueur et largeur de la dalle.

- Le choix des barres horizontales

Tableau V-15 : Le choix des barres horizontales de la dalle 8.1x6.9

	Sur Appui	**Mi-travée**
Moment	-30	41
As	3.56	4.9
As min	2.73	2.73
Choix des barres	7T12	7T12

- Le choix des barres verticales

Tableau V-16 : Le choix des barres verticales de la dalle 8.1x6.9

	Sur Appui	**Mi-travée**
Moment	-25	45
As	3	5.4
As min	2.73	2.73
Choix des barres	7T12	7T12

V.5.1. Schéma de la dalle

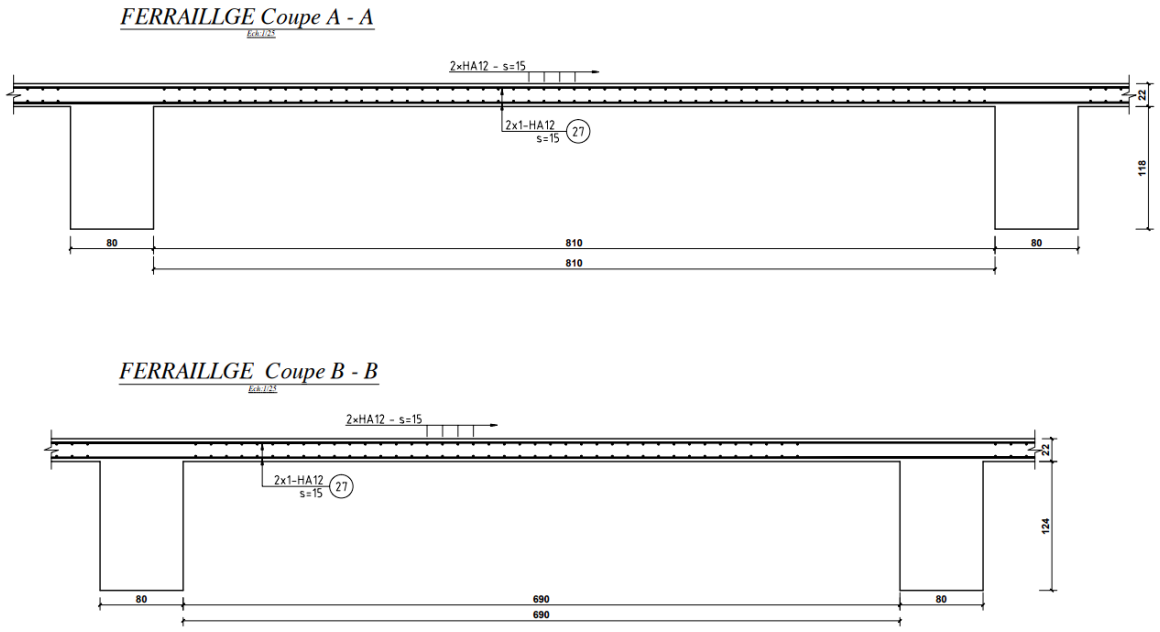


Figure V-6 : Schéma de ferraillage de la dalle 8.1x6.9

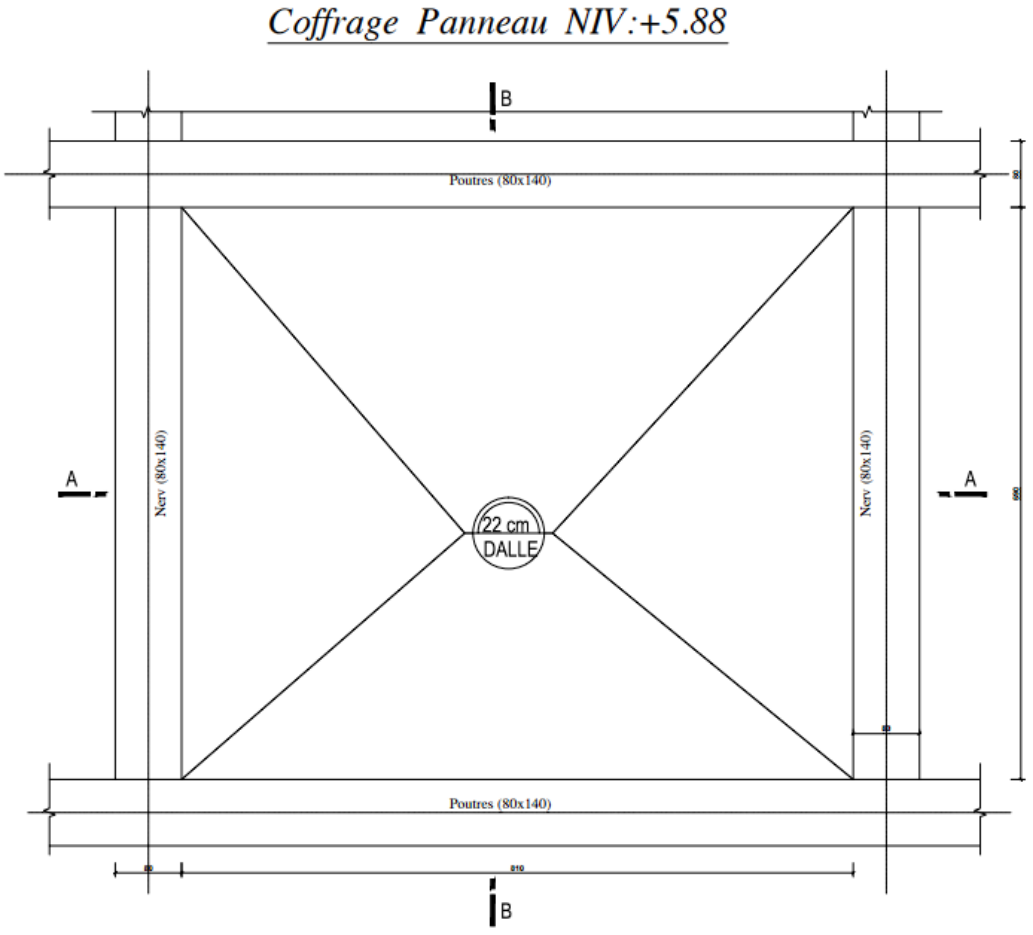


Figure V-7 : Vue en plan de la dalle 8.1x

VI.1. Introduction

L'efficacité d'un SHM repose sur la sensibilité des données acquises qui se fait à l'aide des capteurs et qui dépend de leurs dispositions dans la structure.

Les capteurs permettent d'obtenir les caractéristiques dynamiques de la structure, ce qui indique l'existence ou pas d'un endommagement. Leurs nombres et leur emplacement est cruciale puisqu'ils doivent être choisi de manière optimale, c'est-à-dire des endroits stratégiques pour capturer toutes les données nécessaires à la détection des endommagements et la surveillance de la structure, mais aussi un nombre qui soit économique.

Les capteurs permettent d'obtenir les caractéristiques dynamiques de la structure et toutes données nécessaires à la détection des endommagements et la surveillance de la structure, il est donc important de faire un choix optimal des capteurs. Le choix optimal des capteurs est défini comme une configuration de capteurs qui permet de minimiser les coûts et maximiser l'information, et ceci tout en respectant les critères prédéfinis.

Une configuration optimale peut minimiser le nombre de capteurs nécessaires, augmenter la précision et fournir une base de données robuste. Cela dit, ceci présente l'un des challenges majeurs du SHM étant donné le nombre important de joints, d'éléments et de DDLs que possède les structures. De nombreuses études ont été menées afin de déterminer le nombre optimal des capteurs [23] mais aussi leur emplacement optimal [24] qui mènera à une détection précise de potentiels dommages qui pourront se produire [25]

Il existe plusieurs méthodes développées pour trouver l'emplacement optimal des capteurs, mais elles peuvent être rassemblé en trois types de méthodes, à savoir les méthodes de placement séquentiel des capteurs (Sequential Sensor Placement), les méthodes de recherche exhaustive, et les méthodes d'optimisation stochastique.

Les méthodes stochastiques sont les plus adéquates, et parmi elles, la méthode des algorithmes génétiques est la plus proéminente, et c'est cette méthode qui sera utilisée dans ce chapitre pour l'optimisation des capteurs. [26]

VI.2. Hypothèse de travail

Les hypothèses suivantes sont concernant la structure sont considéré pour l'optimisation des capteurs :

- La structure est linéaire :

La réponse de la structure à une combinaison de forces appliquées simultanément est la somme des réponses à chaque force prise individuellement. Or, la linéarité est une caractéristique du modèle élastique, la structure a donc un comportement élastique.

- La structure est modélisable :

Ceci veut dire qu'une quantité suffisante d'informations est disponible durant l'identification en mesurant tous les degrés de libertés pertinents.

- Un nombre limite de mode

Il y a autant de modes propres que de degré de libertés, et dans les ouvrages génie civil, il y a une infinité de degré de libertés, il est donc impossible de tous les considérer. Le nombre de modes doit être représentatif de la réponse de la structure, dans le cas ici présent, sachant que le pourcentage de participation massique a atteint les 90% suivant les deux axes dans 48ème mode, le nombre a été fixé à 50.

- Degrés de libertés

Le nombre de degrés de libertés est choisi en fonction du type de structure, type de charges, et des capteurs utilisés. Pour des ouvrages complexes qui sont soumis à de la torsion ou des moments de flexion, il est important de prendre en compte 6 degrés de libertés. Cependant, dans ce cas particulier, l'ouvrage est supposé avoir un comportement élastique, et les capteurs utilisés travaillent uniquement en translation, pour cela le nombre est fixé à 3 degrés de liberté.

VI.3. L'algorithme génétique

VI.3.1. Définition d'un algorithme génétique

Les algorithmes génétiques représentent des techniques de recherche adaptatives et d'optimisation basées sur les principes de l'évolution naturelle, où les espèces qui ne s'adaptent pas à leur environnement risquent l'extinction par la sélection naturelle. [27] Pour mieux comprendre le fonctionnement d'un algorithme génétique, il faut se familiariser avec la terminologie :

- **Population** : La population est le sous-ensemble de toutes les solutions possibles ou probables, qui peuvent résoudre le problème donné.
- **Chromosomes** : Un chromosome est l'une des solutions de la population pour le problème donné, et la collection de gènes génère un chromosome.
- **Gène** : Un chromosome est divisé en différents gènes, ou c'est un élément du chromosome.
- **Allèle** : L'allèle est la valeur attribuée au gène dans un chromosome particulier.
- **Fonction de Fitness** : La fonction de fitness est utilisée pour évaluer les individus à la fin de chaque itération.
- **Opérateurs Génétiques** : opérateurs génétiques jouent un rôle dans le changement de la composition génétique de la génération suivante. Deux opérateurs peuvent être utilisés : le croisement et la mutation.

Les algorithmes génétiques traduisent le problème sous forme d'une population d'individus générés aléatoirement, et cherchent les individus qui correspondent le mieux aux conditions en produisant itérativement des générations ; ceux qui ne sont pas adaptés sont éliminés.

Les algorithmes génétiques font évoluer une population d'individus initiaux vers une population d'individus de haute qualité, où chaque individu représente une solution du problème à résoudre. La qualité de chaque solution est mesurée par une fonction de fitness, qui représente quantitativement l'adaptation de chaque individu à un environnement donné [28].

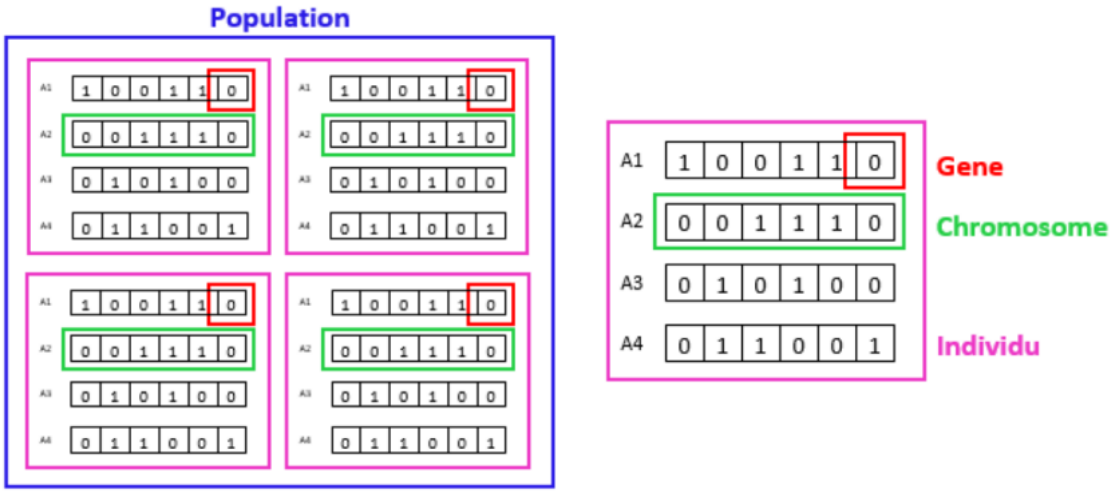


Figure VI-1 : Illustration des composantes d'un algorithme génétique

VI.3.2. Processus d'un Algorithme Génétique

- **Initialisation**

Le processus d'un algorithme génétique commence par la génération d'un ensemble d'individus, appelé population. L'une des techniques les plus populaires pour l'initialisation est l'utilisation de chaînes binaires aléatoires.

Voici un exemple pour mieux expliquer ; une population de 4 individus, avec 5 gènes chacun :

$$\text{Population} = \begin{bmatrix} [0,1,3,1,7] \\ [1,4,1,2,1] \\ [1,5,6,1,8] \\ [3,1,1,0,9] \end{bmatrix}$$

- **Évaluation**

Pour déterminer l'adaptation de l'individu, une fonction fitness est attribuée à chacun d'entre eux. La fonction de fitness guide la précision de l'algorithme génétique vers la solution optimale. La fonction quantifie la qualité et l'adéquation d'une solution individuelle au sein d'une population. Un score de fitness est attribué à chaque solution potentielle en fonction de sa capacité à satisfaire les objectifs et les contraintes du problème d'optimisation.

Le score de fitness détermine si l'individu sera sélectionné pour la reproduction, plus il est élevé, plus les chances d'être sélectionné sont grandes.

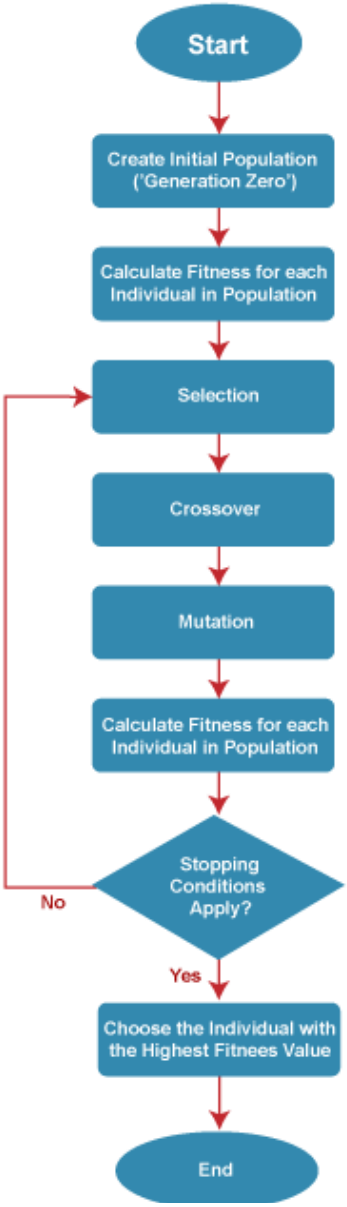


Figure VI-2 : Processus d'un AG

- **Sélection**

La phase de sélection implique la sélection des individus pour la reproduction des descendants. Tous les individus sélectionnés sont ensuite organisés par paires pour augmenter la reproduction. Ensuite, ces individus transfèrent leurs gènes à la génération suivante.

Les deux meilleurs parents sont supposés être les deux suivant : $[0, 1, 3, 1, 7]$ & $[1, 5, 6, 1, 8]$.

- **La reproduction**

Deux opérateurs peuvent être dans cette étape pour produire un individu de la nouvelle génération :

- **Croisement (Crossover)**

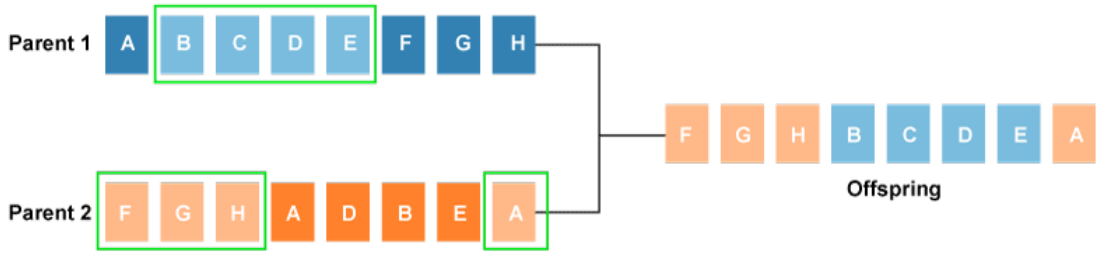


Figure VI-3 :Illustration d'un croisement

Dans ce processus, un point de croisement est sélectionné au hasard parmi les gènes. Ensuite, l'opérateur de croisement échange des informations génétiques entre deux parents de la génération actuelle pour produire un individu de la nouvelle génération. Les gènes des parents sont échangés entre eux jusqu'à ce que le point de croisement soit atteint. Ces nouveaux descendants sont ajoutés à la population. Il existe plusieurs manières d'effectuer le croisement :

- Croisement à un point
- Croisement à deux points
- Croisement uniforme
- Croisement basé sur des algorithmes héritable

Exemple : en utilisant la méthode de croisement en un point (point de croisement = 02) :

- Enfant 01 : $[0, 1, 6, 1, 8]$
- Enfant 02 : $[1, 5, 3, 1, 7]$

- **Mutation**

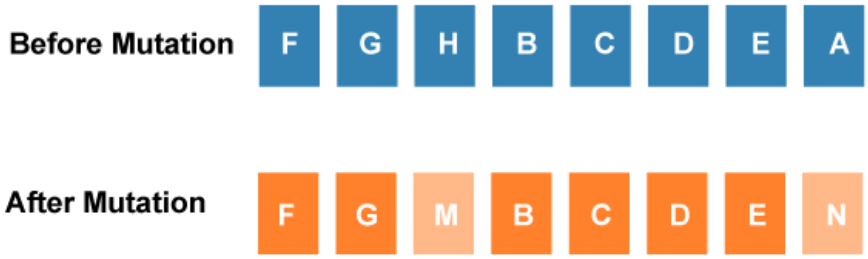


Figure VI-4 : Illustration d'une mutation

L'opérateur de mutation insère des gènes aléatoires dans la progéniture (nouvel individu) pour maintenir la diversité dans la population. Cela peut se faire en inversant certains bits dans les chromosomes. La mutation aide à résoudre le problème de convergence prématurée et améliore la diversification. Les types de mutation disponibles sont :

- Mutation par inversion de bits
- Mutation gaussienne
- Mutation par échange/inversion

Exemple :

- Enfant 01 : $[0, 1, 2, 1, 8]$
- Enfant 02 : $[4, 5, 3, 1, 7]$

- **Fin**

Ce processus est itératif et il continue jusqu'à ce qu'il atteigne le critère d'arrêt prédéfini par l'utilisateur (un nombre d'itérations, un nombre…etc), et il sera jugé comme la solution finale de toute la population.

$$\text{Nouvelle population} = \begin{bmatrix} [0, 1, 3, 1, 7] \\ [1, 5, 6, 1, 8] \\ [0, 1, 2, 1, 8] \\ [4, 5, 3, 1, 7] \end{bmatrix}$$

VI.3.3. Fonctions objectives

Les fonctions objectives sont des outils analytiques qui servent à évaluer les individus, selon un critère spécifique, représentée sous forme de formule mathématique, elles évaluent les chromosomes et donnent comme résultat une valeur qui détermine la qualité du chromosome. Le but de ces fonctions est d'optimiser et raffiner la population. Une ou plusieurs fonctions peuvent être utilisées dans l'algorithme, parmi elles : Fisher Information Matrix (FIM), Effective Information (EI), Modal Assurance Criterion (MAC), … etc [26]. La fonction objective utilisée est le MAC.

- **Modal Assurance Criterion MAC**

Le MAC est un indicateur statistique qui, contrairement à d'autres fonctions objectives, est utilisé spécialement dans l'analyse modale pour comparer les formes modales. Sa valeur est

entre 0 et 1, avec 0 signifiant que les modes sont très différents et 1 signifiant qu'ils sont identiques, et s'ils ont une relation linéaire, la valeur sera très proche de 1, et vice-versa. L'équation du MAC représente la corrélation entre deux vecteurs modaux :

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

C'est un outil utile pour évaluer la qualité de l'identification modale réalisée ou pour corréler les résultats entre différents tests modaux, cependant, comme les estimations des paramètres modaux, le MAC a des incertitudes.

Le résultat obtenu par le MAC est introduit dans la fonction fitness pour la dernière phase de l'itération.

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

VI.3.4. L'application sur le model

L'algorithme génétique sera utilisé pour l'optimisation du nombre et de l'emplacement de capteurs, il est initialisé comme suit :

- **Un gène :** représente le degré de liberté d'un point donné, qui accueillera le capteur, ou son emplacement.
- **Le chromosome :** c'est les coordonnés du capteur.
- **Un individu :** c'est la configuration des capteurs.
- **La génération :** représente une itération de l'algorithme.

Le fonctionnement de l'algorithme se fait comme suit :

- **Initialisation**

La population initiale est de 100, et le nombre de gène qui est le nombre possible de capteurs est de 11773. Le nombre de mode est également défini et doit être le même que celui du logiciel SAP2000. Le nombre de degrés de liberté est fixé à 3.

```
n_generations = 100
FEM_path = 'Model_faderco.sdb'
original_group_name = 'POSSIBLE SENSORS'
group_name = 'SENSORS'
population_size = 100
n_modes = 50
dof = 3
```

Figure VI-5 : L'initialisation du code Python

- **Préparation du modèle avant l'algorithme génétique**

Après avoir définit les hauteurs des étages, il lance l'analyse et attribue les modes propres aux points sélectionner. Par la suite il prépare les données et les enregistre dans un fichier csv pour l'algorithme génétique.

Il créer ensuite la fonction objective (MAC) et la fonction de fitness :

```
def MAC(phi_A, phi_B):···

def fitness_func(solution, solution_idx):···
```

Figure VI-6: Définition des fonctions MAC et de fitness

- **Evaluation de la population et sélection des parents**

Chaque individu est évalué avec la fonction fitness et le MAC, et un classement des individus est fait, en allant du meilleur au pire. Les meilleurs individus sont sélectionnés pour se reproduire. Dans ce cas, 10 individus sont sélectionnés pour la multiplication.

```
num_parents_mating = 10
sol_per_pop = 10
num_genes = NumberItems
init_range_low = 0
init_range_high = NumberItems
parent_selection_type = "sss"
keep_parents = 1
crossover_type = "single_point"
mutation_type = "random"
mutation_percent_genes = 20
```

Figure VI-7 : Evaluation de la population et sélection des parents

- **Croisement**

Les gènes des parents sont combinés pour créer de nouveaux individus, le type de croisement choisi est single point.

- **Mutation**

Les nouveaux enfants peuvent subir des mutations pour introduire de la diversité. La mutation est aléatoire dans le cas ci-présent.

- **Fonction objective**

Après que la reproduction soit terminée, les nouveaux individus passent par le MAC ainsi que la fonction fitness pour les évaluer. Ainsi, un classement est fait, à partir duquel une nouvelle population est formée.

- **Nouvelle population**

Les nouveaux enfants remplacent les anciens individus les moins performants, ou une nouvelle population est formée en combinant parents et enfants. Un seul parent est gardé à chaque génération.

- **Répétition**

Les étapes sont répétées pour le nombre spécifié de générations : plus le nombre de génération est grand, plus l'algorithme est performant et plus les résultats sont plus précis.

VI.4. Résultats et interprétation

VI.4.1. Le nombre de capteur

L'algorithme s'est arrêté à un nombre de 550 emplacement possible des capteurs. Cependant, il ne serait pas bénéfique ni techniquement ni économiquement parlant de mettre 550 capteurs, alors, parmi les positions obtenues, 50 ont été gardé pour y mettre des capteurs.

Les critères de sélections sont :

- L'accessibilité au lieu de l'emplacement du capteur.
- La proximité : il faut que la distance entre deux capteurs soit suffisamment grande pour soucis d'économie.
- Le temps : il faut que ce soit faisable de les mettre en place et de collecter les données en une courte durée.
- Disponibilité : il faut que le type de capteur soit disponible.

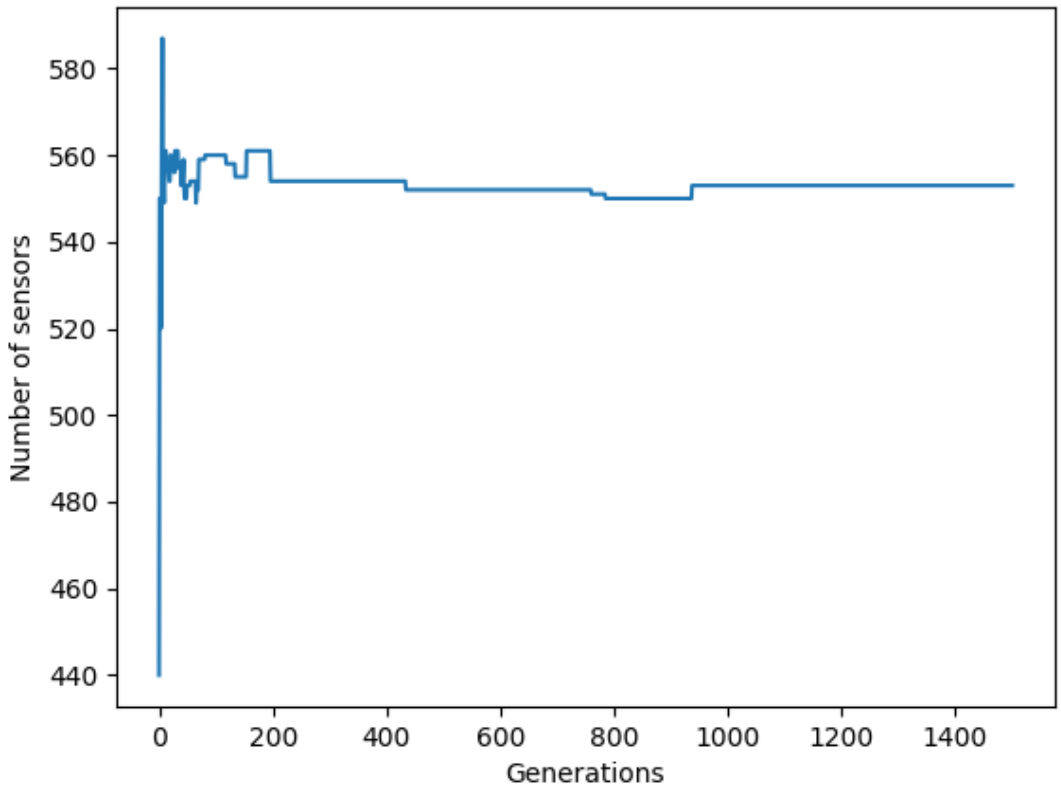


Figure VI-8 : Le nombre de capteurs obtenus par l'AG

VI.4.2. La qualité de la population

La qualité de la population est jugée selon la fonction fitness. Elle évolue extrêmement vite durant les 50 premières générations, puis commence à se stabiliser peu à peu jusqu'à ce qu'elle se fixe aux alentours de 900 générations.

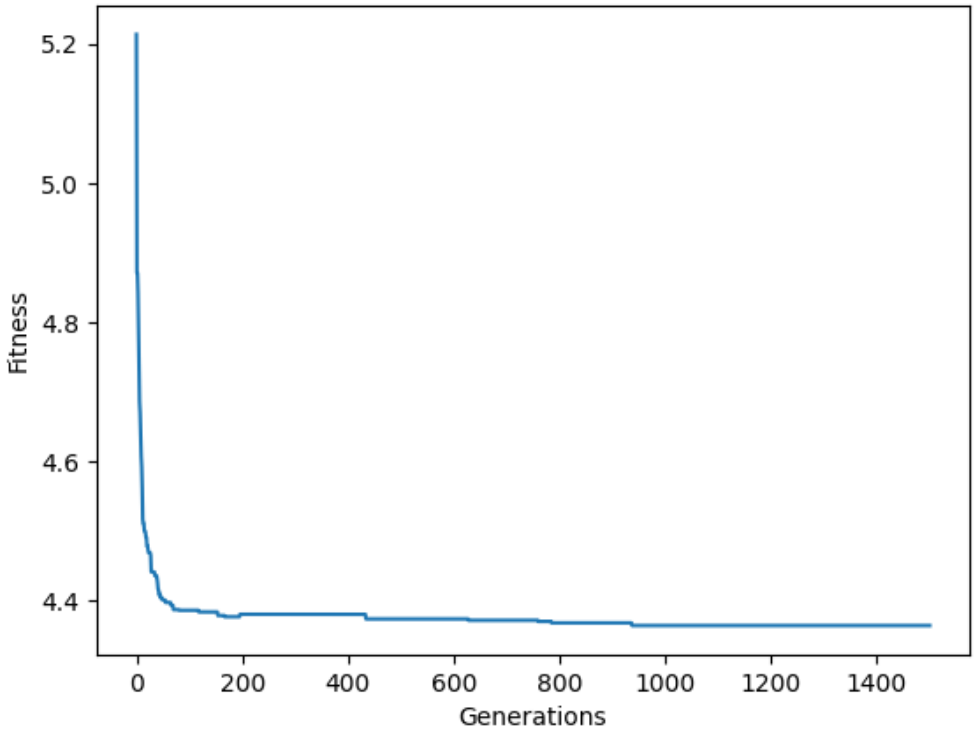


Figure VI-9 : La qualité de la population

VI.4.3. Emplacement des capteurs

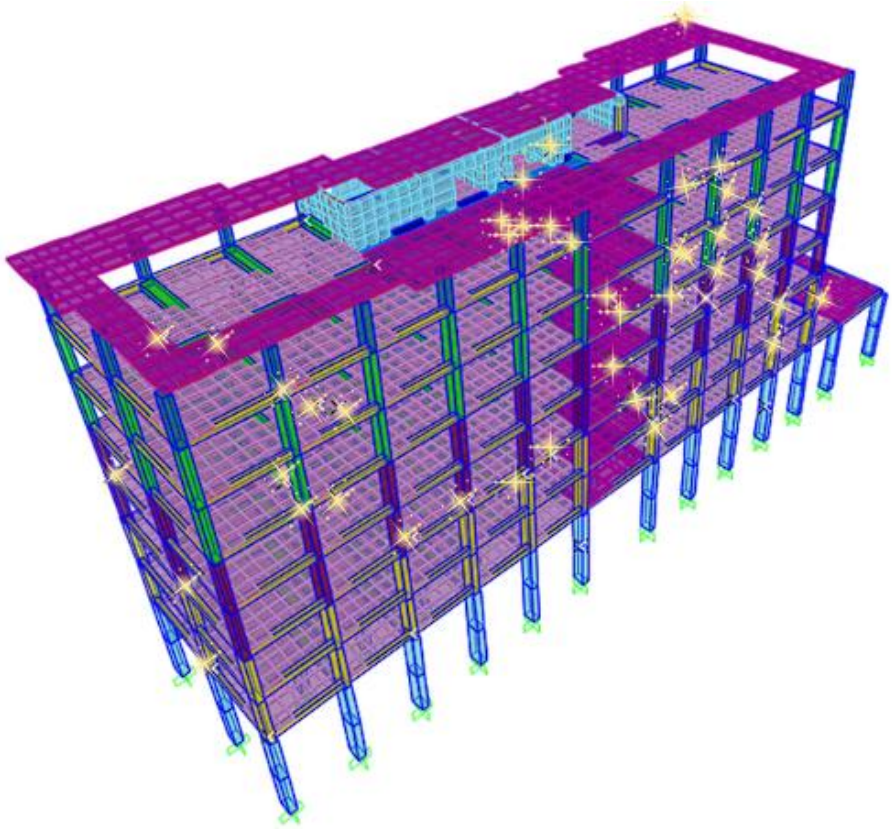


Figure VI-10 : L'emplacement des capteurs

VI.5. Conclusion

L'algorithme génétique est un outil important pour le monitoring des structures, puisqu'il permet d'optimiser le nombre de capteurs. Il a été bénéfique dans le cas présent, car il est passé d'un nombre d'emplacement possible de 13000 à 550, réduisant ainsi le champ de possibilité de 96%, et c'est parmi ces 550 que le nombre final de capteur a été choisi (50 capteurs).

Ceci dit, le résultat obtenu pourrait être améliorer en augmentant le nombre de générations de l'ordre de 10^5 par exemple et en ajouter d'autres fonctions objectives tel que la Matrice d'Informations de Fisher… etc.

VII. Chapitre 07 : Détection des endommagements

VII.1. Introduction

La localisation des capteurs étant établit, la dernière étape est de détecter les endommagements, leurs différentes localisations ainsi que leurs sévérités et ceci en utilisant l'intelligence artificielle.

Cette dernière étape est divisée en deux parties : la première partie consiste à simuler un dommage au modèle, qui représente la structure saine. La simulation des dommages se fera en sélectionnant plusieurs zones de la structure, qui subira des dommages avec un degré de sévérité variable. Les résultats obtenus sont les fréquences et déplacements modales pour chaque pourcentage d'endommagement, et ils forment une base de données qui sera utilisée dans la deuxième partie.

Le principe adopter dans la seconde partie est basé sur l'intelligence artificielle ; il consiste à créer un réseau de neurones artificiels avec la base de données obtenue à travers la simulation de des dommages. Ainsi, l'outil de détection de dommage sera prêt à détecter tout type de dommage qui peut arriver à la structure.

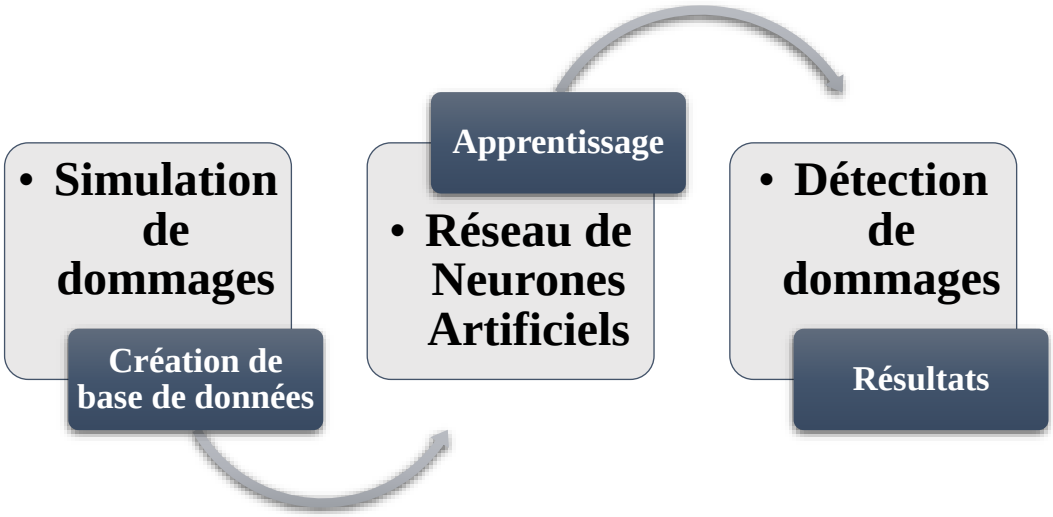


Figure VII-1 : Schéma qui résume le principe de la détection de dommage

VII.2. Processus du monitoring d'une structure

La détection de dommage faite avec l'intelligence artificielle est un processus qui se fait en suivant ces étapes :

- **Création de base de données**

La création de base de données se fait en deux étapes :

- Structure seine :

La première étape est de collecter les données de la réponse dynamique de la structure, à savoir les fréquences et les modes propres, avant qu'elle subisse un dommage, afin que le réseau neuronal puisse avoir de la matière de comparaison entre état endommagé et non-endommagé par la suite. La collecte des données se fait numériquement avec un modèle et/ou

expérimentalement avec des essais de vibrations. La seconde méthode sert principalement comme une validation du modèle, en supposant que la structure soit en bon état.

- Structure endommagée

La deuxième étape consiste à récolter les données de la réponse dynamique de la structure après qu'elle ait subit des dommages. A l'aide d'un programme python, la structure va être sujet à différent degrés d'endommagement dans différentes zones. Cela aide le réseau à apprendre les caractéristiques des différents types de dommages.

- **Apprentissage du RNA**

Maintenant que les prérequis sont prêts, l'étape suivante est d'entraîner le réseau neuronal. Dans cette étape, les données de la structure dans son état sain ains que les résultats de la simulation des dommages sont introduits à l'algorithme.

- **Prédiction**

Le réseau neuronal peut désormais prédire les accélérations futures, en se basant sur les informations qu'il possède. Les écarts entre les valeurs prédites et réelles indiquent souvent des anomalies.

- **Analyse des Scénarios de Dommages**

Dans un scénario de dommage, les erreurs de prédiction sont caractérisées statistiquement à l'aide de la distribution gaussienne, soutenant les décisions de détection des dommages.

- **Comparaison avec les Seuils**

Des seuils de dommages sont établis en comparant les indices de dommages avec des valeurs seuils connues. Cela aide à différencier les états sains et endommagés de la structure. Il existe plusieurs méthodes pour faire ceci, mais dans le cas présent, ça se fera avec la matrice de flexibilité.

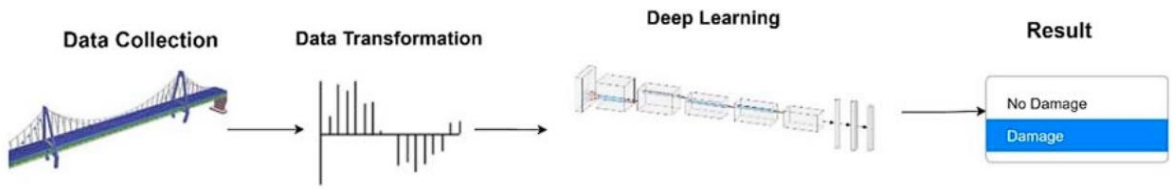


Figure VII-2 : Le processus de la détection des endommagements

VII.3. Simulation d'un dommage

La simulation d'un dommage est une étape cruciale du processus d'identification et de détection de l'endommagement. Le principe consiste à imiter un certain type de dommage, ce qui se fait en modifiant la structure, les caractéristiques mécaniques des matériaux, ou en appliquant divers types de charges à la structure.

Chaque type d'ouvrage est plus exposé à certains types de charges auxquelles il peut être vulnérable. Par exemple, les ponts sont souvent confrontés à des chocs, les tunnels à des pressions internes et des mouvements de terrain, les infrastructures marines à la corrosion et aux forces hydrodynamiques, tandis que les bâtiments sont principalement menacés par l'activité sismique ainsi que les incendies.

Dans le cas présent, le type de dommage simulé est celui causé par un séisme, qui va être traduit par une baisse de la rigidité du matériau sur un nombre de zones et qui sera représenté par plusieurs degrés d'endommagement,

VII.3.1. Les zones de dommages

Les zones à sélectionner sont celles jugés les plus vulnérables, c'est-à-dire, celles qui sont sujet à de grandes forces. Le logiciel SAP2000 affiche les sollicitations agissant sur toute la structure, et les zones qui subissent des efforts maximaux peuvent être facilement repérés. La figure suivante montre les résultats du logiciel :

Selon les résultats obtenus, les éléments qui subissent de grandes contraintes sont principalement les poteaux et les voiles, donc les zones choisies vont être les poteaux de chaque étage ainsi que le noyau central, ce qui donne un nombre total de 16 zones (une zone qui regroupe l'ensemble des poteaux de chaque étage, et une zone qui regroupe le noyau de chaque étage également) or deux zones dans chaque étage.

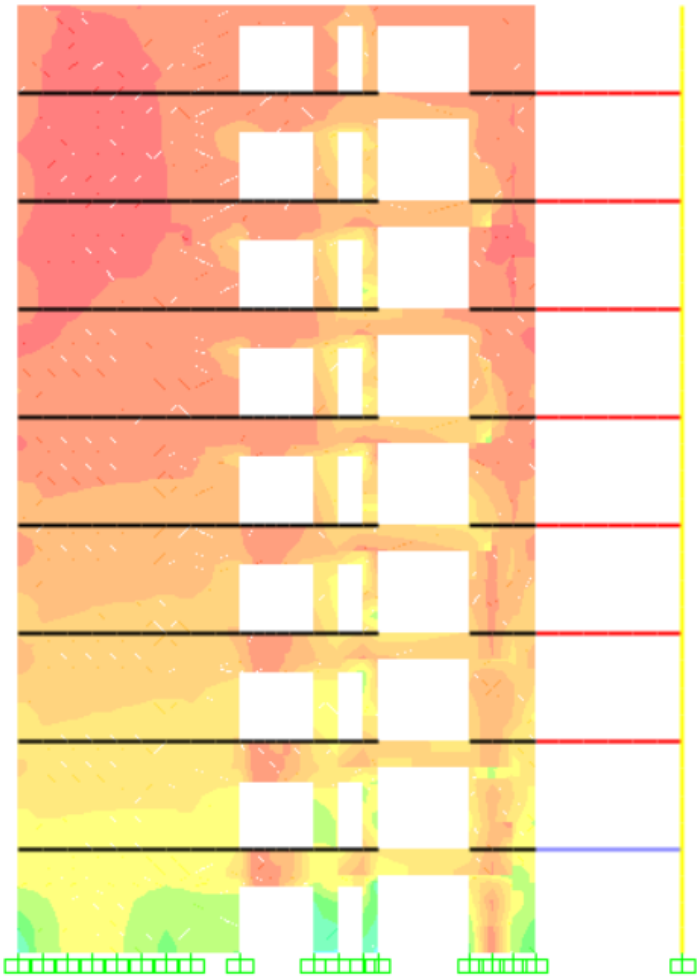


Figure VII-3 : Exemple des sollicitations sur une des zones choisies

VII.3.2. Degrés d'endommagement

Comme mentionné précédemment (VII.3), le dommage simulé sera représenté comme étant une baisse de la rigidité du matériau utilisé dans chaque zone, or dans le cas présent, le béton C35/45 présentera une baisse dans le module d'élasticité.

La diminution du module d'élasticité se fera en plusieurs palier qui varient entre 1% et 90% avec un pas de 1%, et ceci est afin de couvrir le maximum de cas et d'avoir une grande base de données. Un exemple pour mieux expliquer le processus : une structure seine a une rigidité E_0, pour simuler un dommage d'une sévérité du 1er degré, le module d'élasticité diminue de 1% or $E_1 = 0.99 \times E_0$ et ainsi de suite, jusqu'à E_{90}. Voici un tableau pour les 10 premiers degrés de sévérité pour mieux illustrer :

Tableau VII-1 : La diminution de la rigidité des 10 premiers degrés de sévérité

Sévérité	**Diminution de E_0**	**Rigidité (MPA)**
E_0	-	**35982.0**
E_1	$0.9 \times E_0$	32383.8
E_2	$0.89 \times E_0$	32023.98
E_3	$0.88\times E_0$	31664.16
E_4	$0.87\times E_0$	31304.34
E_5	$0.86\times E_0$	30944.52
E_6	$0.85\times E_0$	30584.7
E_7	$0.84\times E_0$	30224.88
E_8	$0.83\times E_0$	29865.06
E_9	$0.82\times E_0$	29505.24
E_{10}	$0.81\times E_0$	29145.42

VII.3.3. Processus de la simulation

La simulation peut se faire avec des logiciels, de la programmation, ou numériquement. Cette simulation se fera en utilisant un code conçu en langage python.

Le but du code est de générer un ensemble de données pour l'analyse structurelle en utilisant le logiciel SAP2000. La création de l'ensemble de données implique la simulation de dommages sur un modèle d'éléments finis (FEM) et l'extraction de propriétés dynamiques de la structure. Le code peut être diviser en 4 parties :

- **Initialisation**

La première étape est de préparer les codes en important les librairies nécessaires, en indiquant la localisation du fichier utilisé (la structure seine) et en créant le cheminement du fichier modifié (la structure endommagée), et en définissant les paramètres initiaux : le module d'élasticité initial, les matériaux correspondant aux différentes zones, la liste des capteurs choisi dans le chapitre précédant.

- **La simulation des dommages**

Le code crée une fonction avec deux entrées : les éléments endommagés et la sévérité du dommage, et elle enregistre les fréquences et les modes propres après le dommage.

La formule pour calculer la rigidité est introduite ainsi qu'une fonction qui permet de modifier le module d'élasticité dans le modèle SAP2000. Ensuite l'analyse modal est lancée et les fréquences, modes propres et déplacements sont enregistrés pour chaque zone.

La matrice de flexibilité est calculée et la valeur max est enregistré, ensuite le modèle endommagé est enregistré.

- **Les résultats**

Les résultats sont ensuite enregistrés dans le cheminement créer par l'algorithme sous fichier Excel.

VII.3.4. Résultats

Les résultats obtenus vont être sous forme de fichier Excel, avec les degrés de sévérité et les caractéristiques mécaniques correspondantes. Le fichier doit être traité par un algorithme pour toute anomalie avant d'enfin pouvoir être utilisé pour l'apprentissage de l'outil de l'intelligence artificielle.

VII.4. Machine Learning

VII.4.1. Définitions

L'intelligence Artificielle est une sous-branche du domaine de l'informatique qui a pour but de permettre à l'ordinateur d'accomplir des tâches humaines en simulant le comportement humain.

Le Machine Learning, est une des méthodes utilisées en intelligence artificielle pour aider les ordinateurs à apprendre en étudiant des exemples, d'où le nom 'Machine Learning'. Contrairement aux systèmes programmés de manière explicite pour effectuer une tâche spécifique, les modèles de Machine Learning utilisent des algorithmes formés à partir des ensembles de données utilisent et qui trouvent des corrélations dans ces données pour créer des modèles d'auto-apprentissage capables de prédire des résultats et de classer les informations sans intervention humaine, et ils améliorent leurs performances avec l'expérience. [29]

VII.4.2. Fonctionnement des algorithmes

Les algorithmes fonctionnent en deux phases :

- **Phase d'apprentissage**

Durant cette phase, l'algorithme est formé à partir des données, et ils les analyses et ajustent ses paramètres pour obtenir des résultats plus précis.

L'algorithme est posé face à un problème et pour l'aider à le résoudre, des données y sont introduites en entrées, appelées X. Il étudie les données et cherche une corrélation dans les

données d'entrée X, ou un lien, selon le type d'apprentissage, entre les données d'entrée X et de sorties Y. Une fois qu'il trouve le lien, il est opérationnel, et prêt pour la phase 02.

- **Phase de prédiction**

L'algorithme connait désormais le lien entre l'entrée X et la sortie Y, et ceci à partir d'un échantillon de X (et de Y, selon le mode d'apprentissage), il peut maintenant déduire pour une variable X qu'il n'a jamais rencontré, la sortie correspondante.

VII.4.3. Types d'apprentissages

VII.4.3.1.Supervised Learning

Dans ce type d'apprentissage, l'algorithme est entraîné sur un ensemble de données étiquetées, ce qui signifie que chaque exemple d'entraînement est associé à une réponse, ou en d'autres termes, chaque donnée d'entrée X est accompagnée de la sortie Y. [30]

VII.4.3.2.Unsupervised Learning

L'algorithme est entraîné sur des données sans étiquettes, il aura accès uniquement à une base de données d'entrée X. Il devra par la suite déduire les différents motifs trouvés ou la structure des données d'entrée X par lui-même. [30]

VII.5. Réseau de neurones artificiels

VII.5.1. Définition

Les données d'entrées sont souvent complexes et présentent parfois plusieurs paramètres, et ne peuvent pas être introduites directement dans l'algorithme, pour cela, il faudrait un élément capable d'enregistrer les entrées et de capturer des relations/liens entre les entrées et les sorties, d'où l'invention du réseau de neurones artificiels.

Un neurone artificiel est inspiré du neurone biologique, il mime son comportement. Il s'agit d'une fonction mathématique qui met en relation des entrées X avec de sorties Y.

Dans le cas de plusieurs données X (X_1, X_2, X_3, …, X_n), des coefficients de pondérations y sont attribuer à chacun (P_1, P_2, P_3, …, P_n) et ils sont multiplier par l'entrée correspondante. Par la suite, les résultats seront sommés et comparés à un seuil fixé, si la somme dépasse le seuil, le neurone envoi 1 à la sortie, Y = 1, sinon Y = 0.

Pour des fonctions plus complexes, plusieurs neurones seront employés, et ils sont empilés ce qui donne le réseau de neurones.

Un réseau de neurones artificiels (RNA) est donc constitué de couches de neurones interconnectés, organisées en une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées, et une couche de sortie. Chaque neurone reçoit des entrées dotées d'un poids P_i, applique une fonction d'activation, et transmet une sortie. [31]

VII.5.2. Les composantes d'un réseau de neurones

- **Neurone :** L'unité de base d'un RNA qui reçoit des entrées, les traite et produit une sortie. Chaque neurone applique une fonction à ses entrées pour générer une sortie.
- **Couches :** Le RNA est enchaînement d'une multitude de couches de neurones, elles sont divisées en 03 types de couches :

- **Couche d'Entrée** : Cette couche reçoit les données d'entrée. Elle fournit des informations provenant du monde extérieur au réseau, les neurones transmettent uniquement les données vers la prochaine couche sans aucun calcul.
- **Couche Cachée** : Les nœuds de cette couche font partie de l'abstraction fournie par n'importe quel réseau neuronal. La couche cachée effectue toutes sortes de calculs sur les données d'entrées et transfère le résultat à la couche de sortie.
- **Couche de Sortie** : Cette couche présente les informations apprises par le réseau au monde extérieur.

- **Poids :** Paramètres qui représentent la force de la connexion entre les neurones. Les poids sont ajustés pendant l'entraînement pour minimiser l'erreur dans la sortie du réseau
- **Fonction de perte :** Une fonction qui mesure la différence entre les prédictions du réseau et les valeurs réelles. L'objectif de l'entraînement est de minimiser la fonction de perte.
- **Optimisateur** : c'est des algorithmes utilisés pour ajuster les poids afin de minimiser la fonction de perte. Les optimiseurs courants incluent Gradient Descent, Adam, et RMSprop.
- **Fonction d'activation :**

Une fonction d'activation est une fonction mathématique qui décide si un neurone doit être activé ou non, en vérifiant si la somme pondérée des entrées provenant du nœud est supérieure à la valeur seuil. Si c'est le cas, l'entrée est considérée comme importante pour la prédiction et est transmise à la couche cachée suivante ou à la sortie. [31]

Les fonctions d'activation introduisent des non-linéarités qui permettent aux réseaux neuronaux d'ap prendre des mappings hautement complexes entre les entrées et les sorties.

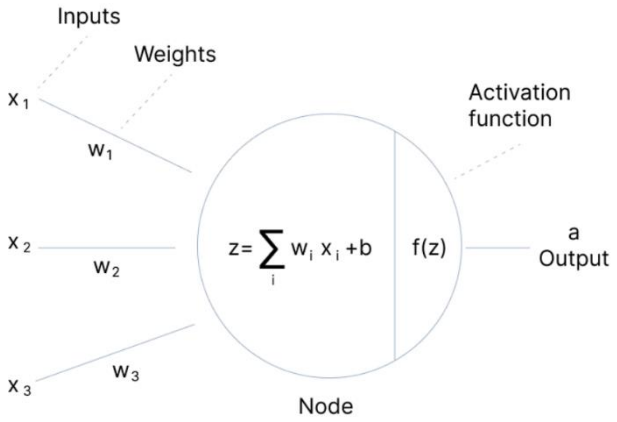


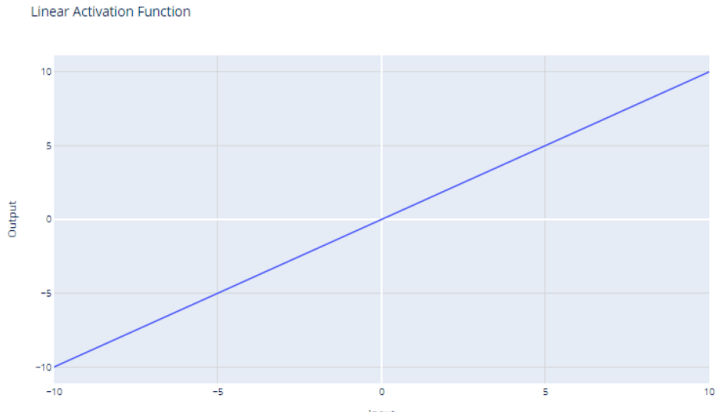
Figure VII-4 : Composantes d'un neurone artificiel

Il existe de nombreuses fonctions d'activation, et chacune a des critères spécifiques à appliquer entre les couches. Voici quelques exemples des fonctions les plus utilisées :

- **Fonction linéaire :**

Elle retourne l'entrée. Elle est utilisée pour les problèmes de régression pour trouver la meilleure fonction qui décrit la relation entre les variables d'entrée et de sortie.

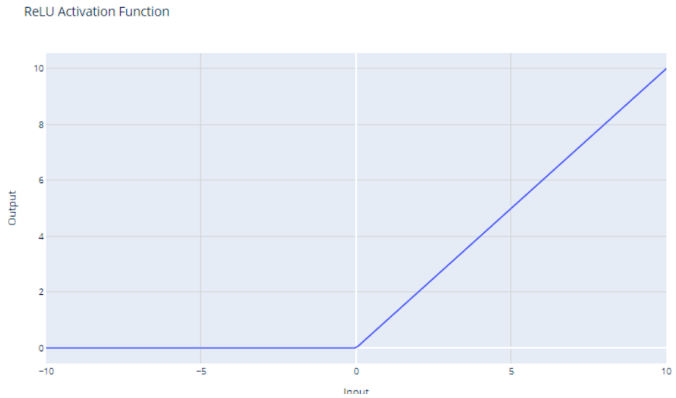
$$f(x) = x$$



- **Fonction ReLU (Rectified Linear Unit) :**

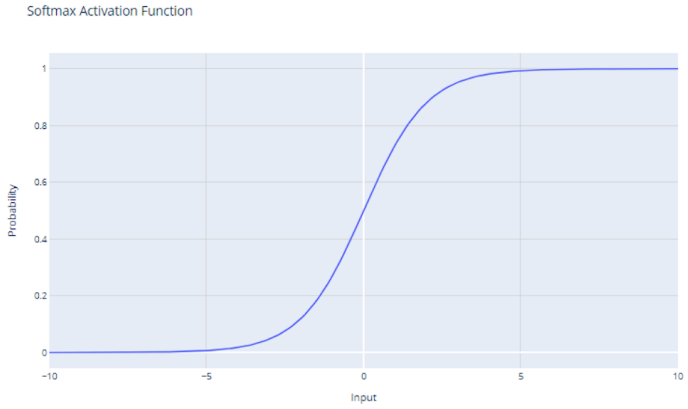
Elle retourne l'entrée si celle-ci est positive, sinon elle retourne zéro. Elle est largement utilisée dans les couches cachées des réseaux de neurones en raison de sa simplicité et de sa capacité à accélérer l'apprentissage.

$$f(x) = \max(x, 0)$$



- **Fonction Softmax :**

Elle prend un vecteur d'entrée de taille arbitraire et renvoie un vecteur de probabilités normalisées. Elle est couramment utilisée dans les couches de sortie des réseaux de neurones pour la classification multiclasse.



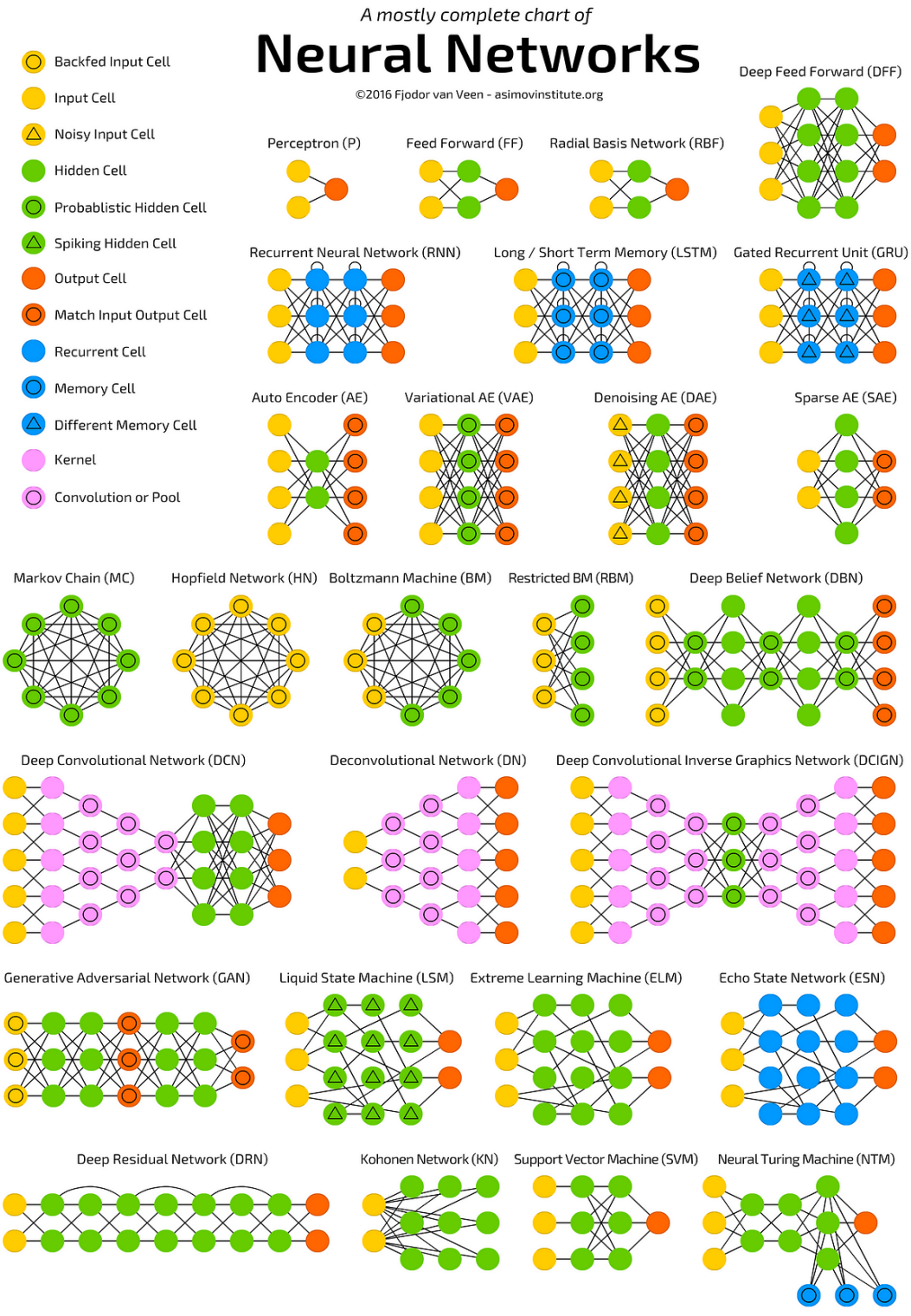


Figure VII-5 : Les types de cheminements d'un réseau de neurones

VII.5.3. Deep Learning

Le Deep Learning est une branche du Machine Learning, qui utilise également les réseaux de neurones artificiels, mais contrairement aux algorithmes du ML, les algorithmes du DL sont traités seulement avec des données non-labelisé. Le terme "Deep" dans le Deep Learning fait référence à la multitude de couches cachées au sein de l'architecture du réseau neuronal. Ces modèles peuvent comporter des centaines, voire des milliers de couches cachées, ce qui leur permet de découvrir des relations et des caractéristiques complexes au sein des données.

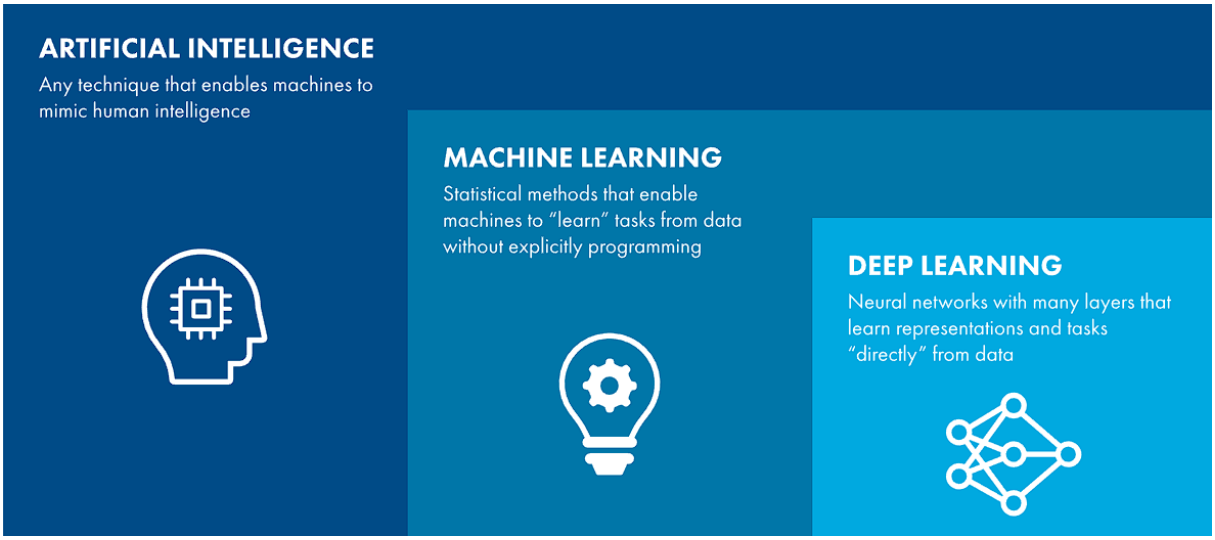


Figure VII-6 : La différence entre AI, ML et DL

VII.5.4. Conception du réseau de neurones

La détection de dommage va être faite avec un réseau de neurones profond (Deep Neural Network) puisque ce type de réseau est le plus adapté pour les tâches de classification et de régression sur des données structurées dans ce cas, ça sera les tableaux de caractéristiques obtenus durant la simulation des endommagement (VII.3.4). Le processus peut être diviser en X parties :

- Initialisation et normalisation

La conception du neurone se fait avec la bibliothèque open-source des réseaux de neurones profond, Keras. Elle est donc importée, ainsi que d'autres librairies. Les données d'entrée qui ont été acquises précédemment sont normalisés en des valeurs entre 0 et 1.

- Empilement des couches

Le réseau de neurones est créé avec une couche d'entrée composée de 65 neurones. Les couches cachées sont de tailles différentes (500, 400, 300, et 100), et ils sont attribué la fonction d'activation ReLU.

Le réseau de neurones donne deux couches de sorties : la première est une couche de classification avec un nombre de 6 neurones et une fonction d'activation Softmax et une sortie pour la régression avec un seul neurone et une fonction d'activation linéaire.

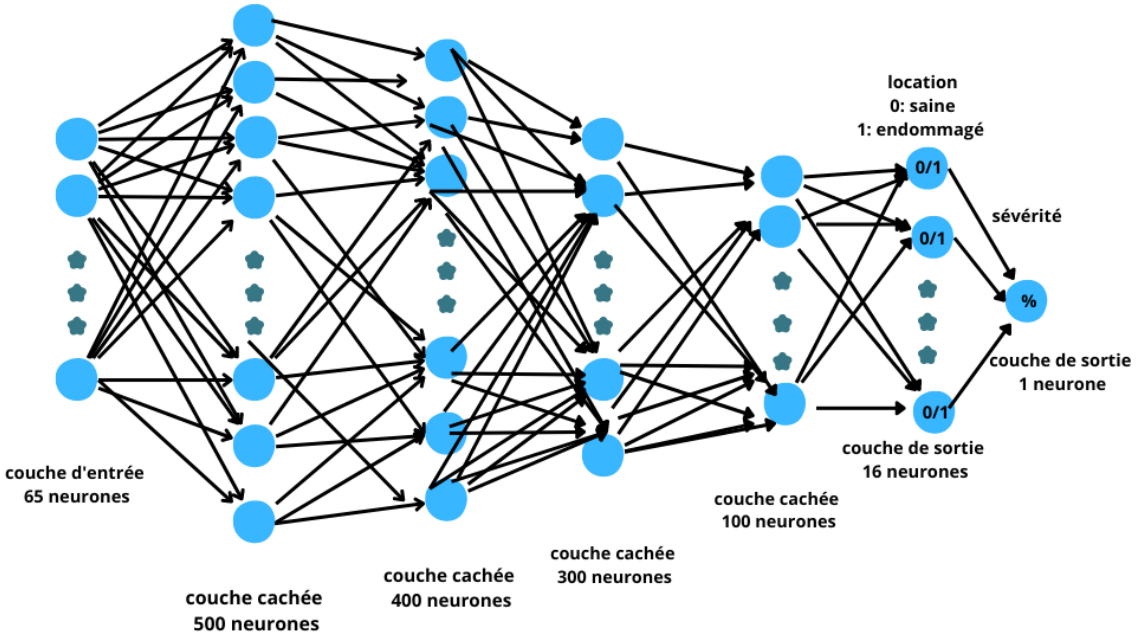


Figure VII-7 : Le réseau de neurones

- La configuration de l'apprentissage

Pour pouvoir minimiser l'erreur et évaluer le nombre de fois ou le code à bon, la fonction de perte est définie accompagné de l'optimiseur Adam qui contrôle les poids pour minimiser l'erreur.

- Entraînement du modèle

Le modèle commence la phase d'apprentissage et il s'entraîne sur les données d'entrée et avec un lot de taille 16 correspondant au nombre de zones et pendant 1000 époques.

- Evaluation du modèle

Pour finir, le modèle passe par la phase de prédiction, où il fait des prédictions sur le modèle, et par la suite, il évalue la précision et le nombre d'erreur.

VII.5.5. Apprentissage du réseau de neurones

Les données générées durant la simulation des dommages sont des informations qui ont été intégrés comme données d'entrée au réseau de neurones, cependant, le réseau n'utilise pas la totalité des données pour son entraînement. En effet, il reçoit les données qui sont divisées en trois (03) groupes selon leurs utilisations :

- **Données d'apprentissage :** Ces données constituent la majorité du dataset (70%) et sont utilisées pour l'apprentissage. Elles seront intégrées comme input, et elles serviront à calculer les gradients et à optimiser les pondérations du modèle.

- **Données de validation :** Représentant environ 15 % des données totales, elles sont choisies en prenant un cas d'endommagement pour chaque zone de dommage. Ces

données sont utilisées comme condition d'arrêt pour éviter le surapprentissage (overfitting).

- **Données test :** Elles représentent également environ 15 % des données totales et sont sélectionnées de la même manière que les données de validation. Elles sont utilisées à la fin de l'apprentissage pour évaluer la performance du réseau sur de nouvelles données.

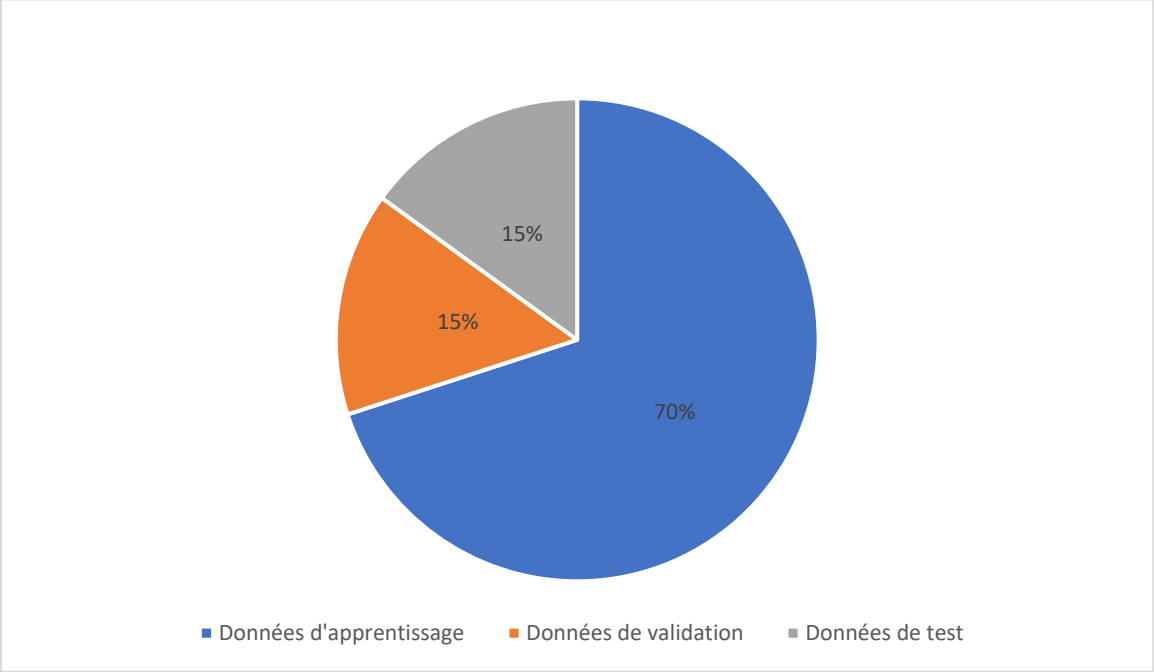


Figure VII-8 : La répartition des données

VII.5.6. Interprétation des résultats

Les résultats sont obtenus sous forme de graphes qui évaluent la précision de l'algorithme durant les deux phases d'entraînement et de prédiction.

- **La sévérité de l'endommagement**

Le premier graphe représente la précision de l'algorithme pour identifier le degré de sévérité de l'endommagement. Les deux phases convergent vers le même pourcentage de précision qui est de l'ordre de **97%.**

Ceci signifie que l'algorithme a bien accomplie la phase d'apprentissage et qu'il peut être fiable pour la prédiction de la sévérité de l'endommagement.

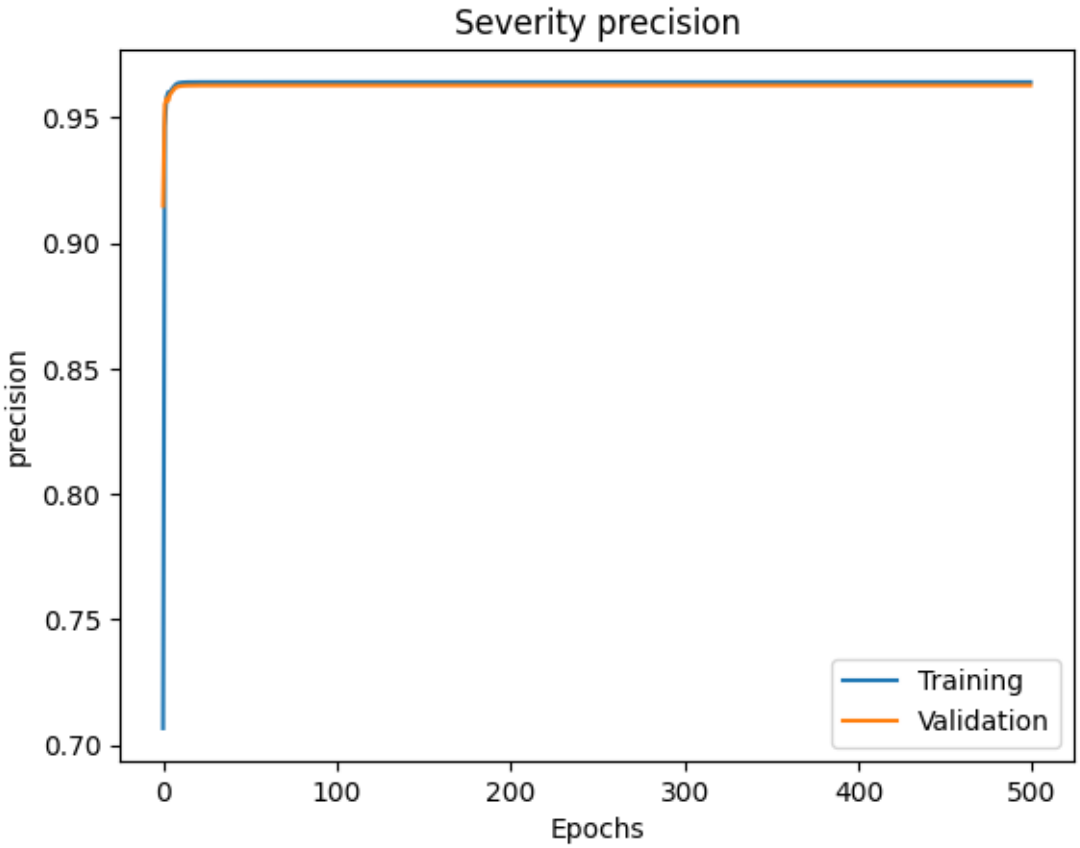


Figure VII-9 : La précision de la sévérité en phases d'apprentissage et de validation

- **La localisation de l'endommagement**

Le second graphe représente la précision de l'algorithme pour détecter la localisation du dommage. Les résultats sont les suivants :

- La phase d'entraînement : **98.5%**
- La phase de validation : **92%**

La précision obtenue est différente que celle de la sévérité. En effet, il y a un écart assez remarquable entre la précision de l'algorithme lors de l'entraînement et lors de la validation. Bien que l'apprentissage donne d'excellents résultats, la validation n'est pas au même niveau, ce qui signifie que l'algorithme peut être optimiser et donner des résultats meilleurs. Ceci dit, l'algorithme est tout autant performant.

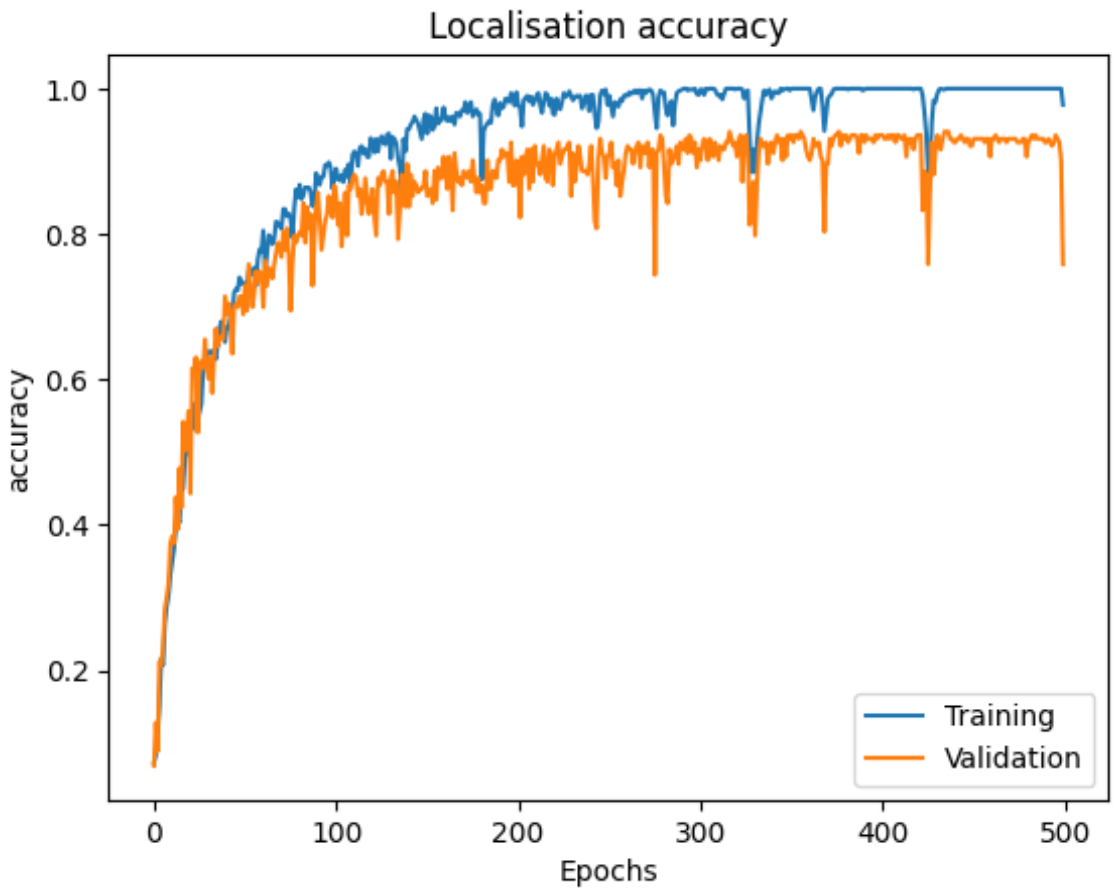


Figure VII-10 : : La précision de la localisation des dommages en phases d'apprentissage

VII.6. Conclusion

Dans l'ensemble, le réseau de neurone artificiels crée a donné de très bons résultats pour l'identification du degré de dommage, mais sa précision diminue pour la localisation du dommage.

L'algorithme reste utilisable, mais il peut être raffiné en enrichissant la base de données et en augmentant le nombre d'itérations.

Au final, cette étude a permis d'avoir un aperçu sur une méthode moderne qui ne nécessite seulement quelques données d'entrée pour résoudre les problèmes liés à la prédiction et localisation dommage, et qui serait apte à remplacer les méthodes classiques dans un future prochain.

VIII. Conclusion et perspectives

L'objectif principal de ce mémoire était d'appliquer une méthode pour détecter, localiser et quantifier l'endommagement dans une structure stratégique, à savoir le nouveau siège de FADERCO, situé au quartier d'affaires de Bab Ezzouar, Alger.

Dans un premier temps, une étude sismique a été réalisée, basée sur les documents techniques et les conditions imposées par les réglementations. Cette étude avait pour but de vérifier la stabilité de l'ouvrage et de s'assurer de sa résistance au chargement dynamique du séisme, qui représente le principal risque pour les structures et cause d'énormes dégâts.

Après avoir validé le modèle à travers des essais de vibrations ambiantes et vérifié sa fiabilité, ainsi qu'avoir effectué les calculs nécessaires pour le ferraillage des éléments structuraux, la partie dédiée à la détection de dommages a pu commencer.

La surveillance de la structure a été précédée d'une étude visant à recueillir des données pour constituer une base de données pour la détection de dommages. Cette étude avait pour but de déterminer le nombre et l'emplacement optimal des capteurs. En effet, une structure peut comporter un nombre infini de nœuds et de degrés de liberté, rendant impossible l'installation de capteurs à chaque point. L'emplacement des capteurs est crucial pour couvrir toute la structure et obtenir les données nécessaires pour la surveillance. Le principe de l'optimisation est de « maximiser l'information avec un nombre minimal de capteurs ». Cette problématique est au centre des préoccupations de nombreux chercheurs et fait l'objet de nombreuses recherches visant à développer des méthodes plus performantes, efficaces et précises.

Ce projet s'est basé sur une méthode d'optimisation utilisant un algorithme génétique appliquant le critère d'identification MAC. Grâce à cette méthode, le nombre de capteurs a été fixé à 50, permettant ainsi de compléter la première étape de la surveillance.

La simulation de dommages est une étape intermédiaire visant à reproduire les dommages causés par un séisme ou un choc en réduisant les propriétés du matériau, notamment sa rigidité, afin de créer une base de données pour la détection de dommages. Les dommages ont été simulés dans un nombre fixe de zones, sélectionnées en identifiant les éléments les plus susceptibles de subir des dommages (poteaux et voiles) et en les regroupant par étage, aboutissant à un total de 16 zones.

Une fois la base de données prête, la phase finale consistait à l'introduire dans un réseau de neurones afin qu'il puisse apprendre et prédire la localisation et la sévérité des dommages.

L'objectif du mémoire a été atteint par la création d'un outil capable de surveiller cette structure. L'avantage de cette méthode est que l'outil lui-même est standard et peut être personnalisé pour d'autres structures.

IX. Références

[1] MIDASOFT, «The Importance of Seismic Analysis and Its Understanding,» [En ligne]. Available: https://www.midasoft.com/bridge-library/the-importance-of-seismic-analysis-and-its-understanding. [Accès le 26 Avril 2024].

[2] M. Hamada, Earthquake Resistant Design, vol. I.

[3] X. S. H. a. Y. Y. L. Zheng a, Construction and Building Materials, vol. 22, 2008, pp. 939-947.

[4] C. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) sous la direction de Crémona, Evaluation dynamique des ponts, 2000 - 2003.

[5] I. ROUAZ, Evaluation des Performances Des Tables Vibrantes : Cas de la Table Vibrante du CGS, Blida, 2011.

[6] X. R.-V. ,. J. P. N. R. F. Dallaire, «Highway Bridge Damping Evaluation : Forced and Ambient Vibration Testing,» *16th World Conference on Earthquake*, p. 12, 2017.

[7] P. A. Rendall Allemang, Handbook of Experimental Structural Dynamics.

[8] L. Mervel, «Données, SHM, et analyse statistiques,» 2018.

[9] A. Plankis, *STRUCTURAL HEALTH MONITORING MEMS SENSORS USING ELASTICITY-BASED BEAM VIBRATIONS*, 2012.

[10] a. M. A. Syed Haider M Rizvi, «From data to insight, enhancing structural health monitoring using physics-informed machine learning and advanced data collection methods,» *IOP Publishing*, 2023.

[11] Association Béton Québec, *L'écaillage des Surfaces de Béton*, 3 éd., Québec, 2023.

[12] Compagnie des Experts du Bâtiment des Travaux Publics et de l'Industrie (CEBTPI), *La Pathologie du Béton*, Marseille, 2016.

[13] L. H. ,. F. F. Mariano Angelo Zanini, Engineering Structures, vol. 180, 2019, pp. 320 - 332.

[14] Conseil de l'Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, 2001, pp. 14-20.

[15] M. V. M. G. M. M. R. Ditommaso, «Evaluation and Considerations About Fundamental Periods of Damaged Reinforced Concrete Buildings,» *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013.

[16] [. Chen, Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures, University of Greenwich, United Kingdom, 2018.

[17] X. S. I. Y. M. a. R. C. T. Sun, «A Review on Vibration-Based Damage Detection Methods for Civil Structures,» *Vibrations*, 2023.

[18] C. F. M. B. P. Scott W. Doebling, «Methods, A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification,» *The Shock and Vibration Diges,* 1998.

[19] D. CAICEDO et L. A. a. B. J. LARA-VALENCIA, «Frequency-based methods for the detection of damage in structures: A chronological review.,» *DYNA,* 2021.

[20] M. B. T. H. Miroslav Pastor, Procedia Engineering, vol. 48, 2012, pp. 543 - 548.

[21] Y. T. a. L. Zhang., Computational methodologies for optimal sensor placement in structural health monitoring: A review, 2019.

[22] R. L. M. L. Z. Wang, Structural damage detection using measured FRF data, School f Production and Mechanical Engineering, Nanyang Technological University, Singapore, 1997.

[23] W. J. S. a. K. Worden, «An overview of optimal sensor location methods for damage detection,» *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering,* pp. 179 - 187, 2001.

[24] T. H. Y. a. H. N. Li, «Methodology developments in sensor placement for health monitoring of civil infrastructures,» *International Journal of Distributed Sensor Networks,* 2012.

[25] H. X. X. W. X. Z. a. S. F. Haoxiang He, «Optimal Sensor Placement for Spatial Structure Based on Importance Coefficient and Randomness,» *Shock and vibration,* 2018.

[26] M. D. C. E. V. Alexander Mendler, «Sensor placement with optimal damage detectability for statistical damage detection,» *Mechanical Systems and Signal Processing,* 2022.

[27] B. F. N. C. Murillo Villa, «Genetic Algorithm to Solve Optimal Sensor Placement for Underwater Vehicle Localization with Range Dependent Noises,» *Sensors,* 2022.

[28] T. a. Q. S. a. D. A. a. B. M. Alam, Genetic Algorithm: Reviews, Implementations, and Applications, 2020.

[29] M. Banoula, «Machine Learning Steps: A Complete Guide,» 2023. [En ligne]. Available: https://www.simplilearn.com/tutorials/machine-learning-tutorial/machine-learning-steps#:~:text=Training%20is%20the%20most%20important,model%20gets%20better%20at%20predicting..

[30] S. Brown, «Machine learning, explained,» 2021. [En ligne]. Available: https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/machine-learning-explained. [Accès le 08 Juin 2024].

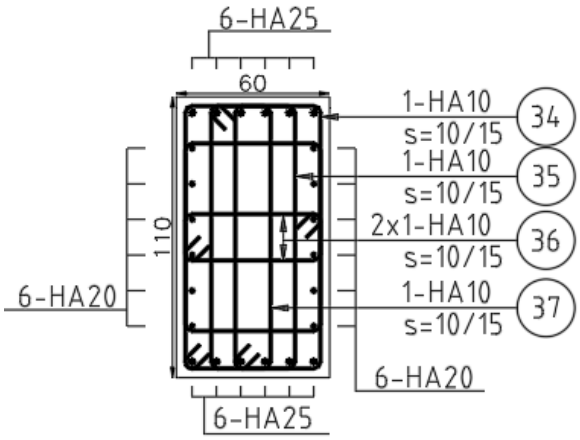
[31] P. Baheti, «Activation Functions in Neural Networks,» [En ligne]. Available: https://www.v7labs.com/blog/neural-networks-activation-functions. [Accès le 08 Juin 2024].

[32] MIDASoft. [Online]. Available: https://www.midasoft.com/bridge-library/the-importance-of-seismic-analysis-and-its-understanding.

- **Croquis de ferraillage des poteaux**

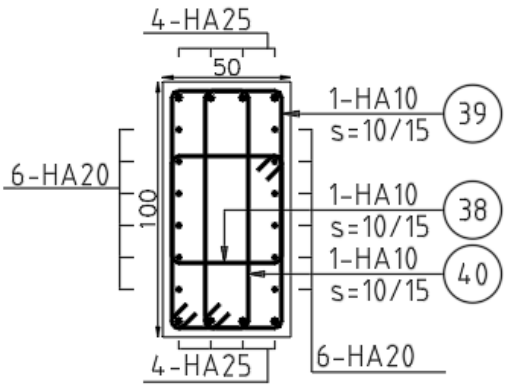
Ferraillage P1 (60x110)

Ech:1/25



Ferraillage P2 (50x100)

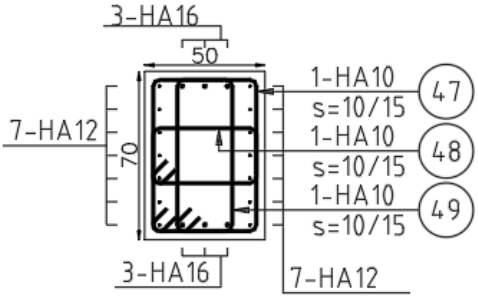
Ech:1/25



Ferraillage P3 (50x90)

Ferraillage P7 (50x70)

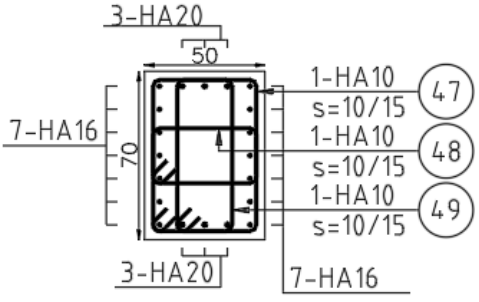
Ech:1/25



Ferraillage P4 (50x90)

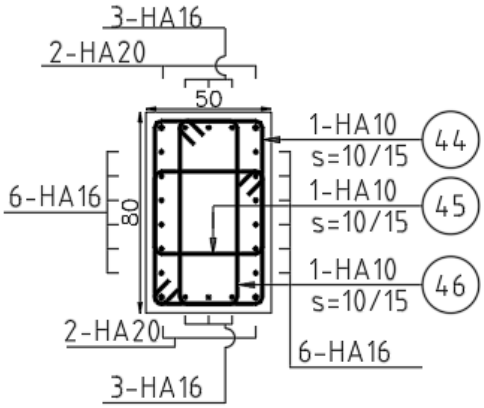
Ferraillage P8 (50x70)

Ech:1/25



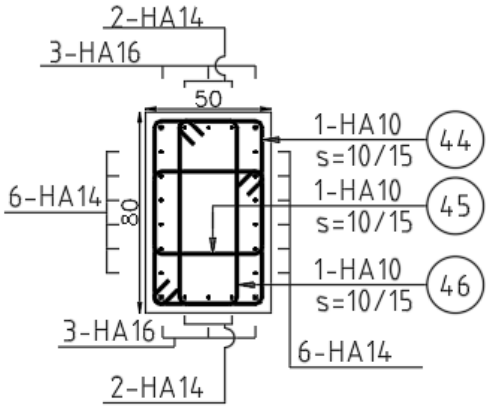
Ferraillage P5 (50x80)

Ech:1/25



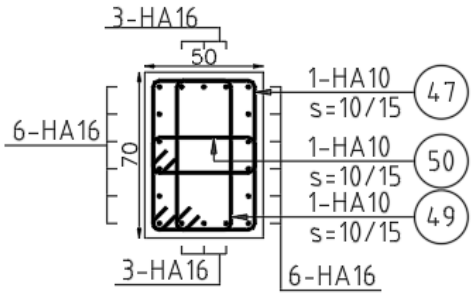
Ferraillage P6 (50x80)

Ech:1/25



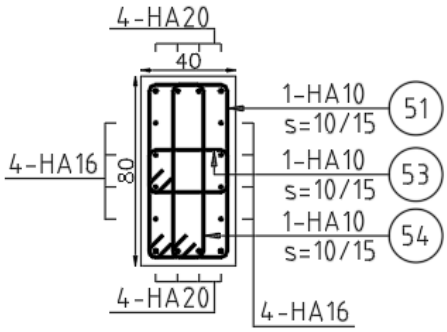
Ferraillage P9 (50x70)

Ech:1/25



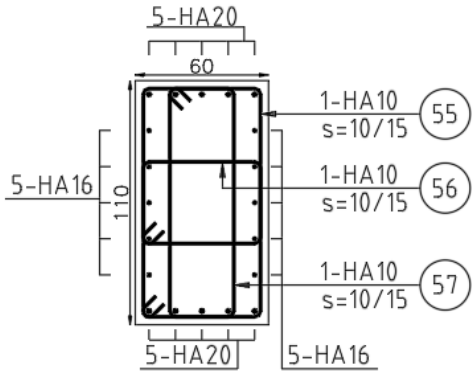
Ferraillage P10 (40x80)

Ech:1/25



Ferraillage P11 (60x110)

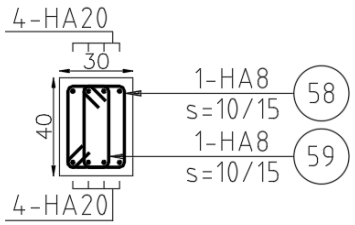
Ech:1/25



- **Croquis de ferraillage des poutres**

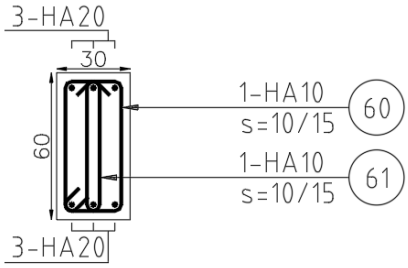
Ferraillage Poutres (30x40)

Ech:1/25



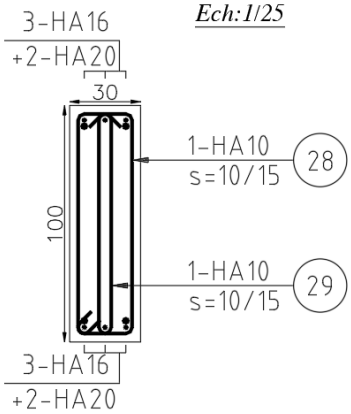
Ferraillage Poutres (30x60)

Ech:1/25



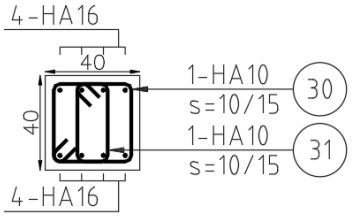
Ferraillage Poutres (30x100)

Ech:1/25



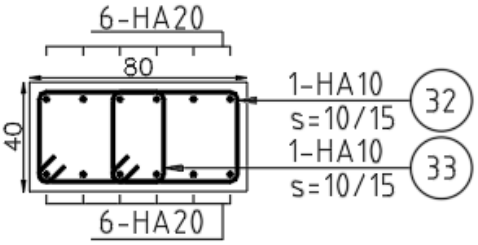
Ferraillage Poutres (40x40)

Ech:1/25



Ferraillage Poutres (80x40)

Ech:1/25



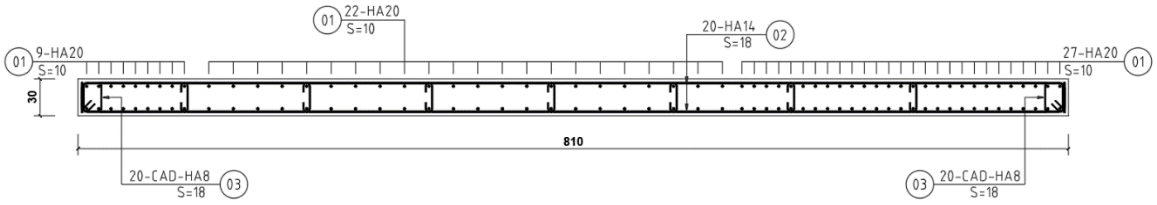
- **Croquis de ferraillage des voiles**

FERRAILLGE VOILE -1- (810cm x 30cm)

Ech:1/25

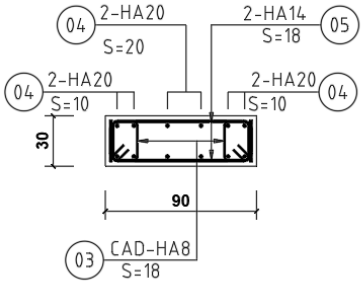
TRUMEAU -1- (L=810cm)

Ech:1/25



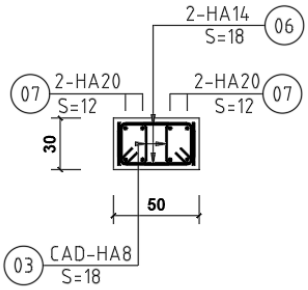
TRUMEAU -2- (L=90cm)

Ech:1/25



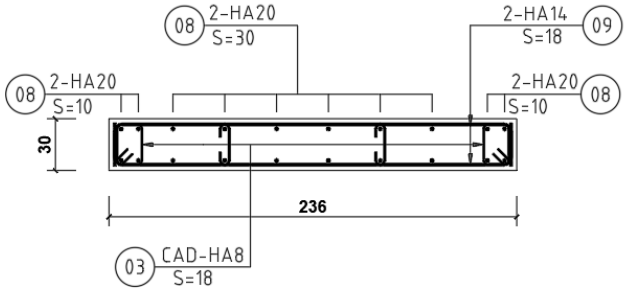
TRUMEAU -3- (L=50cm)

Ech:1/25



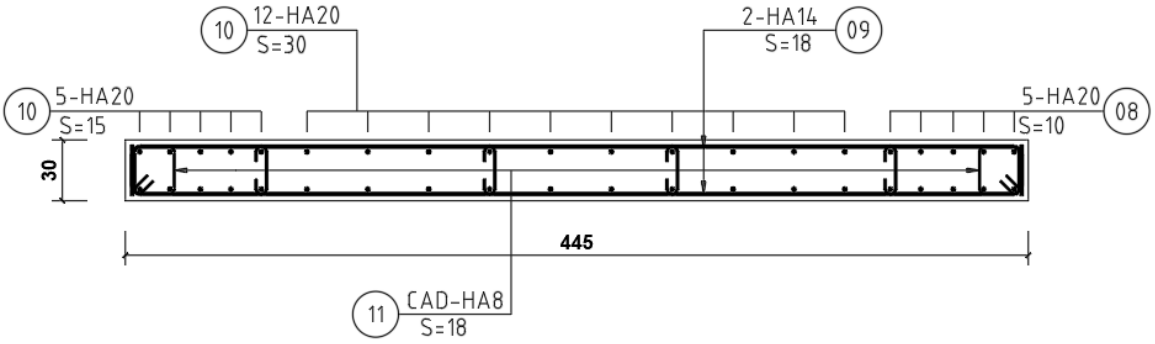
TRUMEAU -4- (L=236cm)

Ech:1/25



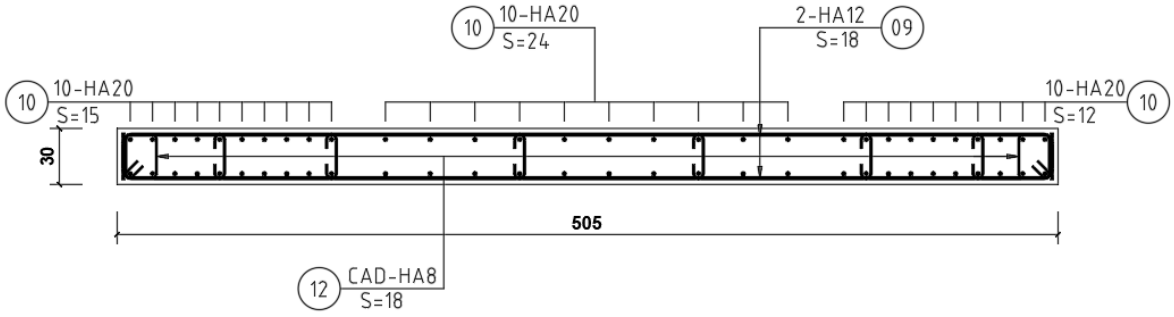
FERRAILLGE VOILE -2- (445cm x 30cm)

Ech:1/25

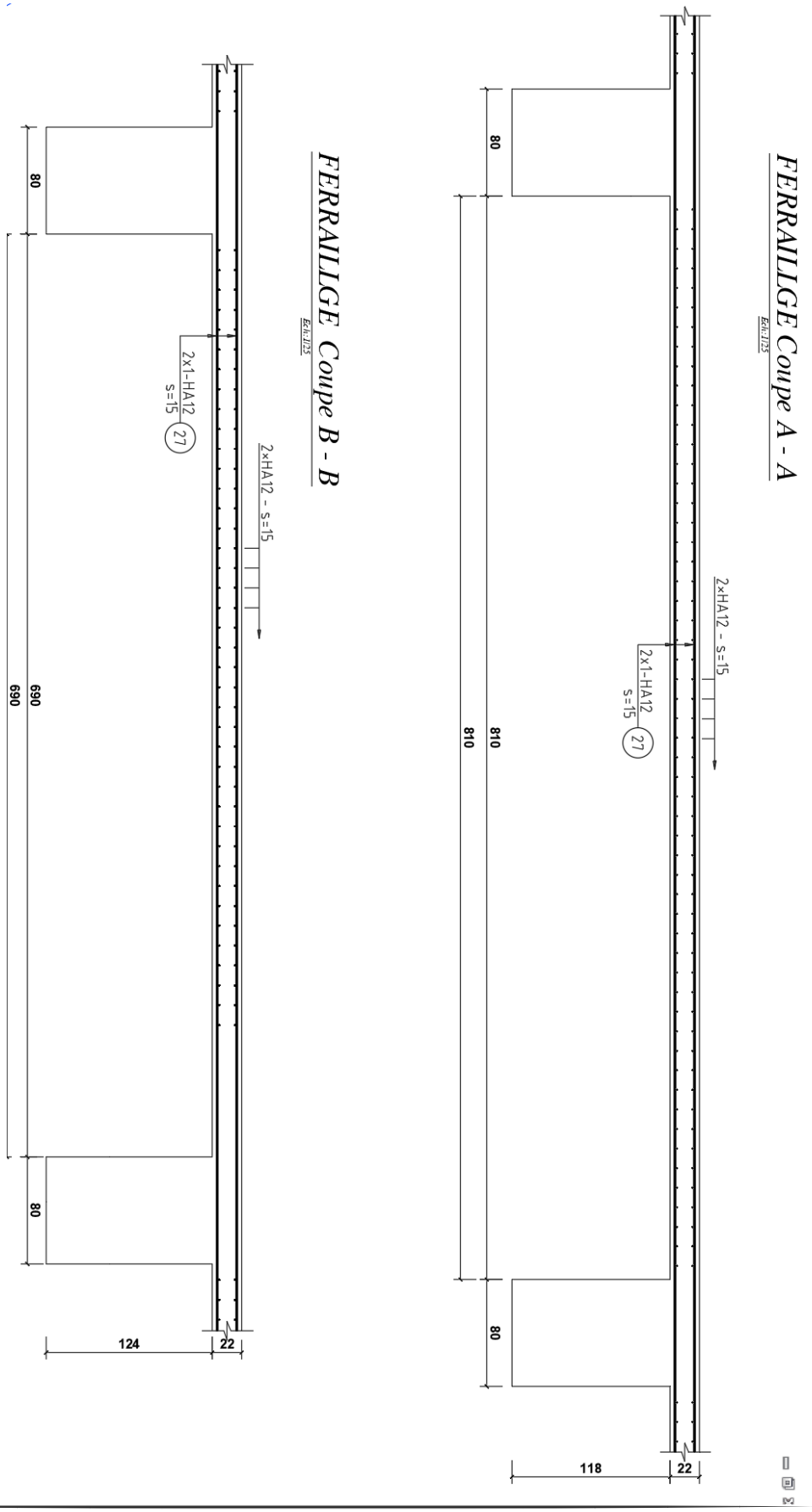


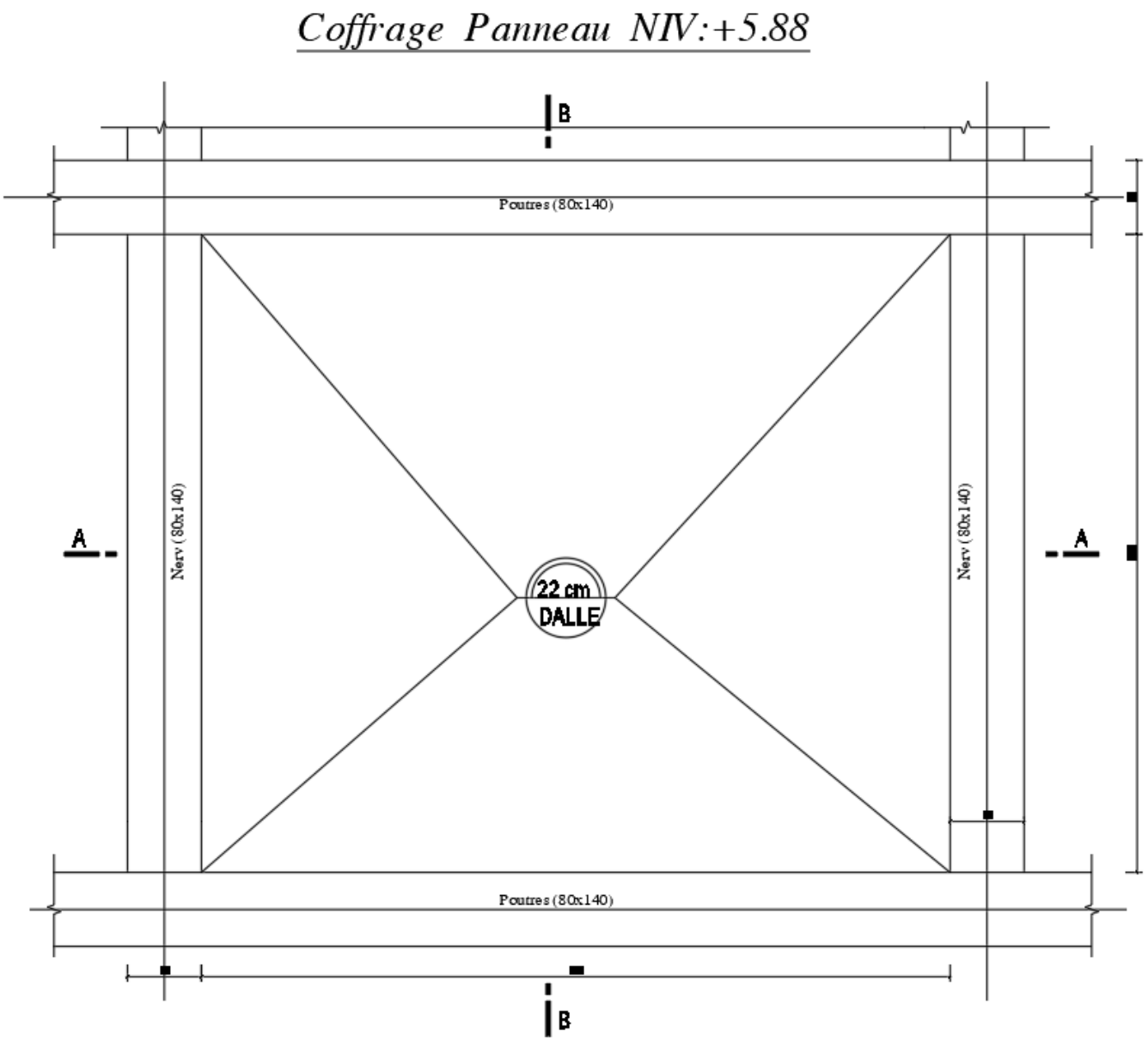
FERRAILLGE VOILE -3- (505cm x 30cm)

Ech:1/25



- **Croquis de ferraillage de la dalle 8.1x6.9**




Coffrage Panneau NIV:+5.88
B
Poutres (80x140)
A
Nerv (80x140)
22 cm
DALLE
Nerv (80x140)
A
Poutres (80x140)
B

```
import os
from utils import start_API
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from tqdm import tqdm

np.int = np.int32
np.float = np.float64
np.bool = np.bool_
import pygad
# %%
n_generations = 100
FEM_path = 'Model_faderco.sdb'
original_group_name = 'POSSIBLE SENSORS'
group_name = 'SENSORS'
population_size = 100
n_modes = 50
dof = 3
# %%
# FEM model path
FEM_full_path =os.path.dirname(__file__) + os.sep + FEM_path
print(FEM_full_path)
# Load the FEM model
print('Loading the FEM model...')
SapModel = start_API()
ret = SapModel.File.OpenFile(FEM_full_path)
if ret == 0:
    print('FEM model loaded successfully')
else :
    print('Something went wrong when opening the model')
print('=======================================')

# %%
# Get all the points
all_points = SapModel.PointObj.Count()
print('The total number of points in the model :', all_points)
print('=======================================')

# %%
# Get all the coords
x, y, z = 0, 0, 0
coord = []
for i in range(1, all_points+1):
        x, y, z, n = SapModel.PointObj.GetCoordCartesian(str(i + 1), x, y, z)
        coord = coord + [[i , x, y, z]]
```

```
# Get the possible sensor points in the model
levels = [3.81, 7.77, 11.73, 15.69, 19.65, 23.61, 27.57, 31.53, 34.71]
SapModel.SelectObj.Group(original_group_name, False)
SapModel.PointObj.SetGroupAssign(original_group_name, original_group_name,
True, 2)

for i in range(all_points):
    if coord[i][3] in levels:
        SapModel.PointObj.SetGroupAssign(str(i), original_group_name, False,
0)


# %%
SapModel.SelectObj.ClearSelection()
SapModel.SelectObj.Group(original_group_name, False)
NumberItems = 0
ObjectType = []
ObjectName = []
NumberItems, ObjectType, ObjectName, _ =
SapModel.SelectObj.GetSelected(NumberItems, ObjectType, ObjectName)
print('The number of possible positions of sensors :', NumberItems)
print('========================================')

# %%
print('Running the analysis. This may take a moment....')
print('========================================')

SapModel.Analyze.RunAnalysis()
SapModel.Results.Setup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput
SapModel.Results.Setup.SetCaseSelectedForOutput("MODAL")
# %%
NumberResults = 0
Obj = ""
Elm = ""
LoadCase = ""
StepType = ""
StepNum = []
U1 = []
U2 = []
U3 = []
R1 = []
R2 = []
R3 = []
print('Loading the analysis results.... This may take a while')
# Retrieve mode shape results
NumberResults, Obj, Elm, LoadCase, StepType, StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3,
n = SapModel.Results.ModeShape(
```

```
    original_group_name, 2, NumberResults, Obj, Elm, LoadCase, StepType,
StepNum, U1, U2, U3, R1, R2, R3
)
print('=======================================')

# %%
# Matrix with all DOFs and Modes
if dof == 6:
    PHI = np.array([U1,U2,U3,R1,R2,R3])

else:
    PHI = np.array([U1,U2,U3])
# Saving the array to a CSV file
np.savetxt('ALL_SENSORS_MODE_SHAPES.csv', PHI, delimiter=',')

PHI = np.loadtxt('ALL_SENSORS_MODE_SHAPES.csv', delimiter=',')

PHI = PHI.reshape((n_modes, dof, -1))
# Print the loaded array to verify
print('Number of modes :', PHI.shape[0])
print('Number of DOFs :', PHI.shape[1])
print('Number of Sensors possible possitions :', PHI.shape[2])
print('=======================================')

# %%
def MAC(phi_A, phi_B):
    # Ensure phi_A and phi_B are numpy arrays
    phi_A = np.array(phi_A)
    phi_B = np.array(phi_B)

    # Number of modes and measurement points
    n_modes_A, n_points_A = phi_A.shape
    n_modes_B, n_points_B = phi_B.shape

    # Initialize the MAC matrix
    MAC_matrix = np.zeros((n_modes_A, n_modes_B))

    # Compute the MAC values
    for i in range(n_modes_A):
        for j in range(n_modes_B):
            numerator = np.abs(np.dot(phi_A[i, :], phi_B[j, :]))**2
            denominator = (np.dot(phi_A[i, :], phi_A[i, :]) * np.dot(phi_B[j,
:], phi_B[j, :]))
            MAC_matrix[i, j] = numerator / denominator

    return MAC_matrix

def fitness_func(solution, solution_idx):
```

```
    solution = np.delete(solution, solution==-1)
    solution = np.unique(solution)
    phi = PHI[:, :, solution]
    mac = MAC(phi.reshape((n_modes, -1)), phi.reshape((n_modes, -1)))
    np.fill_diagonal(mac, 0)

    # Calculate the sum of non-diagonal elements
    sum_non_diagonal = np.sum(mac)
    num_parameters = len(solution)

    # Penalty for using more parameters
    penalty = num_parameters / num_genes  # Adjust this factor as needed
    fitness = 1 / np.sqrt(sum_non_diagonal) / (1 + penalty)

    # print("Sum of non-diagonal elements:", sum_non_diagonal)
    # print('Number of parameters:' ,num_parameters)
    # print('penalty :', penalty)
    # print('----------------------------------------')
    return fitness

# Create a custom initialization function for fixed-length solutions with
zeros for unused parameters
def custom_initialization(num_solutions, num_genes, init_range_low,
init_range_high):
    population = []
    for _ in range(num_solutions):
        solution = np.ones(num_genes, dtype=int) * -1
        num_active_genes = np.random.randint(1, num_genes + 1)
        active_positions = np.random.choice(range(num_genes),
num_active_genes, replace=False)
        active_values = np.random.choice(range(init_range_low,
init_range_high), num_active_genes, replace=False)
        solution[active_positions] = active_values
        population.append(solution)
    return np.array(population)
# %%
# Set up the genetic algorithm parameters
num_parents_mating = 10
sol_per_pop = 10
num_genes = NumberItems
init_range_low = 0
init_range_high = NumberItems
parent_selection_type = "sss"
keep_parents = 1
crossover_type = "single_point"
mutation_type = "random"
mutation_percent_genes = 20
```

```
progress_bar = tqdm(total=n_generations, desc='GA Progress')

def on_generation(ga_instance):
    # Update the progress bar
    progress_bar.update(1)

# Initialize the GA instance with a custom initialization function
ga_instance = pygad.GA(
    num_generations=n_generations,
    num_parents_mating=num_parents_mating,
    fitness_func=fitness_func,
    sol_per_pop=sol_per_pop,
    num_genes=num_genes,
    init_range_low=init_range_low,
    init_range_high=init_range_high,
    parent_selection_type=parent_selection_type,
    keep_parents=keep_parents,
    crossover_type=crossover_type,
    mutation_type=mutation_type,
    mutation_percent_genes=mutation_percent_genes,
    gene_type=int,
    save_best_solutions=True,
    on_generation=on_generation,
    initial_population=custom_initialization(population_size, num_genes,
init_range_low, init_range_high)
)
print('===============OPTIMIZATION========================')

# Run the genetic algorithm
ga_instance.run()
progress_bar.close()

# %%
solutions = ga_instance.best_solutions
print('=====================================')
final_solution = solutions[-1]
print('Final number of sensors :', len(np.unique(final_solution)))
row_counts = []
SQRT_MOC = []
for row in solutions:
    # Convert the row to a set to remove duplicates and then back to a list
    unique_row = list(set(row))
    # Count the elements that are not -1
    count_non_negative_ones = sum(1 for x in unique_row if x != -1)
    row_counts.append(count_non_negative_ones)

    solution = np.delete(row, row==-1)
    solution = np.unique(solution)
```

```
    phi = PHI[:, :, solution]
    mac = MAC(phi.reshape((n_modes, -1)), phi.reshape((n_modes, -1)))
    np.fill_diagonal(mac, 0)

    # Calculate the sum of non-diagonal elements
    sum_non_diagonal = np.sum(mac)
    sum_non_diagonal = np.sqrt(np.sum(mac))
    SQRT_MOC.append(sum_non_diagonal)

plt.plot(list(range(len(row_counts))), row_counts)
plt.xlabel('Generations')
plt.ylabel('Number of sensors')
plt.show()

plt.plot(list(range(len(SQRT_MOC))), SQRT_MOC)
plt.xlabel('Generations')
plt.ylabel('Fitness')
plt.show()

# %%
SapModel.SelectObj.Group(group_name, False)
SapModel.PointObj.SetGroupAssign(group_name, group_name, True, 2)

for i in np.array(ObjectName)[final_solution]:
    SapModel.PointObj.SetGroupAssign(i, group_name, False, 0)

# %%
```

```
#Importation des librairies

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

#Implantation de l'API fonctionnelle de Keras

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

#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('target.csv', header=None)
target = target.values
```

```
target = target.transpose()
target[:,1]

#Empilement des couches

input_layer = Input((65,))
output = Dense(500, activation='relu')(input_layer)
output = Dense(400, activation='relu')(output)
output = Dense(300, activation='relu')(output)
output = Dense(100, activation='relu')(output)
output1 = Dense(6, activation='softmax', name='cat')(output)
output3 = Dense(1, activation='linear', name='reg_lin')(output)
model = Model(input_layer, [output1])
m3 = Model(input_layer, output3)
model = Model(input_layer, [output1, output3])
model.summary()
m3.summary()

#Définition de la fonction get_targets

def get_targets(target):
  locations = target[:,0]
  severities = target[:,1]

  num_different_locations = len(set(list(locations)))
  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)

t1, t2, t3 = get_targets(target)
t1 = t1.transpose()
t2 = t2.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'}
m3.compile(optimizer='adamax', loss='mse', metrics=['mse'])
model.compile(optimizer='adamax', loss=loss2, metrics=['accuracy', 'mse'])

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

model.fit(inp, [t1, t3], batch_size=16, epochs=1000, verbose=2)
#model.fit(inp, [t1, t3], batch_size=16, epochs=100, verbose=2,
validation_data=(x_val, y_val))

#Evaluation des performances du modèle 4

c, r = model.predict(inp)
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, t1):
  t = np.argmax(t) + 1
  if p != t:
      print('not equal', p, t)
      ne += 1
print('evaluation: ', ne / len(r))
print('not equal: ', ne, 'and equal: ', (len(r) - ne))
```