

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Civil

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Civil

Techniques hybrides de détection de dommages basées sur l'intelligence Artificielle pour la surveillance de l'état structurel du barrage de Tabellout

Réalisé par : Laouar Anis

Sous la direction de :

Encadreur : Pr. N.BOURAHLA

Co-Encadreur: Dr.A.TADJADIT

Présenté et soutenu publiquement le 09/10/2024

Composition du jury :

Président Bourzam Abdelkrim Pr.ENP

Examinatrice Mme. D. CHERID M.C.A ENP

ENP 2024

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Civil

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Civil

Techniques hybrides de détection de dommages
basées sur l'intelligence Artificielle pour la
surveillance de l'état structurel du barrage de
Tabellout

Réalisé par : Laouar Anis

Sous la direction de :

Encadreur : Pr. N. BOURAHLA

Co-Encadreur : Dr.A.TADJADIT

Présenté et soutenu publiquement le 09/10/2024

Composition du jury :

Président Bourzam Abdelkrim Pr.ENP

Examinatrice Mme. D. CHERID M.C.A ENP

ENP 2024

Remerciement

Avant tout, je remercie le Bon Dieu qui a illuminé mon chemin et qui m'a armé de courage et de bonne volonté pendant tout mon cursus universitaire.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma sincère gratitude à mes encadreurs, Professeur A. TADJADIT et le Professeur N. BOURAHLA, pour avoir investi leur temps et m'avoir offert un soutien inestimable tout au long de mon projet de fin d'études.

A mes parents, envers qui j'exprime ma profonde gratitude pour la mise en œuvre de tous les moyens nécessaires à ma réussite, et leur soutien constant.

Je remercie également le jury, dont les remarques ont contribué à l'amélioration de ce travail, et plus particulièrement Madame D. Cherid et Monsieur A. Bourzam.

Je tiens également à remercier chaleureusement tous les professeurs du département de Génie Civil de l'École Nationale Polytechnique pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ma formation. Leurs qualités humaines et scientifiques méritent d'être saluées.

العنوان : تقنيات الذكاء الاصطناعي للكشف عن الاضرار الهيكلية لسد تابلوط

الملخص :

السدود تلعب دوراً حيوياً في ضمان إمداد المياه للسكان والزراعة ومع ذلك، قد تؤدي الظروف الزمنية أو الظروف الخارجية إلى تدهورها، مما يؤدي إلى انقطاع الخدمة أو مخاطر السلامة. يعتبر مراقبة أمراً حاسماً للتخفيف من هذه المخاطر. على الرغم من وجود مجموعة (SHM) الحالة الهيكلية متنوعة من تقنيات كشف الأضرار القائمة على الاهتزاز الهيكلي والذكاء الاصطناعي، إلا أن مراقبة الهياكل الكبيرة بشكل فعال لاكتشاف الأضرار المحددة الموقع تظل تحدياً. يهدف المشروع الحالي إلى استعراض تقنيات كشف الأضرار الناشئة وتنفيذ طريقة مختلطة قائمة على الذكاء الاصطناعي لمراقبة السدود، مع مراعاة التغيرات في مستوى المياه بفضل طريقة ويسترغارد للكتل المضافة.

سيقوم خوارزمية الأمثلة بتحديد نوع وعدد وموقع الأجهزة الاستشعارية. سيتم تقييم فعالية نظام المقترح بناءً على قدرته على كشف الأضرار وتحديد مواقعها وتقييم خطورتها، بغض النظر عن SHM مستوى المياه. يساهم هذا المشروع في تعزيز سلامة السدود من خلال تحسين الكشف المبكر عن الأضرار، مما يعتبر أمراً أساسياً لمنع الحوادث وضمان توفير إمدادات مستقرة من المياه للمجتمعات المحيطة.

الكلمات المفتاحية : السدود، المراقبة، المخاطر، الأضرار، الذكاء الاصطناعي، الماء ، الكتل المضافة

Title : Hybrid Artificial Intelligence Based Damage Indicator Techniques for Structural Health Monitoring of the Tabellout dam

Abstract :

Dams play a vital role in providing water supply for the population and agriculture. However, aging or external conditions can lead to their deterioration, causing service interruptions or safety risks.

Structural Health Monitoring (SHM) is crucial to mitigate these risks. Despite various techniques based on structural vibration and AI for damage detection, effectively monitoring large structures to detect localized damage remains challenging. The current project aims to review emerging damage detection techniques and implement a hybrid AI-based method to monitor dams, considering water level variations thanks to Westergaard's added masses method.

An optimization algorithm will determine the type, number, and location of sensors. Evaluating the effectiveness of the SHM system will be based on its ability to detect, locate, and assess the severity of damages, regardless of water level. This project contributes to enhancing dam safety by improving early detection of damages, essential for preventing incidents and ensuring stable water supply for surrounding communities.

Keywords : Dams, Monitoring, Risks, Damage, AI (Artificial Intelligence), Water , added masses

Titre : Techniques hybrides de détection de dommages basées sur l'intelligence artificielle pour la surveillance de l'état structural du barrage de Tabellout

Résumé :

Les barrages jouent un rôle vital en assurant l'approvisionnement en eau pour la population et l'agriculture. Cependant, le vieillissement ou les conditions externes peuvent les endommager, entraînant des interruptions de service ou des risques pour la sécurité.

La surveillance de l'état structural (SHM) est cruciale pour atténuer ces risques. Malgré l'existence de diverses techniques de détection de dommages basées sur la vibration ambiante et l'intelligence artificielle (IA), surveiller efficacement de grandes structures pour détecter des dommages localisés reste un défi. Le projet actuel vise à examiner les nouvelles techniques de détection de dommages et à mettre en œuvre une méthode hybride basée sur l'IA pour surveiller les barrages, en tenant compte des variations du niveau d'eau grâce à la méthode de Westergaard des masses ajoutées.

Un algorithme d'optimisation déterminera le type, le nombre et l'emplacement des capteurs. L'évaluation de l'efficacité du système SHM se fera en fonction de sa capacité à détecter les dommages, à les localiser et à évaluer leur gravité, quelle que soit le niveau d'eau. Ce projet contribue à renforcer la sécurité des barrages en améliorant la détection précoce des dommages, ce qui est essentiel pour prévenir les incidents et garantir un approvisionnement en eau stable pour les communautés environnantes.

Mots clés : Barrages, surveillance, risques , dommages ,IA (intelligence artificielle) , eau , masse ajoutée

Tables des matières

Liste des figures	
Introduction générale	14
CHAPITRE I Revue Bibliographique	
1.Introduction.....	17
2.Généralités sur les barrages et SHM	18
2.1.Définition d'un barrage	18
2.2.Fonctions d'un barrage.....	18
2.3.Elementes constitutifs d'un barrage	19
2.4.Choix du site de la retenue	19
2.5.Types de barrages.....	20
2.5.1.Matériau béton	20
2.5.2.Matériau remblais	21
2.6.Rupture et risques liés aux barrages	22
2.6.1.Les causes de ruptures d'un barrage	22
2.7.La surveillance de l'état de santé d'une structure SHM.....	23
2.7.1.Définition de la SHM	23
2.7.2.Etapes et composants d'un système de surveillance	24
2.7.3.Notion de dommage	25
2.7.4.Capteurs utilisés dans la SHM	26
2.7.5.Méthodes et techniques de la SHM	27
2.7.6.Surveillance dynamique des barrages	27
2.7.7.Surveillance des structures basées sur les vibrations.....	28
2.7.8.Méthode basée sur l'énergie de déformation modal.....	33
2.7.9.Méthode basée sur la variation de flexibilité	33
2.7.10.Méthode basée sur l'intelligence artificielle.....	34
2.8. Avantages de la SHM.....	35
2.9. SHM et fiabilité.....	36
3.Conclusion	37
CHAPITRE II : Modèle numérique et sensibilité au dommage	
1.Introduction.....	39
2.Présentation du barrage de Tabellout	39

3. Localisation du site du barrage	40
4. Caractéristiques techniques du barrage	41
5. Matériaux de constructions utilisés	41
6. Evaluation des fréquences propres du barrage	41
6.1. Par la méthode simplifiée (Méthode de Tardieu)	41
6.2. Par analyse modale du modèle 3d	43
6.2.1. Présentation du modèle 3d du barrage.....	43
6.2.2. Analyse modale du modèle 3d sans retenue.....	44
6.2.3. Méthode de Westergaard (masses ajoutées).....	46
6.2.4. Analyse modale du modèle 3d avec retenue.....	52
6.2.5. Répartition des contraintes sur le barrage.....	56
6.2.5.1. Cas Statique.....	56
6.2.5.2. Cas dynamique.....	57
7. Sélection des zones de dommages probables	60
8. Conclusion.....	61

CHAPITRE III : Optimisation du nombre et emplacement des capteurs

1. Introduction.....	63
2. Objectif du placement optimale des capteurs.....	63
3. Solutions proposées.....	64
3.1. Le critère d'assurance modale MAC.....	64
3.2. Méthode basée sur la flexibilité.....	64
4. Méthode d'optimisation.....	65
5. Algorithme génétique	65
5.1. Représentation de la solution	67
5.2. Définition de la population	67
5.3. Evaluation : calcul de la valeur du fitness.....	67
5.4. Sélection	68
5.5. Croisement et mutation	68
5.6. Prochaine génération	69
5.7. Solution finale.....	70
6. Etude de cas	71
6.1. Barrage vide.....	71

6.2. Barrage rempli	74
6.3. Analyse des résultats.....	77
6.4. Applications pour différents scénarios de dommages	78
6.5. Rappel des zones retenues.....	80
6.6. Endommagement total d'une zone.....	82
6.7. Endommagement total de toutes les zones.....	86
6.8. 50% d'endommagement pour toutes les zones.....	87
6.9. Endommagement partiel des 4 zones.....	88
6.10. Récapitulation des résultats.....	89
7. Conclusion.....	90
CHAPITRE IV : Identification des dommages par réseaux de neurones artificiels	
1. Introduction.....	92
2. Les réseaux de neurones	92
2.1. Réseau de neurone à 1 neurone	93
2.2. Réseau à plusieurs neurones	93
3. Apprentissage des réseaux de neurones.....	94
3.1. Apprentissage supervisé et non supervisé	94
4. Eléments pour l'entraînement d'un réseau de neurone.....	95
4.1. Fonction coût	95
4.2. Gradient descent	95
5. Détection de dommage à l'aide de réseau de neurones.....	96
5.1. Choix de l'entrée et de la sortie	96
5.2. Normalisation des données d'entrée et de sortie.....	97
5.3. Nombre de couches et nombre de nœuds par couche.....	98
6. Apprentissage des modèles choisis.....	101
7. Analyse des résultats.....	101
8. Conclusion.....	106
Conclusion générale.....	108
Références bibliographiques.....	110

Liste des figures

Figure 1 : Coupe schématique de la structure du barrage Saad El Kafara sur le wadi Garawi

Figure 2 : Barrage de Beni Haroun, Mila

Figure 3 : Site de construction d'un barrage

Figure 4 : Barrage Poids en béton

Figure 5 : Barrage voûte en béton

Figure 6 : Barrage à multi-voûtes Grandval France H=76m

Figure 7,8 et 9 : les types des barrages remblais

Figure 10 : Barrage à contreforts de Balavé (Burkina Faso)

Figure 11 : Composants essentielles de la SHM

Figure 12 : Risque de dommage d'un barrage

Figure 13 : Principe de fonctionnement des fibres à réseau de Bragg

Figure 14 : Principe de fonctionnement de la caméra

Figure 15 : fonctionnement d'un scanner laser

Figure 16 : Etapes de la SHM

Figure 17 : Qualité de la structure en fonction du temps de vie

Figure 58 : Barrage de Tabellout à Jijel

Figure 19 : Vue sur la retenue du barrage Tabellout

Figure 20 : Situation du barrage Tabellout

Figure 61 : Modèle pour résonateur simple à un seul degré de liberté.

Figure 22 : Modèle 3d du barrage vu coté aval

Figure 23 : Modèle 3d du barrage vu coté amont

Figure 24 : Masses ajoutées de Westergaard

Figure 25 : Etat des contraintes σ_{xx} sur le corps du barrage pour le chargement statique

Figure 26 : Etat des contraintes σ_{zz} sur le corps du barrage pour le chargement statique

Figure 27 : Etat des contraintes σ_{xx} sous excitation du séisme de Kobe

Figure 28 : Etat des contraintes σ_{zz} sous excitation du séisme de Kobe coté amont

Figure 29 : Etat des contraintes σ_{zz} sous excitation du séisme de Kobe coté aval

Figure 30 : Etat des contraintes σ_{xx} sous excitation du séisme de Imperial Valley

Figure 31 : Etat des contraintes σ_{zz} sous excitation du séisme de Imperial Valley

Figure 32 : Etat des contraintes σ_{zz} sous excitation du séisme de Imperial Valley en 2d

Figure 33 : Les zones retenues du coté amont du modèle 3d

Figure 34 : Les 4 zones retenues en vue 2d

Figure 35 : Procédure suivie par un algorithme évolutionnaire

Figure 36 : Etapes de l'algorithme génétique

Figure 37 : Les points candidats retenus

Figure 38 : les différents types de croisement

Figure 39 : les différents types de mutation

Figure 40 : schéma de l'élitisme, P : taille de génération, M : mutation, XO : Croisement

Figure 41 : schéma de la fusion

Figure 42 : 21 capteurs obtenus avec la méthode MAC

Figure 43 : nombre de capteurs et fitness en fonction du nombre de génération par le MAC

Figure 44 : 13 capteurs obtenus avec la méthode de changement de flexibilité

Figure 45 : nombre de capteurs en fonction du nombre de génération par la méthode de changement de flexibilité

Figure 46 : fitness en fonction du nombre de génération par la méthode de changement de flexibilité

Figure 47 : 30 capteurs obtenus avec la méthode MAC

Figure 48 : Nombre de capteurs en fonction du nombre de génération

Figure 49 : fitness en fonction du nombre de génération

Figure 50 : 11 capteurs avec la méthode de changement de flexibilité

Figure 51 : fitness et nombre de capteurs en fonction du nombre de génération

Figure 52 : La zone du pied amont sélectionnée

Figure 53 : La zone de la crête sélectionnée

Figure 54 : La zone du parement aval sélectionnée

Figure 55 : La zone du parement amont sélectionnée

Figure 56 : résultats du nombre de capteurs pour la sévérité 1%

Figure 57 : résultats du nombre de capteurs pour la sévérité 5%

Figure 58 : résultats du nombre de capteurs pour la sévérité 10%

Figure 59 : résultats du nombre de capteurs pour la sévérité 20%

Figure 60 : résultats du nombre de capteurs pour la sévérité 40%

Figure 61 : résultats du nombre de capteurs pour la sévérité 50%

Figure 62 : résultats du nombre de capteurs pour la sévérité 60%

Figure 63 : Configuration optimale des capteurs pour Endommagement total d'une zone

Figure 64 : Nombre de capteurs par sévérité pour chaque cas

Figure 65 : Configuration optimale des capteurs pour Endommagement total de toute les zones

Figure 66 : Nombre de capteurs par sévérité pour chaque cas

Figure 67 : Configuration optimale des capteurs pour ce cas

Figure 68 : Nombre de capteurs par sévérité pour chaque cas

Figure 69 : Configuration optimale des capteurs pour Endommagement partiel des 4 zones

Figure 70 : Configuration finale des capteurs

Figure 71 : Représentation simplifié d'un réseau de neurones

Figure 72 : Fonctionnement d'un neurone

Figure 73 : Exemple de fonction d'activation

Figure 74 : Réseau à plusieurs neurones

Figure 75 : comparaison entre l'apprentissage supervisé et non supervisé

Figure 76 : Exemple d'algorithme de minimisation

Figure 77 : Exemple de code pour la normalisation

Figure 78 : Exemple de code pour l'empilement des couches

Figure 79 : Nombre de couches et neurones pour le modèle 1

Figure 80 : Nombre de couches et neurones pour le modèle 2

Figure 81 : Nombre de couches et neurones pour le modèle 3

Figure 82 : Nombre de couches et neurones pour le modèle 4

Figure 83 : Précision du modèle 1 en fonction des Epochs

Figure 84 : résultat de la fonction coût au fil des epochs

Figure 85 : Précision du modèle 2 en fonction des epochs

Figure 86 : Fonction coût du modèle 2 en fonction des epochs

Figure 87 : Précision du modèle 3 en fonction des epochs

Figure 88 : Fonction coût du modèle 3 en fonction des epochs

Figure 89 : Fonction coût du modèle 4 en fonction des epochs

Figure 90 : Exemple du code pour le test du modèle

Figure 91 : Prédictions du modèle 4 sur les données test échantillon de 30 cas

Introduction générale

Introduction :

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet de fin d'étude proposé par le département de génie civil concernant la surveillance et contrôle de l'état structurel des barrages en utilisant des techniques hybrides basées sur l'intelligence artificielle en prenant en compte le niveau d'eau dans le réservoir.

Problématique :

Les barrages sont essentiels pour la sécurité publique et l'économie, car leur rupture pourrait entraîner des catastrophes majeures. Il est donc crucial de surveiller constamment leur stabilité et leur étanchéité pour assurer leur intégrité. L'augmentation des préoccupations, notamment après des séismes, a conduit au développement du "Structural Health Monitoring" (SHM), un domaine en forte croissance.

Le SHM utilise des technologies de Contrôle Non Destructif (CND) pour détecter les dégradations et prévenir les accidents, en prolongeant la durée de vie des structures. Cependant, les méthodes traditionnelles sont souvent limitées par la nécessité d'un accès facile et de mesures répétées.

Pour surmonter ces contraintes et évaluer la structure dans son ensemble, des techniques basées sur la réponse vibratoire ont été développées. Ces méthodes se fondent sur le fait que les paramètres modaux (fréquences, amortissement, modes propres) varient en fonction des propriétés physiques de la structure. La présence de dommages se traduit par une diminution de la rigidité, augmentant ainsi la flexibilité de la structure.

Objectif de l'étude :

Le but de ce travail est l'utilisation d'une technique hybride d'intelligence artificielle pour la détection de dommage au sein d'un barrage et ceci en utilisant une méthode d'identification basée sur la comparaison des matrices de flexibilité. Ces matrices sont calculées à partir des déformées modales du barrage, en comparant l'état initial (considéré sain) à l'état actuel, qui peut présenter des variations dues à des dommages localisés, cette méthode couplée à un algorithme génétique servira à déterminer une configuration de capteurs optimale selon le nombre et emplacement.

Ensuite, l'objectif sera de développer un réseau de neurones capable de prédire la localisation et l'ampleur des dommages potentiels.

Organisation de la thèse :

Ce travail se compose de quatre (04) chapitres.

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique qui présente les concepts généraux des barrages ainsi que la définition et méthodes relatif à la surveillance de santé des structures (SHM), les capteurs utilisés et l'importance de cette discipline pour la sécurité des barrages.

Le deuxième chapitre expose le modèle 3d du barrage de Tabellout, qui sera soumis à des analyse modales pour extraire les caractéristiques nécessaires à la détection des dommages et pour comparer les 2 états : barrage vide et rempli et enfin inclure l'influence de l'interaction fluide- structure dans le processus. Par la suite les zones à risques seront déterminées.

Le troisième chapitre concerne l'utilisation d'un algorithme génétique pour optimiser le nombre et emplacement des capteurs sur le barrage et déterminer la configuration optimale à utiliser pour la suite. Ainsi que la comparaison entre les 2 méthodes : MAC et variation de flexibilité pour choisir la plus adéquate.

Le quatrième chapitre est dédié à l'élaboration de réseaux de neurones capables de prédire la localisation et la sévérité de dommages à l'aide de la variation de la flexibilité et des fréquences propres.

Chapitre 1 :
Revue
Bibliographique

1.Introduction :

Les barrages jouent un rôle vital dans le soutien des économies en fournissant de l'eau pour l'irrigation, la production d'hydroélectricité et le contrôle des inondations. Cependant, la détérioration liée à l'âge, les événements climatiques extrêmes et d'autres facteurs peuvent compromettre leur intégrité structurelle. Les conséquences de défaillances dans ces structures peuvent être catastrophiques, entraînant non seulement des pertes économiques, mais aussi des vies humaines. Ainsi, la surveillance de la santé des barrages est cruciale pour évaluer en temps réel l'état structurel de ces ouvrages.

Le SHM (Structural Health Monitoring) émerge comme une solution essentielle pour garantir la stabilité et la sûreté des barrages en béton. Grâce à des systèmes de capteurs avancés et à des techniques d'analyse de données, il permet une surveillance continue et précise de l'intégrité structurelle des barrages. En détectant les signes précurseurs de détérioration ou d'anomalies, le SHM offre la possibilité d'intervenir proactivement avant qu'une défaillance ne se produise, minimisant ainsi les risques pour les populations et les biens situés en aval.

Dans ce qui suit, nous explorerons plus en détail les fondements et les applications du Structural Health Monitoring (SHM) dans le contexte des barrages. Nous commencerons par examiner les généralités sur les barrages, comprenant leur importance socio-économique et les risques associés à leur défaillance. Ensuite, nous plongerons dans la définition du SHM, en décrivant ses objectifs principaux ainsi que les principes de base qui sous-tendent cette discipline. Nous aborderons également les techniques et les outils utilisés dans le SHM des barrages, en mettant en lumière les capteurs, les systèmes de surveillance, et les méthodes d'analyse de données qui permettent une évaluation précise de l'état structural des ouvrages. En comprenant ces aspects fondamentaux du SHM, nous serons mieux équipés pour appréhender son rôle crucial dans la préservation de la sûreté et de la fonctionnalité des barrages.

2. Généralités sur les barrages :

2.1. Définition d'un barrage :

Un barrage désigne toute construction érigée en travers d'un cours d'eau ou fermant une dépression dans le but de retenir de l'eau. Son objectif peut être de stocker cette eau pour une durée déterminée en fonction de son utilisation, et/ou de créer une chute d'eau.

L'un des barrages les plus anciens remonte à l'Égypte antique 2600 av. JC : le barrage de **Saad El Kafara** (Figure 1) de 14m de hauteur, 113m de longueur et créant une retenue d'environ 50 000m³ (Le Delliou 2003). Sa structure était constituée d'une partie centrale en tout venant imperméable avec deux épaulements en enrochement. Il a été détruit par submersion au cours de sa construction à cause de l'absence d'un évacuateur de crue. [1]

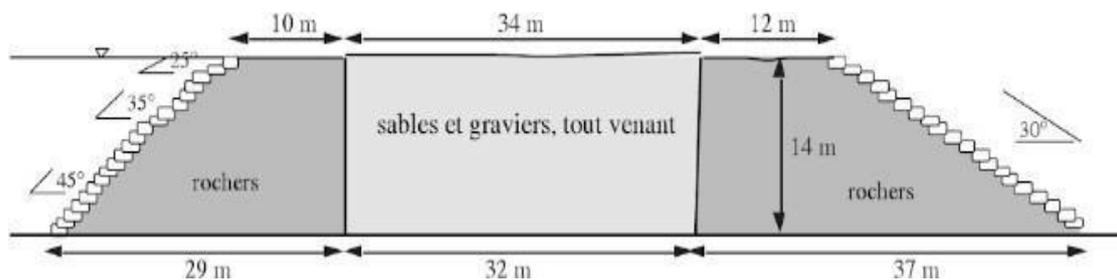


Figure 1: Coupe schématique de la structure du barrage Saad El Kafara sur le wadi Garawi

2.2. Fonctions d'un barrage :

Les barrages remplissent diverses fonctions, mais leur objectif principal est de retenir l'eau. Leur construction est dictée par des besoins variés tels que l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable, l'industrie, la production d'énergie électrique, la prévention des inondations, la pisciculture.

[1]



Figure 2 : Barrage de Beni Haroun, Mila

2.3. Elements constitutifs d'un barrage :

Selon le type d'utilisation auquel il est destiné, le barrage pourra comprendre :

- Le **réservoir du barrage** : il s'agit de toute l'aire en amont barrée par l'ouvrage dont on accumule l'eau
- Le **corps du barrage** : il s'agit de l'ouvrage en béton, en enrochement ou en terre qui barre le passage du cours d'eau ;
- L'**évacuateur de crues** qui draine le surplus d'eau du réservoir lors d'une crue ;
- Les **ouvrages de prise d'eau** ;
- Les **ouvrages de contrôle** ;
- Les **ouvrages de drainage du corps du barrages** ;
- Les **machines hydrauliques et hydroélectriques** (vannes de fond, turbines....) ;
- Les **ouvrages de dissipation d'énergie en aval**. [3]

2.4.Choix du site de la retenue :

Le choix du site d'une retenue dépend de plusieurs conditions qui sont :

- Conditions sociologiques : L'implantation d'une retenue modifie beaucoup des conditions sociologiques de la région (nombre d'habitant, Lavage et nettoyage, agriculture, infrastructure,...)
- Conditions hydrologiques : l'apport d'eau doit être suffisant pour répondre aux besoins du consommateur.
- Conditions topographiques : Choisir la section en travers de l'oued la plus étroite possible, représentée sur la carte topographique.
- Conditions géotechniques : Ces conditions relèvent de la résistance des matériaux à la compression et à la traction (comportements sol digue).
- Conditions économiques : réalisation d'une étude technico économique. [2]

D'une autre part, le choix du type de barrage sera un compromis (accord) entre les différents aspects suivants : disponibilité de matériaux à proximité et hydrologie, pour aboutir au meilleur choix économique.[1]



Figure 3 : Site de construction d'un barrage

2.5. Types de Barrage :

2.5.1. Matériau : Béton

Ils sont divisés en 2 classes principales : barrage **poids** et barrage **voûte**.

- **Barrage Poids** : Comme son nom l'indique, ce type de barrage oppose son poids à l'eau pour la retenir. En fonction des propriétés de résistance du matériau, la forme triangulaire à l'aval de l'ouvrage s'est peu à peu imposée.[3]

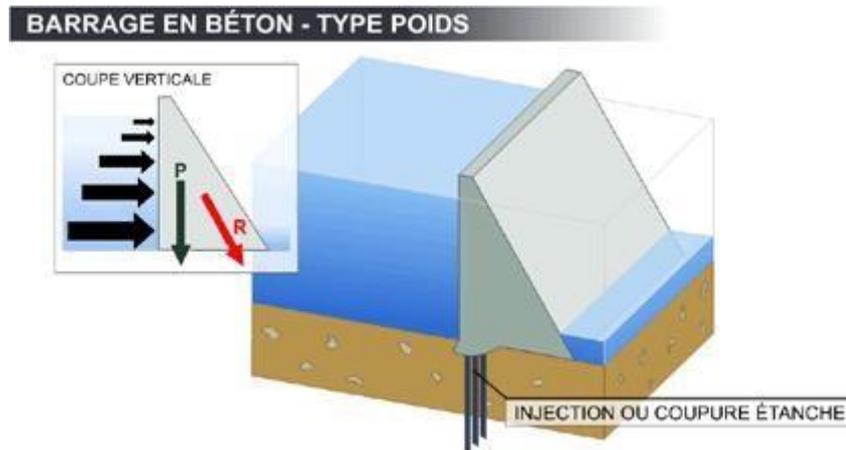


Figure 4 : Barrage Poids en béton

- **Barrage voûte** : il représente l'ultime aboutissement de l'utilisation des propriétés du béton en termes de résistance. Il permet des économies de volume d'au moins 30 % par rapport à un barrage-poids. L'effort de résistance est en partie reporté par l'arc central sur les rives, permettant de construire des ouvrages moins volumineux, à performance égale. En revanche, les fondations, sur lesquelles se reporte une grande partie de l'effort, doivent posséder des caractéristiques mécaniques élevées afin de supporter celui-ci.[3]

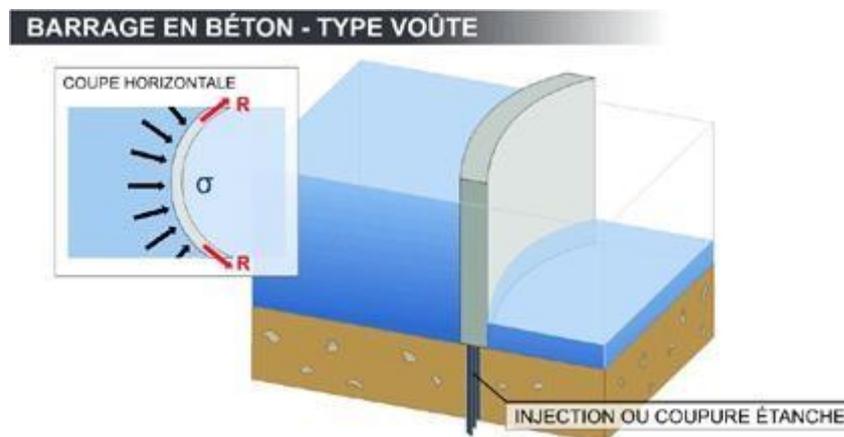


Figure 5 : Barrage voûte en béton

- **Barrages à contrefort et à voûte multiple :**

Les autres formes de barrages sont des variantes des deux premiers types. Le barrage à contrefort est ainsi un barrage poids allégé de l'intérieur. Le barrage à voûtes multiples, quant à lui, repose sur des appuis intermédiaires, lorsqu'une trop grande portée sépare les deux rives d'un cours d'eau.[3]

2.5.2.Matériau : Remblais

Les barrages en terre présentent notamment l'avantage de pouvoir reposer sur des fondations de médiocre qualité, c'est-à-dire compressibles. Tous les barrages en terre peuvent être considérés comme des barrages-poids, c'est-à-dire qu'ils résistent à la pression de l'eau par leur propre poids. C'est ce qui explique leur section de forme trapézoïdale. On en trouve de trois types : [3]

- **Barrage homogène :** est constitué d'un même matériau à dominance argileuse, relativement imperméable

- **Barrage à noyau :** Le noyau au centre de l'ouvrage va être constitué de la terre la plus imperméable possible. Il sera tenu de part et d'autre par des recharges composées, selon les cas, de terre plus perméable, d'alluvions ou d'enrochements.

- **Barrage à masque :** Il peut aussi exister des sites où aucune terre n'est disponible, mais seulement des enrochements. Ceux-ci sont alors employés pour réaliser le corps du barrage, tandis que l'étanchéité est assurée par un masque de béton.



Figure 6: Barrage à multi-voûtes Grandval France H=76m

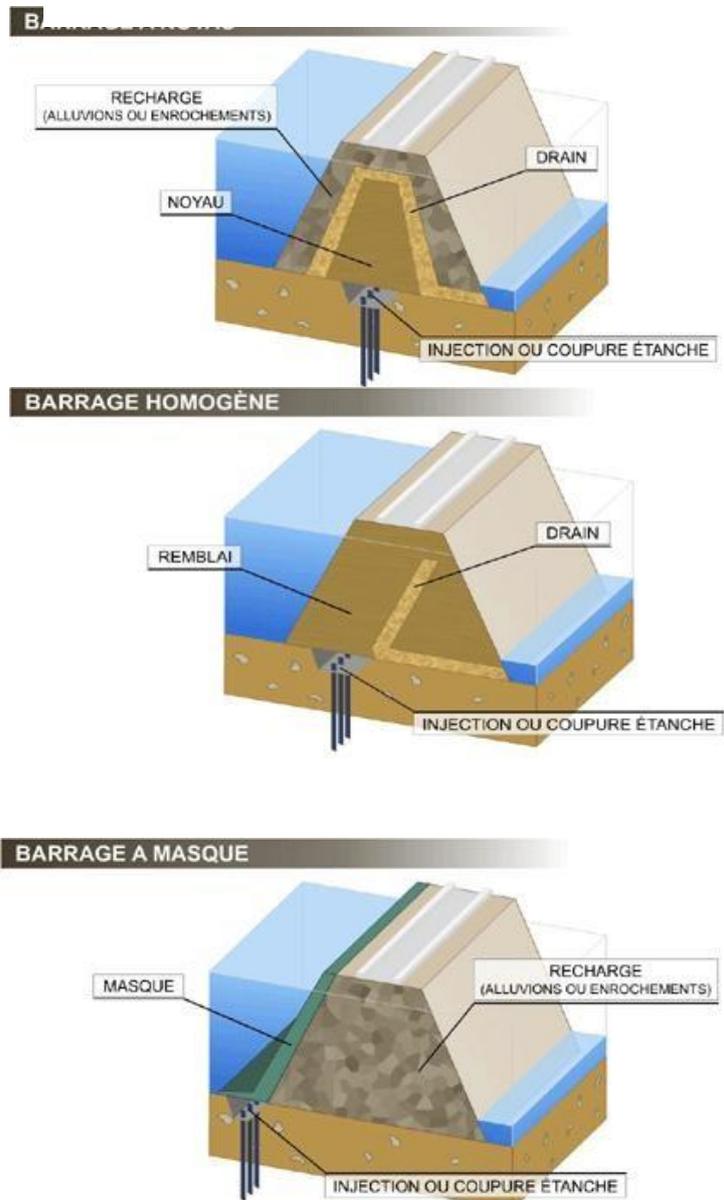


Figure 7,8 et 9 : les types des barrages remblais

2.6. Ruptures et risques liés aux barrages :

Les barrages sont des structures hydrauliques souvent massives, d'une complexité considérable dans leur conception, leur construction et leur maintenance. Leur défaillance, qu'elle soit partielle ou totale, entraîne invariablement des catastrophes à toute les échelles. Un exemple marquant est l'accident survenu en Algérie concernant le **Barrage de Fergoug** : Le barrage a subit successivement deux crues importantes qui dépassent la lame de dimensionnement ce qui a causé de sérieux dégâts, y compris une rupture partielle de l'évacuateur de crue.[1]



Figure 10 : Barrage à contreforts de Balavé (Burkina Faso)

2.6.1. Les causes de ruptures d'un barrage :

I. Problèmes techniques :

La rupture d'un ouvrage peut résulter de problèmes techniques variés, tels que des défaillances dans le fonctionnement des vannes, des erreurs de conception dans la construction, des choix inadaptés de matériaux ou de type de barrage, des complications liées aux fondations, ou encore l'impact de l'âge de la structure. Néanmoins, les progrès continus dans les techniques de construction ont considérablement amélioré la sécurité des barrages modernes.

II. Causes naturelles :

Les catastrophes naturelles peuvent aussi être responsables de la rupture des barrages comme des crues exceptionnelles, dépassant les prévisions de conception des évacuateurs de crues, peuvent exercer une pression dévastatrice. Les glissements de terrain représentent une menace, pouvant affecter directement la structure des barrages en remblai ou les terrains adjacents, entraînant une instabilité des talus ou une submersion. De plus, les séismes sont une source de préoccupation, car même si le risque est faible, ils peuvent causer des dommages significatifs.

III. Causes humaines :

Les accidents dus à des facteurs humains peuvent découler de plusieurs sources : des études préliminaires insuffisamment approfondies, un contrôle de l'exécution négligent, des erreurs dans les opérations d'exploitation, un manque de surveillance et de maintenance, ou même des actes de sabotage délibérés.

Tableau 1: Quelques barrages construits en Algérie [1]

Barrages	Villes	Années	Hauteur (m)	Capacité (Mm ³)	Type
Mefrouche	Tlemcen	1962	32	15	Voûtes Multiples
Fergoug	Mohamadia	1871/1935	44	32	Terre
Beni Haroun	Mila	2003	118	960	Poids

2.7.La surveillance de l'état de santé d'une structure SHM:

Il est crucial de maintenir la sécurité et la fiabilité des infrastructures civiles pour assurer le bien-être de tous. Cela implique de surveiller attentivement l'intégrité structurelle, notamment l'impact de facteurs tels que l'âge, l'utilisation et la résistance à des forces exceptionnelles telles que les charges excessives ou les séismes.

Cette surveillance, souvent appelée surveillance de la santé structurelle SHM, est essentielle pour évaluer les dommages potentiels et garantir la performance durable des ouvrages, notamment des barrages, qui sont particulièrement exposés à des contraintes sévères.

2.7.1.Définition de la SHM (Structural Health Monitoring):

La surveillance de la santé structurelle (SHM) est un processus qui utilise des capteurs in situ et des analyses pour détecter, localiser et évaluer les dommages dans une structure, ainsi que pour estimer sa durée de vie résiduelle.

Cette approche, bien que relativement nouvelle en génie civil, s'appuie sur des pratiques d'évaluation de l'état de santé existantes, en intégrant des technologies innovantes telles que les capteurs et la modélisation. Les informations recueillies par la SHM peuvent être utilisées pour la maintenance, l'évaluation de la sécurité, la réparation et le renforcement des structures existantes, ainsi que pour la gestion des structures historiques.

Son objectif principal est l'identification des dommages et la garantie de la sécurité structurelle à long terme.

Il existe principalement quatre niveaux dans l'identification des dommages [6] :

Niveau 1 : Détermination de la présence de dommages dans la structure.

Niveau 2 : Niveau 1 + détermination de l'emplacement géométrique des dommages.

Niveau 3 : Niveau 2 + quantification de la gravité des dommages.

Niveau 4 : Niveau 3 + prédiction de la durée de vie restante de la structure.

2.7.2.Étapes et composants d'un système de surveillance structurale :

En ce qui concerne la SHM, examinons les éléments clés de son processus. Il comprend plusieurs étapes essentielles : [9]

(i) **L'évaluation opérationnelle** , elle comprend :

1- La définition des **dommages**, c'est-à-dire dans quelles conditions il est considéré comme endommagé ;

2- Les problèmes économiques ;

3- La gestion des données

4- les contraintes environnementales ou opérationnelles

(ii) **L'acquisition, et nettoyage des données (DAQ)**, Elle se concentre sur la détermination de la méthode de mesure, tels que la contrainte, le déplacement, l'accélération, la température, la vitesse du vent, le placement des capteurs et autres problèmes connexes. Elles traitent également des différentes méthodes d'excitation possibles pouvant être déployées, telles que l'excitation ambiante, les vibrations forcées ou l'excitation locale, ainsi que le type de transmission des données, tel que filaire ou sans fil.

(iii) **L'extraction et la synthèse des paramètres et caractéristiques recherchés**, elle utilise divers méthodes comme les fréquences de résonance, la fonction de réponse en fréquence, les formes modales l'énergie de déformation interne, la variation de flexibilité , l'amortissement, les vecteurs de Ritz...

(iv) **Le développement de modèles statistiques pour identifier les caractéristiques pertinentes**, ils impliquent 2 méthodes : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé. L'apprentissage supervisé comprend le discriminant de Fisher, les algorithmes génétiques... L'apprentissage non supervisé comprend l'analyse des diagrammes de contrôle, la détection des valeurs aberrantes et les tests d'hypothèses. Les réseaux de neurones pour les 2.

Les composants essentiels de la SHM sont les suivants : [9]

(1) **Capteurs** : Il existe différents types de capteurs en fonction de la topographie, de l'évolutivité, etc.

(2) **Acquisition de données** : Cela dépend du type d'acquisition de données utilisé, qu'il s'agisse de capteurs sans fil ou filaires, etc.

(3) **Système de communication** : Il peut être réalisé soit en utilisant la fréquence radio, soit en utilisant un intranet.

(4) **Traitement des données** : Il s'agit de l'analyse statistique des données collectées.

(5) **Stockage des données** : Cela nécessite également le diagnostic des données et leur récupération.

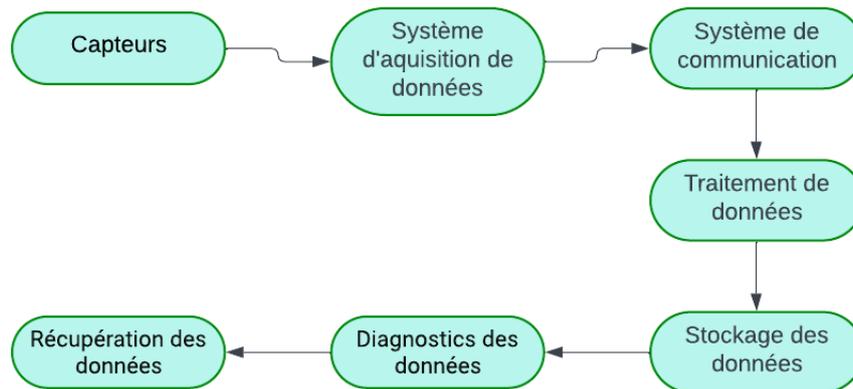


Figure 11 : Composants essentielles de la SHM

2.7.3. Notion de Dommage :

Il est défini comme tout changement affectant négativement les propriétés matérielles ou géométriques d'un système, ainsi que ses conditions de fonctionnement, pouvant entraîner une détérioration de sa performance. L'évaluation du dommage implique de répondre à plusieurs questions clés : existe-t-il un dommage ? Où se situe-t-il ? Quel est son type et sa gravité ? Combien de temps de vie reste-t-il ? Ces réponses sont obtenues grâce à des outils et méthodes d'évaluation non destructifs.

Le SHM vise à détecter ces dommages, tandis que la surveillance de l'utilisation permet de détecter les changements dans la réponse du système avant les dommages. Le pronostic combine ces informations pour estimer l'état restant et la durée de vie utile. Les dommages sont distincts des défaillances, car ils n'entraînent pas une perte totale de fonctionnalité, mais plutôt une dégradation des performances. Le but du SHM est d'éviter les défaillances en surveillant les dommages et en agissant préventivement.

Les dommages à une infrastructure civile et structurelle peuvent se manifester à deux échelles de temps : à court terme et à long terme. Les dommages à long terme, tels que la corrosion et la fatigue, se développent progressivement, tandis que ceux à court terme, comme les charges d'impact ou les chocs, peuvent se produire soudainement. [9]

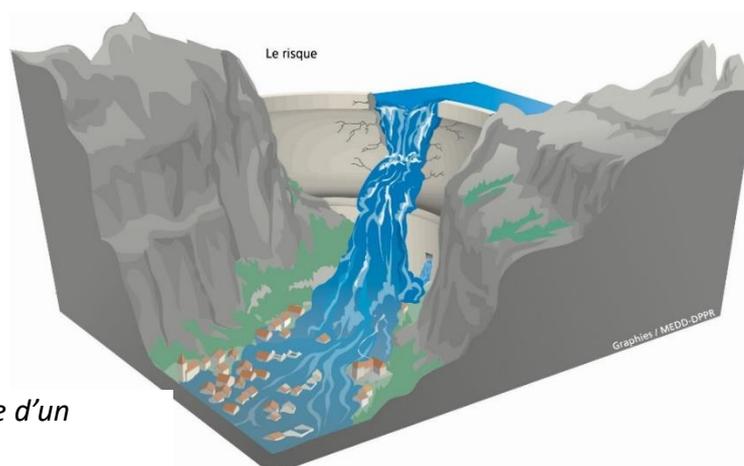


Figure 12 : Risque de dommage d'un barrage

2.7.4. Capteurs utilisés dans la SHM :

(a) Capteurs de fibres à réseau de Bragg: Ces capteurs, intégrés dans les structures, sont constitués d'une région dans laquelle l'indice de réfraction de la fibre est périodiquement modifié. Cela crée un réseau de réflexion qui agit comme un filtre optique.

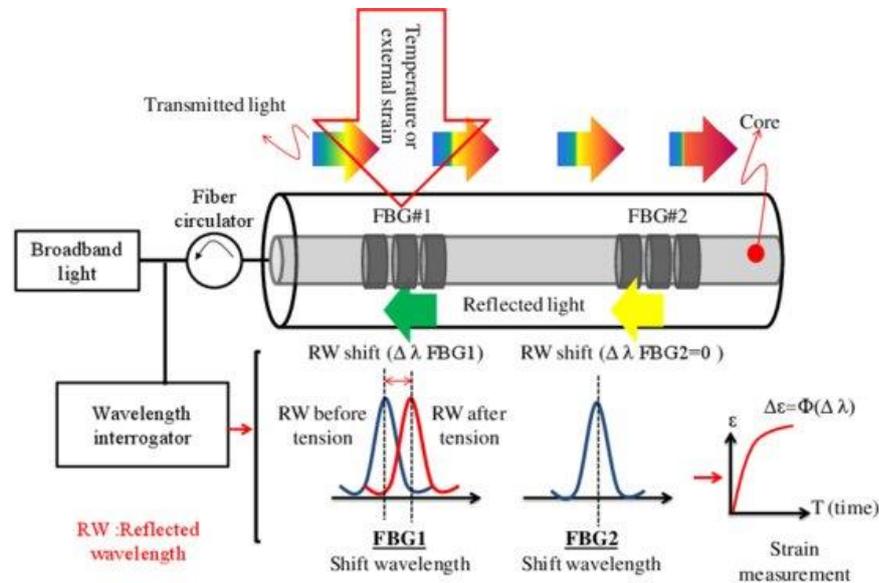


Figure 13 : Principe de fonctionnement des fibres à réseau de Bragg

Déformation de la fibre : Lorsque la fibre subit une déformation mécanique, telle qu'une contrainte ou une déformation thermique, la période du réseau de Bragg change. Cette variation de la période induit un décalage dans la longueur d'onde de la lumière réfléchie.

Mesure du décalage de longueur d'onde : Un détecteur mesure le décalage de longueur d'onde, qui est directement lié à la déformation subie par la fibre. [5]

(b) Capteurs d'émission acoustique : Ces capteurs détectent les fissures ou les défauts locaux en se basant sur les signaux acoustiques générés par leur présence, utiles pour mesurer la délamination des fibres ou la rupture.

(c) Capteurs intelligents ou revêtements de capteurs : Ils sont appliqués en surface et intègrent des éléments piézoélectriques ou ferroélectriques pour mesurer les variations de contrainte, parfois utilisant des nanotubes de carbone. Une analyse spectroscopique est nécessaire pour traiter ces variations dues aux dommages locaux.

(d) Capteurs micro-ondes : Ils détectent l'humidité lorsqu'ils sont intégrés aux structures, particulièrement efficaces dans les composites.

(e) Capteurs ultrasonores d'imagerie : Ces capteurs contiennent un transducteur d'ondes ultrasonores qui, en générant un signal traversant le matériau, indique les défauts, fissures ou autres dommages locaux par changement de réflexion.[9]

2.7.5.Méthodes et techniques de la SHM :

La méthode traditionnelle d'évaluation de l'intégrité des barrages repose sur des inspections visuelles effectuées par des ingénieurs expérimentés, qui recommandent ensuite des actions correctives. Cependant, ces inspections présentent des lacunes telles qu'une demande en main-d'œuvre élevée, une fréquence insuffisante et l'inaccessibilité des parties critiques de la structure.[4]

Après une évaluation initiale de l'emplacement des dommages, des techniques de détection localisée telles que l'acoustique, l'ultrason, la radiographie, les courants de Foucault, la thermographie, le champ magnétique ou l'impédance électromagnétique peuvent être employées pour localiser et évaluer plus précisément les dommages et sont considérées comme des méthodes non destructives. Dans certains cas, des échantillons peuvent être prélevés sur la structure et analysés en laboratoire.

Cependant, cette approche dépend de l'accessibilité des emplacements à inspecter, ce qui peut parfois être difficile aussi cette procédure de surveillance de la santé peut être coûteuse et fastidieuse, et la fiabilité de l'inspection visuelle dépend fortement de l'expérience de l'inspecteur.[6]

Pour surmonter ces lacunes, les tests sur site à pleine échelle sont couramment utilisés pour évaluer les propriétés statiques et dynamiques de la structure dans des conditions réelles.

Dans l'approche de surveillance dynamique, les réponses structurales sous forme d'accélération dues aux vibrations sont mesurées. Les accélérations sont obtenues à l'aide de tests de **vibration forcée** ou de tests de **vibration ambiante**. Les propriétés dynamiques (fréquences naturelles, formes modales et l'amortissement) peuvent alors être extraites des accélérations à l'aide de techniques d'analyse modale. [4]

2.7.6.Surveillance dynamique des barrages :

Selon les recommandations du CIGB (la Commission International des Grands Barrages), il est essentiel d'évaluer la performance des barrages face aux vibrations, qui peuvent être causées par divers facteurs tels que le vent, les vagues d'eau et les mouvements du sol. Ces vibrations influent sur des propriétés clés de la structure, telles que sa rigidité et son amortissement. Bien que ces caractéristiques puissent être modélisées grâce à des méthodes par éléments finis, il est crucial de vérifier leur comportement réel sur site à l'aide de tests. Ces tests permettent d'estimer des paramètres dynamiques tels que les fréquences de résonance, le coefficient d'amortissement et les formes modales.

Deux principaux types de tests sur site sont couramment utilisés pour évaluer le comportement des barrages face aux vibrations : le test de **vibration forcée (FVT)** et le test de **vibration ambiante (AVT)**. [4]

1/-Test de vibration forcée :

Dans les tests de vibration forcée, les barrages sont soumis à des excitations mécaniques à l'aide de vibreurs, tandis que les réponses aux vibrations sont mesurées à l'aide d'accéléromètres. Le signal de force agit comme référence pour tous les signaux de réponse, permettant l'extraction des propriétés dynamiques du barrage à l'aide de fonctions de réponse en fréquence (FRF).

Ces tests ont été parmi les premiers à être réalisés sur site pour comprendre le comportement dynamique des barrages, ainsi que pour valider et calibrer les modèles numériques.

2/-Test de vibration ambiante :

Dans les régions éloignées où l'accessibilité peut être un défi et le transport des vibreurs mécaniques coûteux, le test de vibration ambiante (AVT) devient souvent la seule option pratique pour effectuer des tests dynamiques sur les barrages. Connu également sous le nom d'analyse modale opérationnelle, l'AVT mesure uniquement les réponses de la structure et utilise les forces environnementales telles que le vent et les mouvements du sol pour exciter la structure.

Contrairement au test de vibration forcée, où le signal de force est utilisé comme référence, l'AVT utilise le signal de réponse mesuré à un ou plusieurs points pour estimer les propriétés dynamiques. L'AVT présente des avantages tels que son coût moindre et le fait que la structure est testée dans des conditions de fonctionnement réelles. Les avancées dans l'acquisition de données et les méthodes d'analyse des signaux ont renforcé l'attrait de l'AVT dans la surveillance de la santé des barrages.[4]

2.7.7.Surveillance des structures basée sur les vibrations:

Les méthodes de Surveillance de la Santé des Structures (SHM) ont été développées sur de nombreuses années, avec une prédominance des approches basées sur les vibrations. Leur objectif est de détecter les dommages structurels, de localiser leur position et leur gravité, d'évaluer la sécurité et la durée de vie restante des structures, et de guider les décisions de maintenance, lorsque cela est possible.

Les paramètres modaux mesurés lors de ces tests (fréquences propres, amortissements et déformées modales) dépendent des propriétés physiques de la structure (rigidité, masse, amortissement) aussi le changement des caractéristiques de vibration mène au changement dans les paramètres physiques de la structure induit par le dommage permettant ainsi de le détecter. Récemment, avec le développement rapide de l'informatique moderne et les progrès de la technologie des capteurs et le traitement du signal, les signaux de test peuvent être analysés et traités de manière précise et rapide.

Les techniques de surveillance de l'état structural basées sur les vibrations se divisent généralement en trois catégories en fonction des paramètres de vibration utilisés : les approches dans le domaine fréquentiel, temporel et temps-fréquence. [7]

➤ **Méthodes du domaine fréquentiel :**

Dans les méthodes de domaine fréquentiel pour la surveillance de l'état structural basée sur les vibrations, les paramètres modaux tels que la fréquence, la forme modal...sont couramment utilisés. De plus, plusieurs paramètres associés à la fonction de réponse en fréquence (FRF) sont également largement adoptés.

Comparées aux méthodes de domaine temporel et de domaine temps-fréquence, les méthodes de domaine fréquentiel offrent une plus grande polyvalence, car les propriétés de la structure dans ce domaine sont plus stables. Même face à des variations importantes des conditions de charge, les propriétés dynamiques extraites demeurent presque constantes et dépendent uniquement de la structure elle-même. Cependant, il est important de noter que la mise en œuvre des algorithmes pour extraire ces propriétés peut être complexe et parfois chronophage.

a)-Fréquences et formes modales :

Les fréquences et les formes modales sont les paramètres modaux les plus fréquemment utilisés dans les méthodes de SHM. En cas de dommages structuraux, les fréquences ont tendance à diminuer, avec une réduction légère pour les fréquences basses et plus significative pour les fréquences élevées. De plus, les changements de température peuvent également affecter les fréquences naturelles de la structure.[7]

Les dommages sont un phénomène local et peuvent ne pas influencer de manière significative le comportement global de réponse en basses fréquences des structures généralement mesurées lors des tests de vibration. Par conséquent, des niveaux de dommages élevés sont souvent nécessaires pour des décalages de fréquence perceptibles (Doebling et al, 1998 ; Salawu, 1997 ; Sohn et al, 2003) [10]

Bien que les fréquences seules ne permettent pas d'identifier précisément les dommages locaux, elles sont souvent combinées avec les formes modales, plus sensibles aux dommages locaux et fournissant des informations sur leur emplacement. Les formes modales extraites pendant la surveillance sont comparées à celles de l'état non endommagé, et des indices de dommage tels que MAC et COMAC sont utilisés pour localiser et évaluer les dommages locaux :

$$MAC(\varphi_i^u, \varphi_i^d) = \frac{[(\varphi_i^u)^T \varphi_i^d]^2}{[(\varphi_i^u)^T \varphi_i^u][(\varphi_i^d)^T \varphi_i^d]}$$
$$COMAC(\varphi_i^u(x_j), \varphi_i^d(x_j)) = \frac{(\varphi_i^u(x_j)\varphi_i^d(x_j))^2}{(\varphi_i^u(x_j))^2(\varphi_i^d(x_j))^2}$$

où φ_i^u et φ_i^d sont les ièmes formes modales non endommagées et endommagées, x_j est la coordonnée du j ème point. Il est observé que lorsque φ_i^d correspond exactement à φ_i^u , la valeur MAC doit être de 1, donc une valeur MAC proche de 1 indique que la structure est toujours en bon état, mais une valeur nettement inférieure à 1 signifie que la structure est endommagée. Comparé à MAC, COMAC contient des informations sur l'emplacement, sa valeur à x_j proche de 1 indique que la structure est toujours intacte à x_j et si c'est nettement inférieure à 1 signifie que la structure est endommagée à x_j .

De nombreuses recherches ont été menées pour identifier les dommages locaux en combinant les fréquences et les formes modales, car ces paramètres fournissent à la fois des informations globales et locales sur les structures, des améliorations ont été proposées pour permettre leur application pratique réussie.

Une approche prometteuse consiste à construire de manière plus précise et la mise à jour des modèles par éléments finis (FE) est largement utilisée, cette méthode consiste à comparer les fréquences et les formes modales obtenues par le modèle FE aux mesures effectuées par le système de surveillance pour détecter les dommages locaux. Ensuite, la matrice de raideur du modèle est mise à jour afin d'obtenir des fréquences et des formes modales correspondant aux mesures. Enfin, cela permet d'obtenir l'emplacement et la gravité des dommages à partir du modèle FE mis à jour.[7]

Cette méthode requiert un nombre important de capteurs pour couvrir la structure étudiée ainsi que des données avec un rapport signal sur bruit élevé et, bien qu'elles soient bien vérifiées avec des données simulées, le bruit et les erreurs de mesure, inévitables, peuvent être des inconvénients majeurs dans les applications pratiques. Les effets environnementaux doivent être surveillés et les changements dus aux conditions environnementales doivent être distingués des changements dus aux dommages. [10]

b)-L'amortissement :

Bien que l'amortissement puisse également être utilisé pour évaluer l'état de santé des structures, il est moins couramment utilisé en pratique que les fréquences et les formes modales, car il est plus difficile à mesurer. **Cao et al** ont comparé les méthodes de détection des dommages basées sur l'amortissement en utilisant des structures en béton armé et des composites renforcés de fibres, et ont clarifié les facteurs influençant la capacité de l'amortissement à détecter les dommages. [7]

Idéalement, les changements d'amortissement causés par des dommages locaux peuvent être observés, car les fissures peuvent augmenter les frictions entre les interfaces. Cependant, cette mesure est vulnérable au bruit, surtout pour les structures soumises à des vibrations environnementales ambiantes, ce qui masque souvent les changements d'amortissement dus aux dommages locaux par l'erreur de mesure.

De plus, la sélection du modèle d'amortissement est une tâche complexe et importante dans le processus d'identification de l'amortissement. Le modèle d'amortissement de Rayleigh classique, qui est une combinaison de masse et de raideur, est souvent utilisé en pratique en raison de sa simplicité.

Cependant, ce modèle n'est pas toujours applicable à toutes les structures, ce qui a conduit à la proposition de modèles d'amortissement plus avancés. Il est à noter que différents types de structures nécessitent différents modèles d'amortissement.

D'autre part, comme la fréquence, l'amortissement est une propriété globale de la structure, ce qui signifie qu'il est difficile d'utiliser l'amortissement seul pour localiser les dommages locaux.

c)-Fonction de réponse en fréquence FRF :

Les fonctions de réponse en fréquence (FRF) sont une extension des paramètres modaux conventionnels car elles fournissent des informations sur toute la plage de fréquences.

Cependant, la sélection de la plage de fréquences optimale peut varier selon le type de structure, ce qui dépend souvent de l'expérience et des expérimentations antérieures.

Malheureusement, il existe un manque d'analyses théoriques et de simulations numériques sur la manière de choisir la plage de fréquences la plus sensible aux dommages locaux pour différents types de structures. Les formes de déflexion opérationnelle, leurs courbures, la densité spectrale de puissance, ainsi que la courbe de décalage de fréquence et sa courbure sont parmi les variantes les plus couramment utilisées des FRF.[7]

Cependant, il y a eu moins de recherches sur l'application de techniques de sous-structure, d'algorithmes de régulation avancés et d'algorithmes d'optimisation aux FRF et à leurs variantes en raison des difficultés à sélectionner une plage de fréquences sensible pour une structure donnée et à converger en raison des incertitudes dans la mesure des FRF.

➤ Méthode basée sur le domaine temporel :

Les méthodes du domaine temporel utilisent directement les réponses dynamiques d'une structure, telles que l'accélération et le déplacement, sans extraire de propriétés liées à la fréquence à partir de l'historique temporel de ces réponses. Ces méthodes sont généralement rapides car elles ne nécessitent pas beaucoup de ressources de calcul. Cependant, elles sont plus adaptées aux structures soumises à des excitations environnementales stables, car des excitations différentes peuvent entraîner des réponses dynamiques très différentes, ce qui peut rendre ces méthodes moins efficaces pour identifier les dommages.

a)-L'accélération :

Les méthodes de mise à jour des éléments finis peuvent être appliquées aux accélérations dans le cadre du SHM, de manière similaire aux fréquences et aux formes modales.

Des techniques telles que la régularisation de Tikhonov, la régularisation adaptative de Tikhonov ont été utilisées avec succès pour détecter les dommages locaux basés sur les accélérations.

Cependant, les ensembles de données d'historique temporel des accélérations sont souvent beaucoup plus volumineux que ceux des fréquences et des formes modales, rendant la convergence des méthodes plus difficile à atteindre. De plus, il n'existe pas de procédures standard pour sélectionner l'historique temporel des accélérations, ce choix dépendant souvent de l'expérience des praticiens.[7]

b)-Le déplacement :

Les méthodes applicables aux accélérations peuvent également être utilisées pour les déplacements. Cependant, les déplacements ne sont généralement pas directement mesurés pendant la surveillance.

En théorie, le déplacement peut être obtenu en intégrant deux fois l'accélération mesurée. Cependant, ce processus est sujet à des erreurs en raison de conditions initiales inconnues telles que les constantes d'intégration et du bruit de basse fréquence de la mesure, qui est amplifié de manière inversement proportionnelle au carré. En pratique, la récupération du déplacement à partir de l'accélération mesurée sur le terrain au niveau de l'emplacement mesuré n'est possible que de manière approximative.

Une stratégie pour résoudre le problème des conditions initiales inconnues exploite le principe de décroissance exponentielle des effets de ces conditions avec le temps. Ainsi, l'intégration numérique peut commencer avant l'événement principal, permettant une période de "préchauffage" pour atténuer les effets des conditions initiales. Le défi principal réside dans le bruit, surtout dans les basses fréquences, avec une amplification lors de l'intégration numérique et le bruit dans les équipements.

L'intégration directe de l'accélération mesurée peut souvent entraîner une surestimation significative du déplacement. Une erreur constante dans l'accélération produit une tendance linéaire dans la vitesse et une tendance quadratique dans le déplacement.

Pour résoudre ce problème, les données d'accélération sont d'abord filtrées avant d'être intégrées numériquement pour obtenir les données de vitesse, puis soumises à un nouveau filtrage avant d'être intégrées pour obtenir les données de déplacement. Cependant, ce processus peut introduire une distorsion dans les données d'accélération et donc dans le déplacement intégré, nécessitant une surveillance et une vérification lors du développement du système SHM.

➤ Méthode basée sur le domaine Temps-fréquence :

Les méthodes dans le domaine temps-fréquence combinent les analyses temporelles et fréquentielles pour capturer à la fois les propriétés stables dans le domaine fréquentiel et les variations temporelles.

Bien qu'elles exigent des ressources de calcul et de stockage importantes, elles offrent une puissance d'analyse accrue. Ces méthodes incluent la transformée de Fourier à court terme, la transformée en ondelettes et la transformée de Hilbert-Huang. Elles ne nécessitent généralement que des mesures d'accélération ou de déformation dynamique et peuvent détecter des dommages locaux sans nécessiter de modèle non endommagé.

Cependant, elles sont limitées à la localisation des dommages sans évaluation de leur gravité. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour valider et améliorer ces méthodes sur des structures réelles. [7]

2.7.8. Méthode basée sur l'énergie de déformation modal :

La variation de l'énergie de déformation stockée dans un mode de vibration spécifique est étudiée comme un indicateur potentiel de dommage.

Kim et Stubbs (1995) ont développé un indicateur de dommage basé sur le rapport de l'énergie de déformation modale avant et après le dommage, utilisé pour localiser et dimensionner une fissure dans une poutre expérimentale.

Farrar et Doebling (1999) ont utilisé cet indicateur pour localiser des dommages contrôlés sur un pont, montrant une meilleure performance que la simple comparaison des formes modales avant et après le dommage. **Cornwell et al. (1999)** ont étendu la méthode à une plaque d'aluminium expérimentale avec succès, bien que des faux positifs aient été observés à faible niveau de dommages. Kim et al. (2003) ont comparé une méthode basée sur la fréquence avec une méthode basée sur l'énergie de déformation modale dans une simulation sur poutre, montrant que cette dernière produisait des prédictions plus précises.[10]

2.7.9. Méthode basée sur la variation de flexibilité :

La matrice de flexibilité mesurée dynamiquement, est estimée à partir de :

$$[F] = [\varphi][\Lambda]^{-1}[\varphi]^T$$

Avec $[\varphi]$ la matrice de forme modale mesurée et $[\Lambda]$ la matrice diagonale des fréquences modales mesurées au carré, et T représente l'opération de transposition.

L'endommagement est détecté en comparant la matrice de flexibilité obtenue par les modes de la structure saine et celle de la structure endommagée :

$$[F]_s = \sum_{k=1}^N \frac{1}{w_{s,k}^2} \varphi_{s,k} \varphi_{s,k}^t$$

$$[F]_d = \sum_{k=1}^N \frac{1}{w_{d,k}^2} \varphi_{d,k} \varphi_{d,k}^t$$

F_s et F_d Représentent les matrices de flexibilités dans les cas sain et endommagé.

$\varphi_{s,k}$ et $\varphi_{d,k}$ Étant les modes propres du kème mode dans les cas sain et endommagé.

$w_{s,k}^2$ et $w_{d,k}^2$ Les pulsations propres du kème mode dans les cas sain et endommagé.

Chaque colonne de la matrice de flexibilité $[F]$ représente l'ensemble des déplacements nodaux d'une force unitaire appliquée à chaque degré de liberté. A partir de ces matrices, on obtient la matrice de changement de flexibilité $[\Delta F]$:

$$[\Delta F] = |F_s - F_d|$$

L'identification de l'emplacement du dommage nécessite de calculer la valeur maximum des maximas des colonnes de la matrices ΔF .

Des études ont montré que la flexibilité modale est souvent la plus sensible aux dommages, offrant une précision supérieure par rapport à d'autres méthodes telles que l'énergie de déformation ou la courbure de la forme modale. [10]

2.7.10.Méthode basée sur l'intelligence artificielle :

La détection des dommages sur les structures est entravée par les incertitudes inhérentes aux données mesurées, constituant ainsi un obstacle majeur.

Farrar et Doebling (1999) ont souligné que ce problème est essentiellement un défi de reconnaissance de motifs ou formes statistiques, nécessitant le développement de méthodes non basées sur les modèles pour compléter les approches existantes. L'objectif de la reconnaissance de formes (pattern recognition) dans ce contexte est de distinguer entre différents motifs représentant des conditions de dommages.

Les réseaux de neurones ont émergé comme des outils puissants pour cette tâche, les schémas de détection de nouveauté, qui identifient toute déviation par rapport aux données normales, ne nécessitent pas de modèle de dommages. Le contrôle statistique des processus surveille la distribution des caractéristiques pour identifier les données incohérentes, indiquant des dommages potentiels.

Cependant, ces méthodes sont généralement limitées à la détection de niveau 1 de dommages. [10]

➤ **Méthode basée sur la vision par ordinateur (caméra) :**

L'utilisation principale de cette méthode est de surveiller le déplacement des structures dans différents environnements.

Le système utilise soit une ou plusieurs caméras, un objectif zoom et un ordinateur pour capturer les données collectées.

L'utilisation d'un logiciel de traitement en temps réel permet de mesurer les historiques de déplacement et d'afficher les résultats sur l'écran de l'ordinateur en temps réel et de sauvegarder automatiquement les données sur l'ordinateur. Alternativement, les images peuvent être capturées et l'analyse des données peut être effectuée ultérieurement. [8]

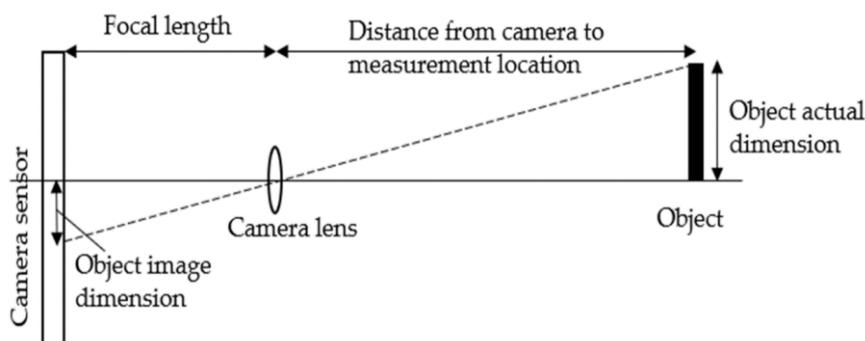


Figure 14 : Principe de fonctionnement de la caméra

➤ **Méthode basée sur le scanner laser :**

La préférence des scanners laser par rapport aux procédures traditionnelles réside dans la capacité des scanners laser à collecter une énorme quantité de données précises, comprenant la géométrie ainsi que différentes caractéristiques radiométriques.

Son principe est l'utilisation d'impulsions de lumière cohérente focalisées, où le système calcule le temps de vol de la lumière (converti en distance) pendant qu'elle est transmise et renvoyée de l'objet mesuré, voir Figure 10. Le scan généré offre une carte tridimensionnelle des points collectés communément appelée "nuage de points".

La carte 3D détaillée (avec une précision de l'ordre du millimètre) de l'objet mesuré peut être générée en formant des polygones, qui sont créés en connectant les nuages de points.[8]

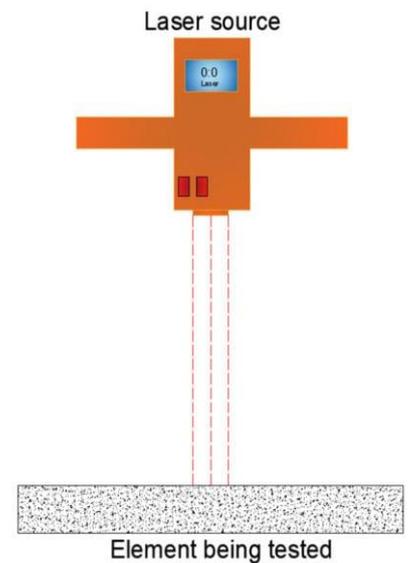


Figure 15 : fonctionnement d'un scanner laser

2.8. Avantages de la SHM:

La Surveillance de l'État Structural (SHM) offre plusieurs avantages significatifs :

1. Amélioration de l'intégrité de la structure grâce à une surveillance continue.
2. Optimisation de la valeur fonctionnelle de la structure, garantissant une utilisation optimale.
3. Réduction des temps d'arrêt grâce à la planification préventive de la maintenance.
4. Amélioration de la sécurité publique en prévenant les défaillances catastrophiques.
5. Rationalisation de l'organisation de la maintenance en évitant les programmes inutiles et en ciblant les éléments critiques.
6. Réduction des coûts de main-d'œuvre liés à l'inspection et à la maintenance, tout en évitant les conséquences néfastes des interventions inappropriées.

En résumé, la SHM permet de réduire les coûts d'inspection, d'atténuer l'impact des catastrophes structurelles et d'améliorer l'efficacité économique des fonds publics.[9]

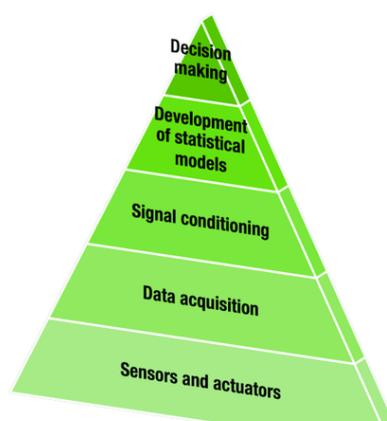


Figure 16 : Etapes de la SHM

2.9. SHM et fiabilité:

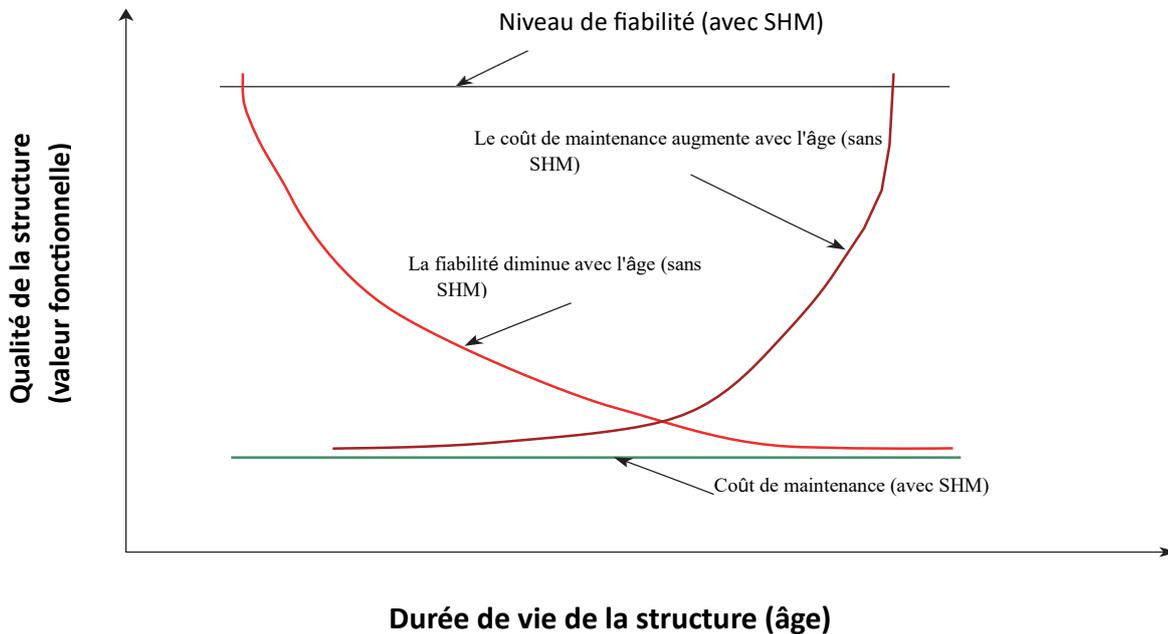


Figure 17 : Qualité de la structure en fonction du temps de vie

En comparant des structures avec et sans SHM, il a été constaté que sans surveillance de la santé des structures, la fiabilité diminue et le coût de maintenance augmente avec l'âge des structures, en revanche avec SHM, la fiabilité et le coût de maintenance restent relativement stables avec l'âge, à condition que des méthodes appropriées soient utilisées. [9]

Ainsi, le SHM permet de maintenir une qualité structurelle et une durée de vie améliorées avec des coûts de maintenance contrôlés. Les structures avec SHM présentent un coût de maintenance constant et un niveau de fiabilité stable, garantissant une qualité fonctionnelle acceptable même avec le vieillissement.

3.Conclusion:

En résumé, les méthodes d'identification des dommages à partir des réponses vibratoires des structures permettent de détecter et de localiser les dommages en se basant sur les caractéristiques modales telles que les fréquences et les modes propres, ou en développant des indicateurs basés sur ces caractéristiques.

Cependant, ces méthodes présentent des limitations, notamment une faible sensibilité des fréquences aux faibles dommages et à l'influence des conditions environnementales. Les coefficients MAC et COMAC, souvent utilisés pour comparer les déformations propres de différentes séries de mesures, ne permettent pas toujours de distinguer clairement les situations endommagées des situations intactes. Par conséquent, l'utilisation de la matrice de flexibilité, déterminée à partir des modes propres de la structure, apparaît comme une approche justifiée pour détecter et localiser les dommages.

La surveillance du comportement statique et dynamique des barrages, devient de plus en plus cruciale pour assurer leur intégrité et longévité. Actuellement, l'inspection visuelle et les techniques d'évaluation non destructives sont les méthodes standard, mais elles sont laborieuses et nécessitent des temps d'arrêt significatifs. L'avancée fulgurante dans le domaine des capteurs sans fil, offre une alternative prometteuse en réduisant les inspections manuelles. Cependant, les systèmes SHM optimisés et autonomes ne sont pas encore largement déployés. L'innovation actuelle inclut l'intégration de l'alerte précoce aux séismes avec le SHM pour une évaluation continue de l'état et une maintenance basée sur les performances.[6]

Enfin, dans ce qui suit, nous proposerons un réseau de neurones capable de prédire la localisation et la sévérité des dommages en utilisant les variations de flexibilité comme données d'entrée et pour différents niveaux d'eau, ainsi qu'une méthode pour optimiser le nombre et les emplacements des capteurs.

Chapitre 2 :
Modèle numérique et
sensibilité aux
dommages

1.Introduction :

Ce chapitre traite de l'exploitation d'un modèle numérique en éléments finis (EF) du barrage de Tabellout à l'aide du logiciel SAP2000®V24, développé par Computers & Structures Inc. Initialement, un modèle 3D a été créé pour deux scénarios : avec et sans retenue d'eau. Ce modèle permet de déterminer les paramètres modaux du barrage, tels que les fréquences propres et les formes modales, qui sont essentiels pour la surveillance vibratoire et l'identification des dommages potentiels.

Ce modèle a été validé par des essais de vibrations ambiantes réalisés sur le barrage, ce qui le rend fiable pour l'identification des dommages. Enfin, une analyse des contraintes de traction et compression a été effectuée pour repérer les zones susceptibles de se fissurer.

2.Présentation du barrage de Tabellout :

Cet ouvrage hydraulique, cinquième du pays en termes de capacité de stockage avec environ 294 millions de m³, est situé dans la wilaya de Jijel, le long de la côte est, à environ 350 km d'Alger.

Jouant un rôle crucial dans le système de transfert des eaux vers les hauts plateaux, ce barrage poids est constitué d'un million de m³ de béton compacté au rouleau (BCR). Il mesure 115 mètres de hauteur, 392 mètres de longueur en crête, et 8 mètres de largeur en crête. Il comprend également un évacuateur de crue à seuil libre en escalier de 60 mètres de largeur utile et deux galeries de dérivation provisoires de 6 mètres de diamètre et 400 mètres de longueur chacune. Le barrage de Tabellout se distingue par son profil arqué, conçu pour résister aux sollicitations sismiques.

L'objectif de ce projet est de transférer annuellement 303 millions de m³ d'eau pour approvisionner en eau potable une population d'environ 2 millions de personnes et irriguer 36 000 hectares de terres agricoles. [12]



Figure 18 : Barrage de Tabellout à Jijel



Figure 19 : Vue sur la retenue du barrage Tabellout

3. Localisation du site du barrage :

Le Barrage de Tabellout fait partie du projet de transfert Sétif-Hodna, système Est. Ce projet repose sur l'intersection entre l'oued Djendjene (principal) et l'oued Raha (secondaire). Le site du barrage est situé à environ 7,5 kilomètres (à vol d'oiseau) au sud-est de la commune de Texenna, dans la wilaya de Jijel.[13]

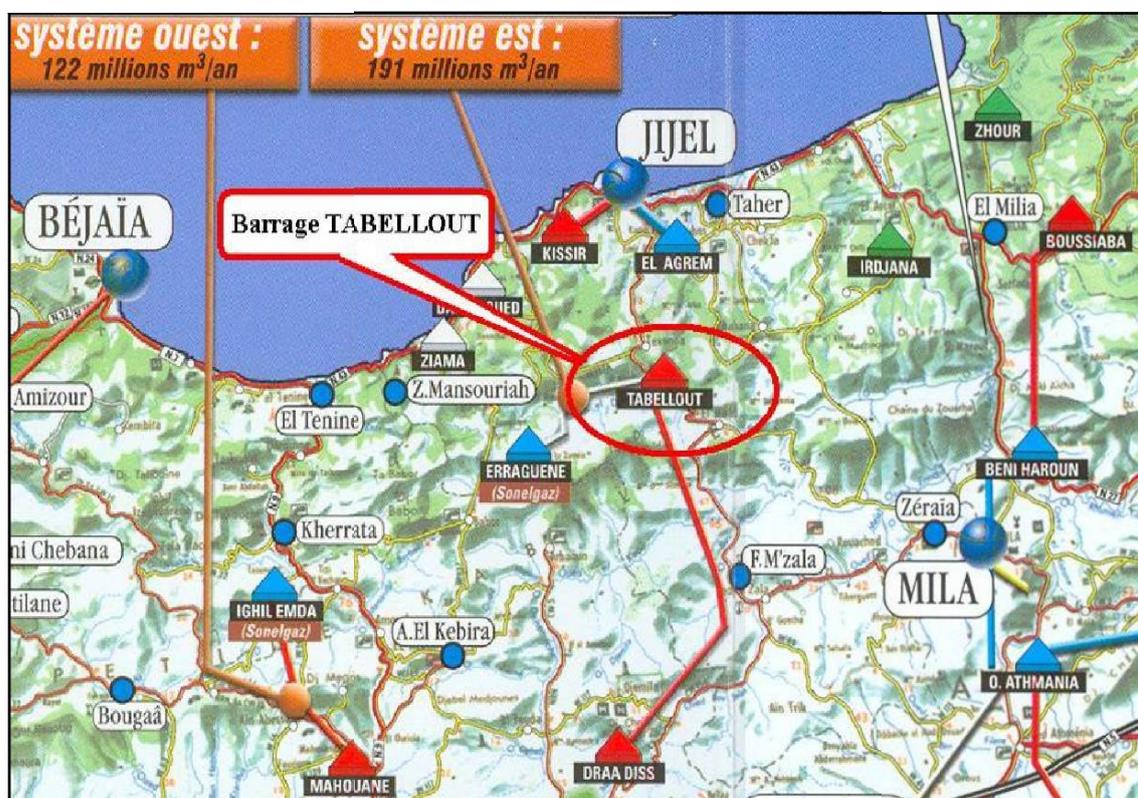


Figure 20 : Situation du barrage Tabellout

4.Caractéristiques techniques du barrage:

Tableau 1- Récapitulatif des caractéristiques du barrage Tabellout [13]

Superficie du bassin versant	402 km ²
Apports annuels moyens	205,5 hm ³ (48 ans).
Capacité total	294,40 hm ³ .
Volume régularisé	189 hm ³ .
Type du barrage	Barrage poids « arqué » en BCR.
Hauteur	121 m.
Longueur de crête	413 m.
Largeur maximale à la base	100 m.
Largeur maximale en crête	8 m.
Cote PHE	329,45 NGA.
Cote RN	324,75 NGA.

5.Matériaux de constructions utilisés:

Le corps du barrage a été réalisé en Béton Compacté au Rouleau (BCR) sur fondation rocheuse, tandis que les ouvrages annexes (pont, évacuateur de crue...) en béton conventionnel vibré BCV. L'eau de gâchage est prélevée directement dans l'oued Djendjen et le liant retenu, pour être utilisé aussi bien pour les bétons conventionnels (BCV) que pour le BCR, est de type CPJ-42,5 [13] (CPJ – CEM II : résulte du mélange de 80 à 94% de clinker pour les classes II/A et de 65 à 79% pour les classes II/B, le reste pouvant être un ou plusieurs constituants tels que laitiers, cendres volantes, pouzzolanes ou calcaire dans les proportions de 6 à 20% ou 21 à 35% ainsi qu'éventuellement les fillers à moins de 5%)

6.Evaluation des fréquences propres du barrage:

6.1. Par la méthode simplifié (Méthode de Tardieu):

Afin d'estimer la fréquence fondamentale d'un barrage, une méthode simplifiée a été proposée par Tardieu & al. Le barrage est assimilé à un résonateur simple de forme triangulaire constituant un système à un seul degré de liberté (déplacement horizontal en crête).

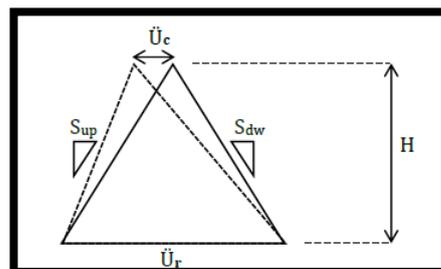


Figure 21 : Modèle pour résonateur simple à un seul degré de liberté.

❖ Les hypothèses adoptées pour cette approche :

- Le barrage est fondé sur un substratum rocheux supposé rigide
- Les effets de la composante horizontale de rive à rive ne sont pas pris en compte
- Le mode de déformation du barrage est supposé se réduire à un cisaillement horizontal et une flexion d'axe parallèle à celui du barrage.
- Le barrage est assimilé à un résonateur simple à deux degrés de liberté (un en déplacement et un en flexion).
- Le résonateur est un prisme triangulaire d'une hauteur H , correspondant à la profondeur d'eau qui y a immédiatement à l'amont du barrage.
- L'effet hydrodynamique de la retenue est pris en compte selon l'analyse de **Westergaard**

En prenant en considération les hypothèses citées ci-dessus liées à la forme du mode fondamental, la fréquence fondamentale du barrage de Tabellout est déterminée par la formule de Rayleigh telle que :

$$N = \alpha * V_s$$

Avec V_s représentant la vitesse de l'onde de cisaillement :

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \text{ et } G = \frac{E}{2(1 + \vartheta)}$$

Avec :

ρ : Masse volumique du béton

E : Le module de Young

ϑ : Le coefficient de poisson

G : Le module de Coulomb (de glissement)

Pour le barrage de Tabellout, nous avons : $E = 20\,000$ MPa , $\rho = 2350$ Kg/m³ et $\vartheta = 0.2$

On obtient : $V_s = 1883,11$ m/s

Selon TARDIEU, la composition du résonateur triangulaire en élément finis permet de montrer que la formule s'écrit :

-Pour un barrage vide : $N_v = 0.23 \times \frac{V_s}{H}$

-Pour un barrage avec retenue pleine : $N_v = 0.17 \times \frac{V_s}{H}$

Avec : H=113,75 m représente la hauteur de la retenue du barrage.

-On calcule les fréquences dans les 2 cas vide et rempli, les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Résultats des fréquences naturelles par la méthode simplifiée

	Fréquence fondamentale (Hz)
Barrage Vide	3.81
Barrage rempli	2.81

6.2. Par l'analyse modale du modèle 3D :

1/-Présentation du modèle 3D du barrage:

Les calculs ont été réalisés avec le logiciel aux éléments finis SAP2000 V24. Le modèle 3D représenté sur la figure suivante est composé de 8679 points, 7036 éléments volumiques (8 nœuds).

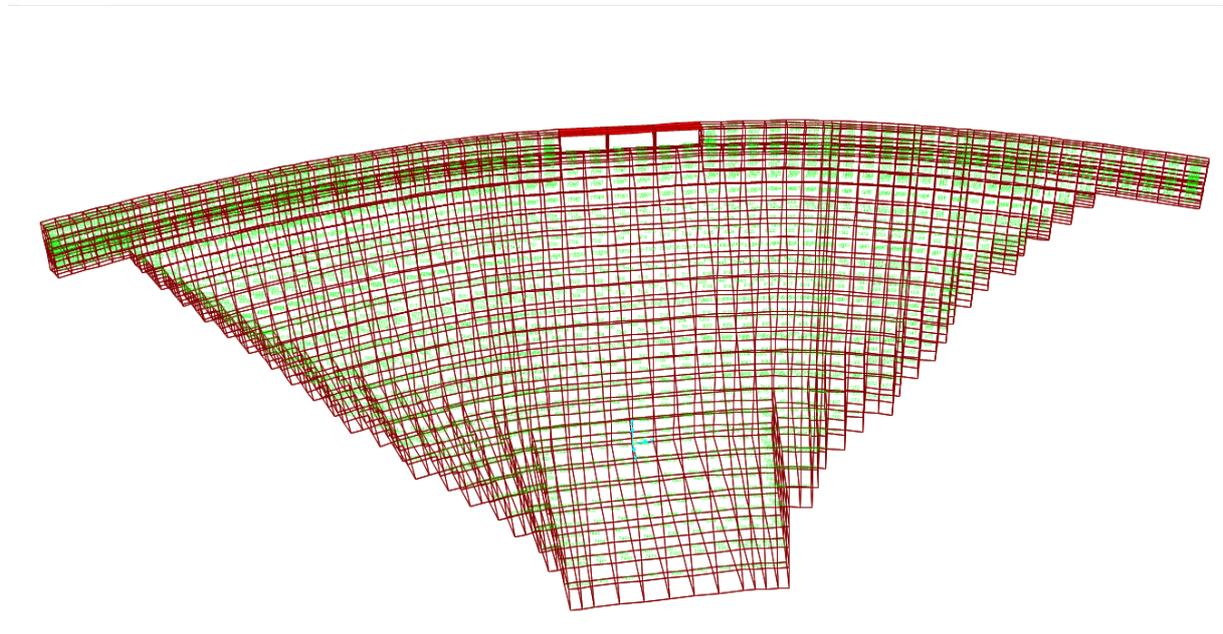


Figure 22 : Modèle 3D du barrage vue coté aval

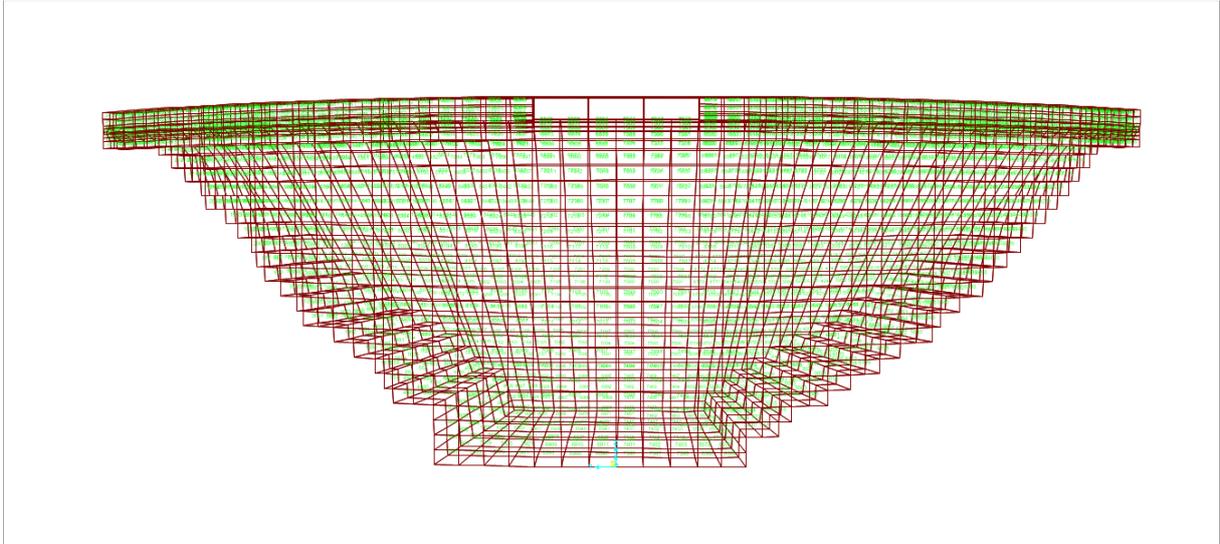


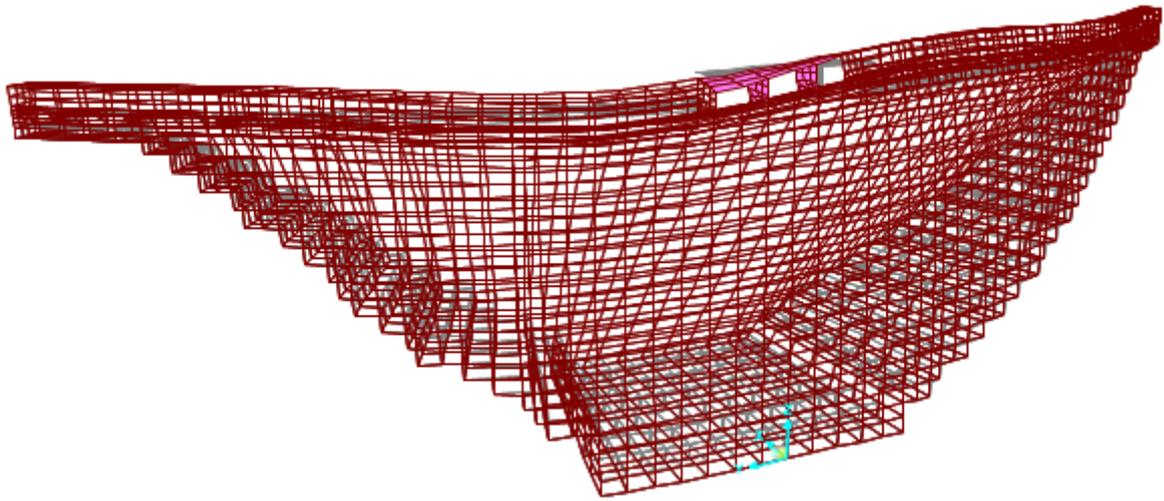
Figure 23 :Modèle 3D du barrage vue coté amont

2/-Analyse modale du modèle 3D sans retenue :

Les calculs ont été faits sans prise en compte de la retenue d'eau et en considérant le barrage comme encastré à sa base, dans ce qui suit l'allure des déformées propres pour les 4 premiers modes :



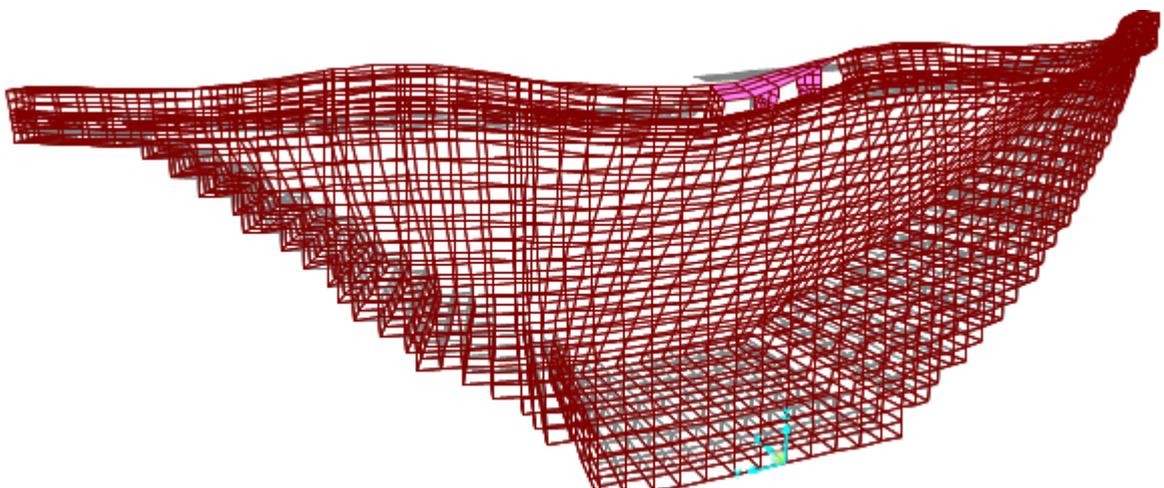
Mode 1 : $f=3.86$ Hz



Mode 2 : $f=4.73\text{Hz}$



Mode 3 : $f=5.71\text{Hz}$



Mode 4 : $f=6.62\text{Hz}$

Tableau 3 : Fréquence sans retenue pour 7 modes de vibration

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6	Mode 7
Fréquence Sans retenue (Hz)	3.86	4.73	5.71	6.62	7.52	7.80	7.83

3/-Méthode de Westergaard (masses ajoutées):

L'analyse de la réponse sismique des structures telles que les barrages, les réservoirs de stockage et les structures offshore doit prendre en compte les effets de l'interaction fluide-structure, ainsi que, dans certains cas, la compressibilité de l'eau. Ces effets peuvent significativement modifier les caractéristiques modales des structures, comme les fréquences et les modes de vibration propres.

Prédire les mouvements couplés du système barrage-réservoir et évaluer les pressions hydrodynamiques sur le parement amont du barrage est une tâche complexe.

La première solution au problème des pressions hydrodynamiques sur les barrages avec un parement amont vertical exposé à un mouvement horizontal harmonique a été proposée par Westergaard .[14]

Cette solution simplifiée et efficace repose sur une approche analytique du déplacement, en supposant une structure infiniment rigide, un réservoir rectangulaire semi-infini et une excitation sismique harmonique et horizontale d'expression :

$$\ddot{u}_x = a g \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad \text{à } x = 0$$

Dans laquelle a est le coefficient d'accélération sismique, g est la constante de gravité qui rapporte le taux de d'accélération, $2\pi/T$ est la pulsation du signal et t désigne le temps.

La pression hydrodynamique est supposée nulle au niveau de la surface libre et dans tout le domaine loin de l'interface structure-réservoir. De plus, le fond du réservoir est supposé sans déplacement vertical. Ces conditions s'expriment comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} p(x, y = H) = 0 \\ \lim_{x \rightarrow \infty} p(x, y) = 0 \\ u_y(x, y = 0) = 0 \\ u_x(x = 0, y) = -agT^2/(4\pi^2)\cos(2\pi t/T) \end{array} \right.$$

La solution du problème donne l'évolution dans le temps des deux composantes du champs des déplacements $u_x(x, y, t)$ et $u_y(x, y, t)$.

La pression hydrodynamique est ensuite évaluée à l'aide de la relation de compressibilité

$$\text{linéaire } p = k \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)$$

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$p(x, y, t) = \frac{8a\rho g H}{\pi^2} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2 c_n} e^{-q_n x} \sin\left(n\pi \frac{H-y}{2H}\right) \right)$$

q_n et c_n sont définis comme suit :

$$q_n = \frac{n\pi c_n}{2H} \quad ; \quad c_n = \sqrt{1 - \frac{16H^2}{n^2 c^2 T^2}}$$

Avec $C = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ la célérité des ondes de pressions dans l'eau

La solution de Westergaard est valide si les valeurs de c_n sont réelles, soit :

$$1 - \frac{16H^2}{n^2 c^2 T^2} \geq 0 \quad \rightarrow \quad T > \frac{4H}{nc} \quad ; \quad n = 2i - 1, i = 1, 2, 3, \dots$$

$$T_i = \frac{4H}{(2i-1)c}$$

-Le terme T_i correspond à la $i^{\text{ème}}$ période propre du réservoir. Par conséquent la solution de Westergaard n'est valide que lorsque la période de l'excitation sismique est supérieure à la période fondamentale du réservoir $T_1 = \frac{4H}{c}$

La pression au niveau de l'interface structure-réservoir ($x = 0$) est maximale lorsque $t = kT$, k entier. Elle s'exprime par :

$$p_{\max}(y) = p(0, y, kT) = \frac{8a\rho g H}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2 c_n} \sin\left(n\pi \frac{H-y}{2H}\right) \right)$$

Cette expression est de forme parabolique, elle atteint sa valeur maximale au fond et s'annule à la surface. Westergaard a proposé de remplacer cette expression par une autre plus simple qui donnerai un effet d'inertie équivalent en considérant une certaine masse d'eau qui vibre d'une manière solidaire avec le parement amont, d'où l'introduction du concept de masse ajoutée. La largeur b de cette masse varie en fonction de la hauteur comme suit :

$$b = \frac{7}{8} \sqrt{H(H-z)}$$

Masse d'eau ajoutée :

Pour l'analyse des structures idéalisés en monolithes rigides en deux dimensions avec la face amont verticale, Westergaard a proposé une forme parabolique pour cette eau superficielle comme représenté sur la figure ci-dessous La masse ajoutée de l'eau au point i est donc obtenue en multipliant la densité de masse de l'eau (ρ_w) par le volume d'eau tributaire au noeud i :

$$m_{ai} = \frac{7}{8} \rho_w \sqrt{H(H - z_i)} A_i$$

Avec :

H : Profondeur de l'eau

z_i : distance à partir de la base

A_i : Surface tributaire au point i

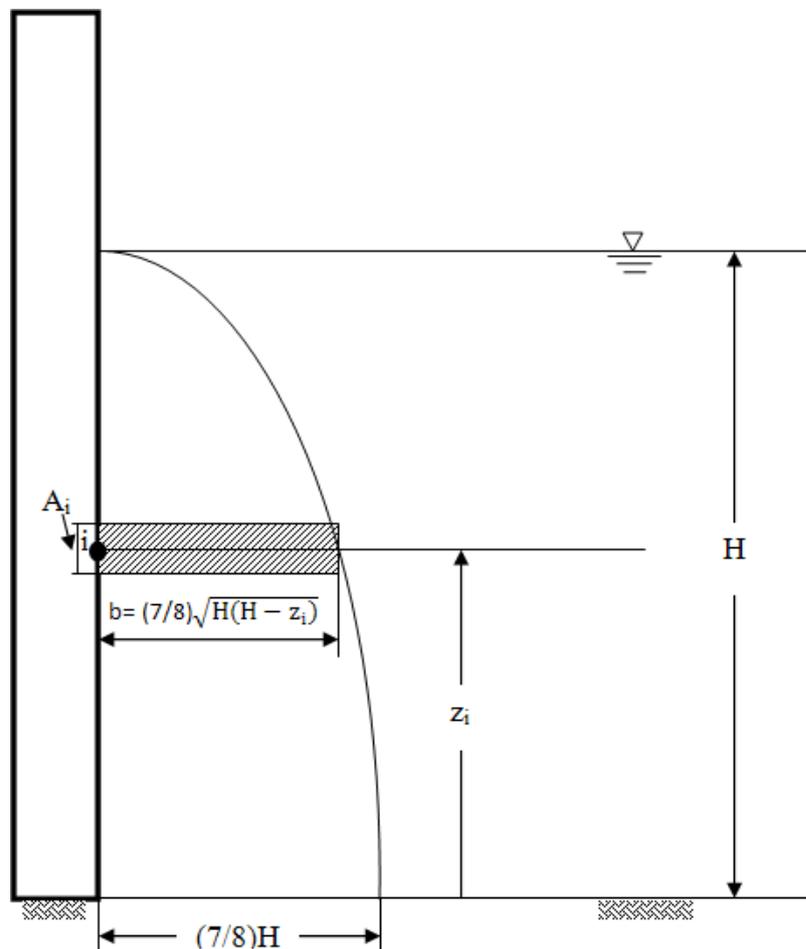


Figure 24 : Masses ajoutées de Westergaard

- Les pressions d'eau seront dirigées dans le sens des x positif , chaque plan y se verra attribué sur les différentes hauteurs z les masses ajoutées correspondantes , dans ce qui suit des exemples de valeurs obtenues pour les plans $y=0$ et $y= 52,119$:

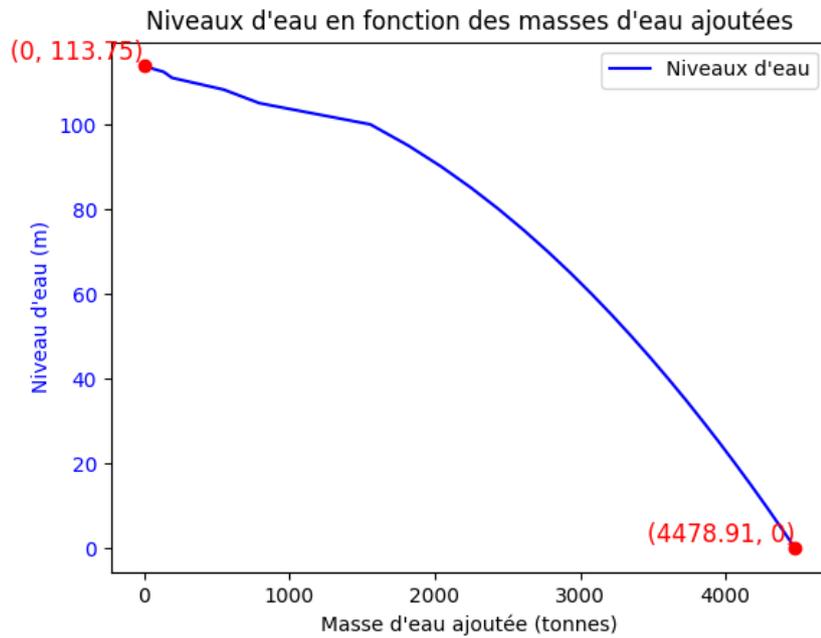
Tableau 4 : Masses ajoutées pour $\gamma=0$

z_i (m)	A_i (m ²)	m_{ai} (tonnes)
0	45	4478,91
5	45	4379,4
10	45	4277,52
15	45	4173,3
20	45	4066,2
25	45	3956,4
30	45	3843
35	45	3726,9
40	45	3606,3
45	45	3482,1
50	45	3352,95
55	45	3218,85
60	45	3078,81
65	45	2932,2
70	45	2777,4
75	45	2614,14
80	45	2439,7
85	45	2251,8
90	45	2046,6
95	45	1818,45
100	45	1557,23
105	28,8	795,02
108.2	25	548,9
110.974	12,5	194,23
112.362	12,6	137,34
113.75	0	0

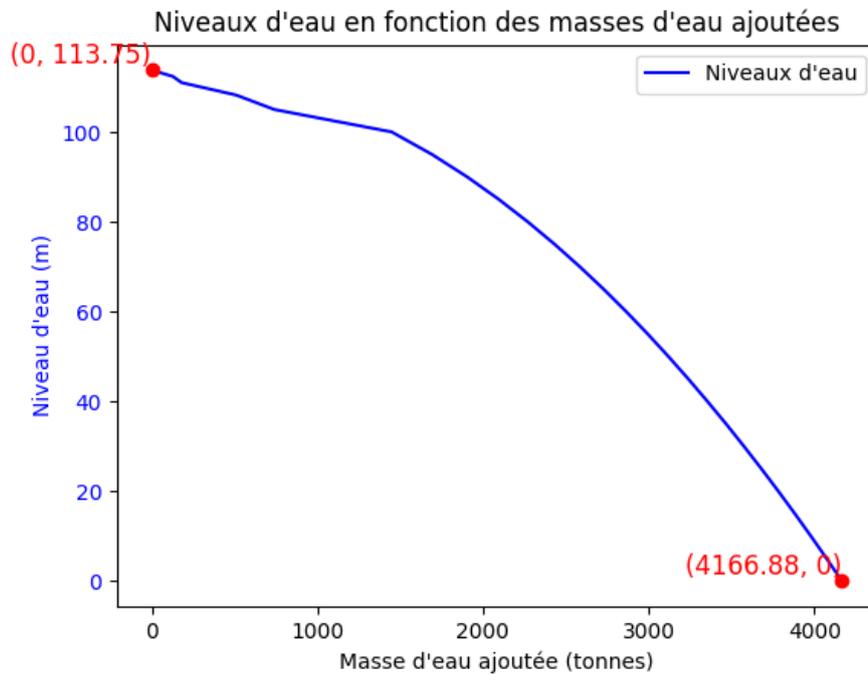
Tableau 5 : Masses ajoutées pour $\gamma = 52,119$

z_i (m)	A_i (m ²)	m_{ai} (tonnes)
0	41,87	4166,88
5	41,86	4074,3
10	41,87	3979,52
15	41,86	3882,56
20	41,86	3782,92
25	41,86	3680,77
30	41,86	3575,27
35	41,86	3467,26
40	41,86	3355,06
45	41,86	3239,51
50	41,86	3119,36
55	41,86	2994 ,6
60	41,86	2864,32
65	41,86	2727,92
70	41,86	2583,91
75	41,86	2432,02
80	41,86	2269,71
85	41,86	2094,92
90	41,86	1904,02
95	41,86	1691,76
100	41,86	1448,74
105	26,79	739,64
108.2	23,23	510,64
110.974	11,62	180,69
112.362	11,62	127,77
113.75	0	0

- Le profil de distribution de la masse d'eau sur le parement amont est donné pour $y=0$:



- Le profil de distribution de la masse d'eau sur le parement amont est donné pour $y=52,119$:



4/-Analyse modale du modèle 3d avec retenue :

Afin de simuler le système barrage avec retenue, des masses ponctuelles ont été rajoutées sur les nœuds des éléments sur le parement amont calculées comme démontré précédemment afin de simuler l'effet d'inertie appliqué par l'eau sur le barrage lors d'un séisme, ce qui laisse prédire une fréquence plus faible, en considérant le barrage comme encastré à sa base, dans ce qui suit l'allure des déformées propres pour les 4 premiers modes :



Mode 1 : fréquence = 1.49 Hz



Mode 2 : fréquence = 1.93 Hz



Mode 3 : fréquence = 2.4 Hz



Mode 4 : fréquence = 2.9 Hz

Tableau 6 : Fréquence avec retenue pour 7 modes de vibration

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6	Mode 7
Fréquence avec retenue (Hz)	1.49	1.93	2.4	2.9	3.1	3.44	3.65

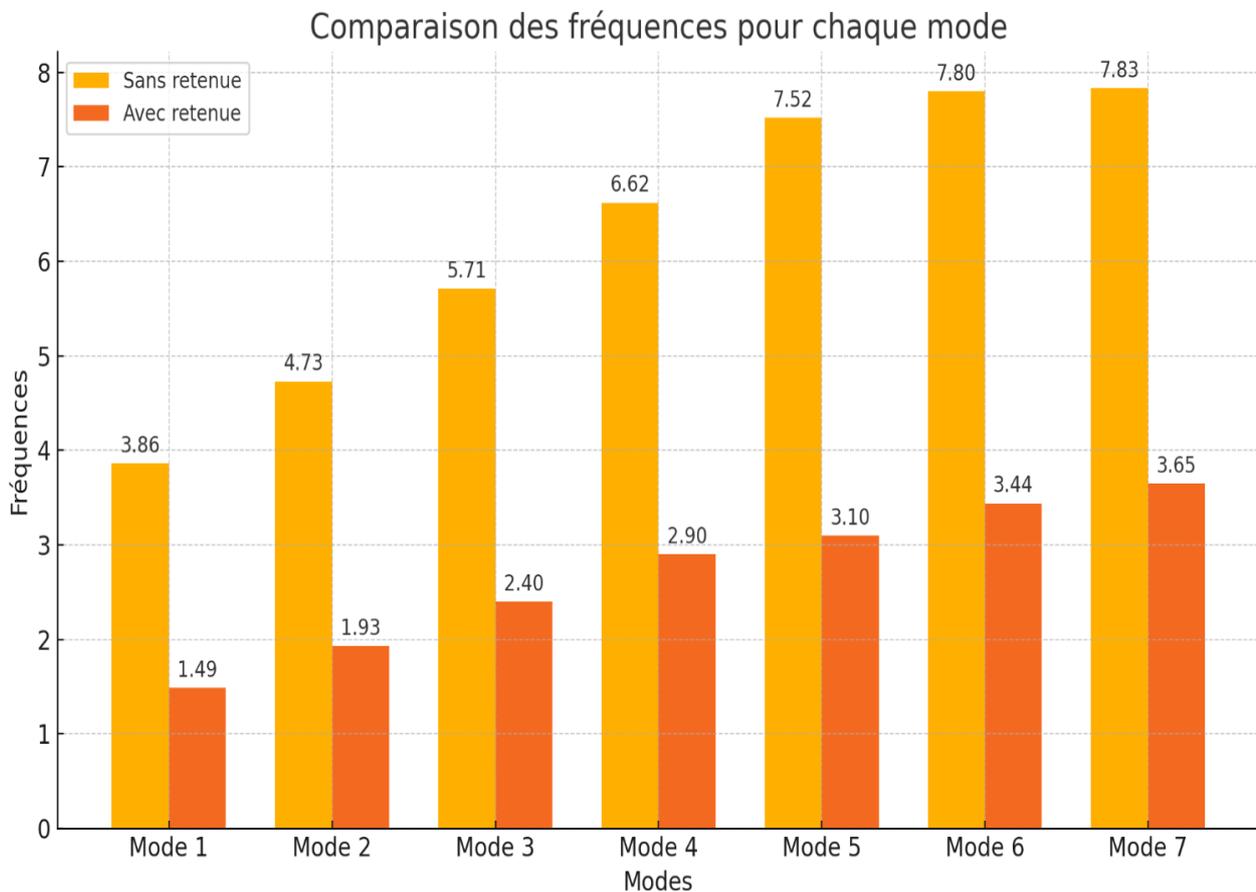
Les fréquences trouvées avec l'approche simplifiée de Tardieu sont :

- Retenue vide : $f = 3.81$ Hz
- Retenue pleine : $f = 2.81$ Hz

En comparant ces fréquences avec les fréquences du premier mode trouvées par la méthode éléments finis, en supposant le modèle encastré à la base, la valeur du modèle sans retenue est la plus proche.

La différence entre les autres valeurs s'explique du fait que la méthode simplifiée de calcul de la fréquence fondamentale suppose que le barrage est un prisme triangulaire avec les mêmes pentes amont et aval, ce qui n'est pas le cas du barrage Tabellout, les inclinaisons des surfaces du barrage vers l'eau (amont) et vers l'extérieur (aval) sont différentes.

La figure suivante met en évidence l'effet de l'interaction fluide-structure sur les fréquences propres du barrage :



-En comparant les fréquences dans les 2 cas avec et sans retenue, l'influence de la retenue d'eau apparaît clairement sur les fréquences propres du barrage, en effet elle diminue de 58% par rapport à celle de la retenue vide.

-Les tableaux suivant représente la participation massique du corps du barrage (modèle 3d) sans et avec retenue :

Sans retenue :

StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
1	0,258742	0,33141	0,000005343	0,03046	0,33141	0,000005343	0,03046
2	0,211541	0,00004977	0,0261	0,000003966	0,33146	0,0261	0,03047
3	0,174985	0,0135	0,000005876	0,00068	0,34497	0,02611	0,03115
4	0,151148	0,00066	0,01394	0,00002684	0,34563	0,04005	0,03118
5	0,133049	0,11837	0,00404	0,00143	0,464	0,04409	0,03261
6	0,12808	0,09259	0,01212	0,00181	0,55659	0,05621	0,03441
7	0,127836	0,00028	0,58629	0,00122	0,55687	0,6425	0,03563
8	0,11618	0,00041	0,00545	0,00014	0,55727	0,64795	0,03577
9	0,113282	0,00004994	0,00013	0,000006089	0,55732	0,64808	0,03578
10	0,110352	0,0324	0,00109	0,45184	0,58972	0,64917	0,48762
11	0,104336	0,00469	0,00019	0,00006597	0,59441	0,64936	0,48768
12	0,097543	0,01642	0,0000229	0,0000193	0,61083	0,64938	0,4877

Avec retenue :

StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
1	0,668315	0,45047	0,00047	0,00312	0,45047	0,00047	0,00312
2	0,517045	0,00008679	0,06922	2,186E-07	0,45056	0,06969	0,00312
3	0,415902	0,04616	0,00164	0,00033	0,49671	0,07133	0,00345
4	0,344765	0,00349	0,05344	4,706E-07	0,5002	0,12477	0,00345
5	0,322424	0,23807	0,00033	0,00011	0,73828	0,1251	0,00356
6	0,291001	0,01127	0,00093	0,00002123	0,74955	0,12603	0,00358
7	0,274126	0,00002324	0,02253	2,376E-07	0,74957	0,14856	0,00358
8	0,250997	0,00083	0,00516	0,000006778	0,7504	0,15372	0,00359
9	0,238491	0,01842	0,00105	0,00005352	0,76882	0,15477	0,00364
10	0,221162	0,04047	0,01312	0,00031	0,80929	0,16789	0,00395
11	0,218634	0,01079	0,00153	0,0000138	0,82008	0,16942	0,00396
12	0,213919	0,04074	0,01458	0,0003	0,86082	0,184	0,00426

5/-Répartition des contraintes sur le barrage:

Pour visualiser les zones à risque, qui représente des zones fortement sollicitées par les contraintes de compression et de traction, on se limite au modèle 3d avec retenue et on analyse dans les 2 cas statique et dynamique :

-Les caractéristiques dynamiques du barrage en BCR utilisées lors de la simulation sont :

- Masse volumique du BCR : $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$.

- Module élastique dynamique : $E_d = 20\,000 \text{ MPa}$.

- Le coefficient de poisson : $\nu = 0,2$

- Le taux d'amortissement : 5%

-pour la direction X compression >0 , traction <0 , pour la direction Z le contraire

5-1/-Cas statique :

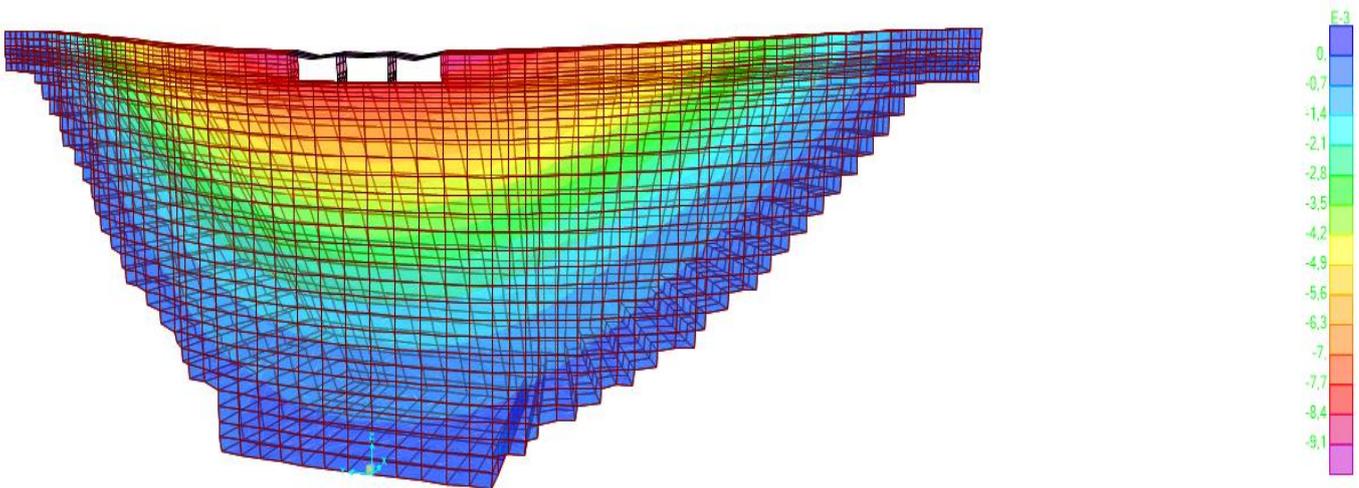


Figure 25 : Etat des contraintes σ_{xx} sur le corps du barrage pour le chargement statique

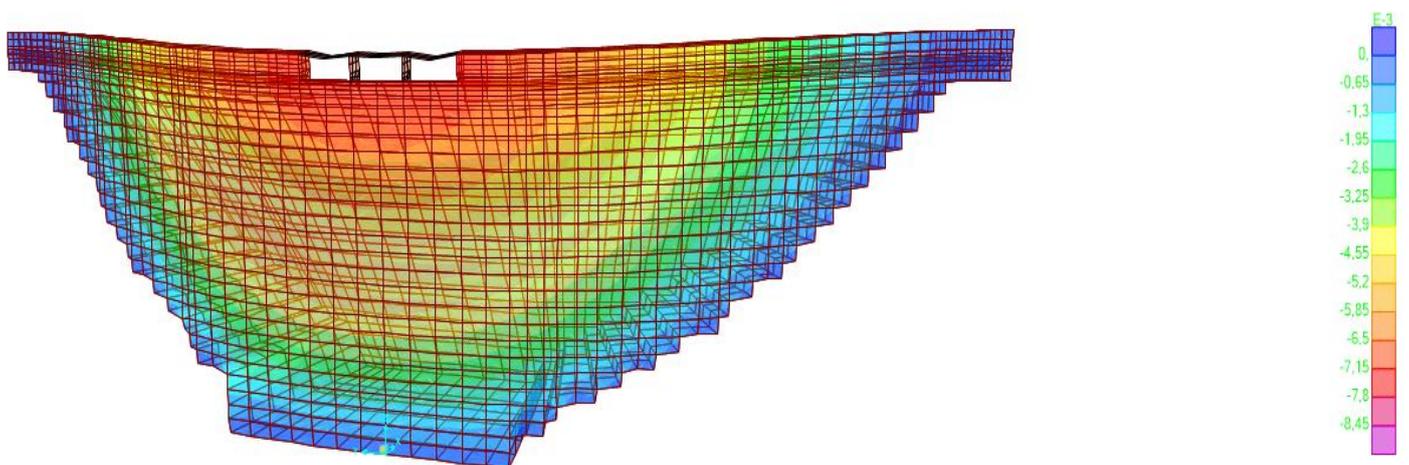


Figure 26 : Etat des contraintes σ_{zz} sur le corps du barrage pour le chargement statique

Sous chargement statique on remarque que les contraintes de traction sont plus importantes en allant du pieds amont vers le pont de l'évacuateur de crue où elles sont maximales.

5-2/-Cas dynamique :

On applique 2 accélérogrammes pour cette analyse, le premier celui du séisme de Kobe (1995 Japan) de magnitude 7.2 sur l'échelle de Richter et le second concerne le séisme de Imperial Valley (1997 USA) de magnitude 6.5

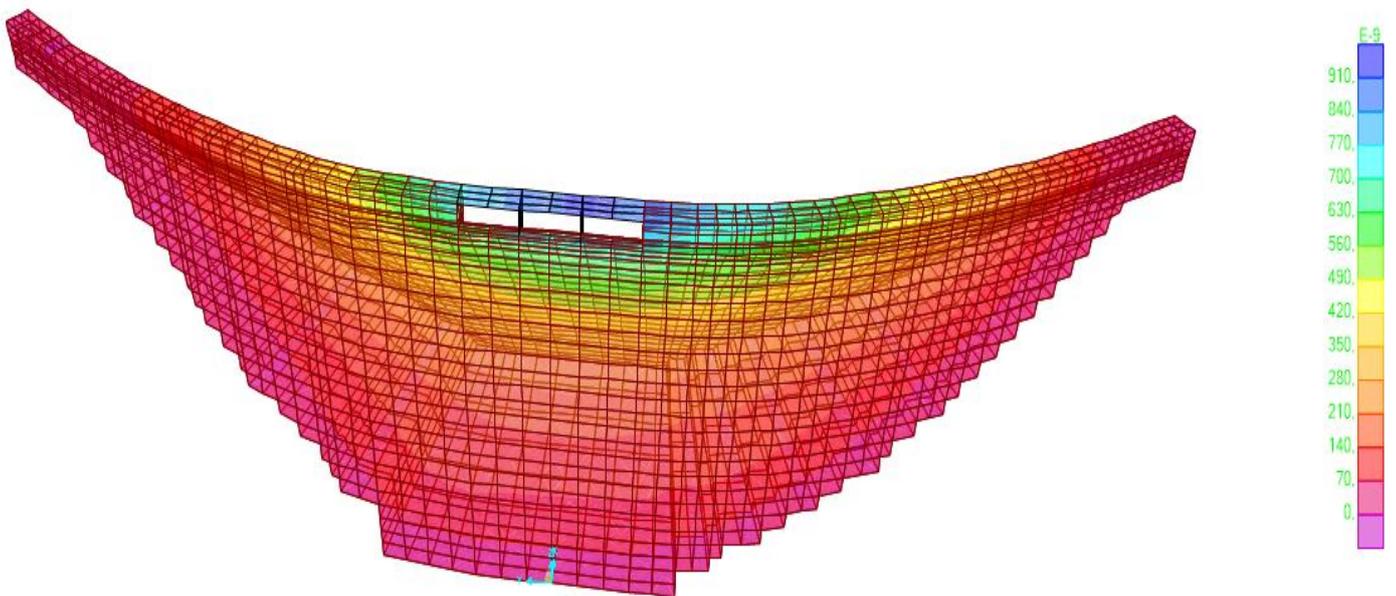


Figure 27 : Etat des contraintes σ_{xx} sous excitation du séisme de Kobe

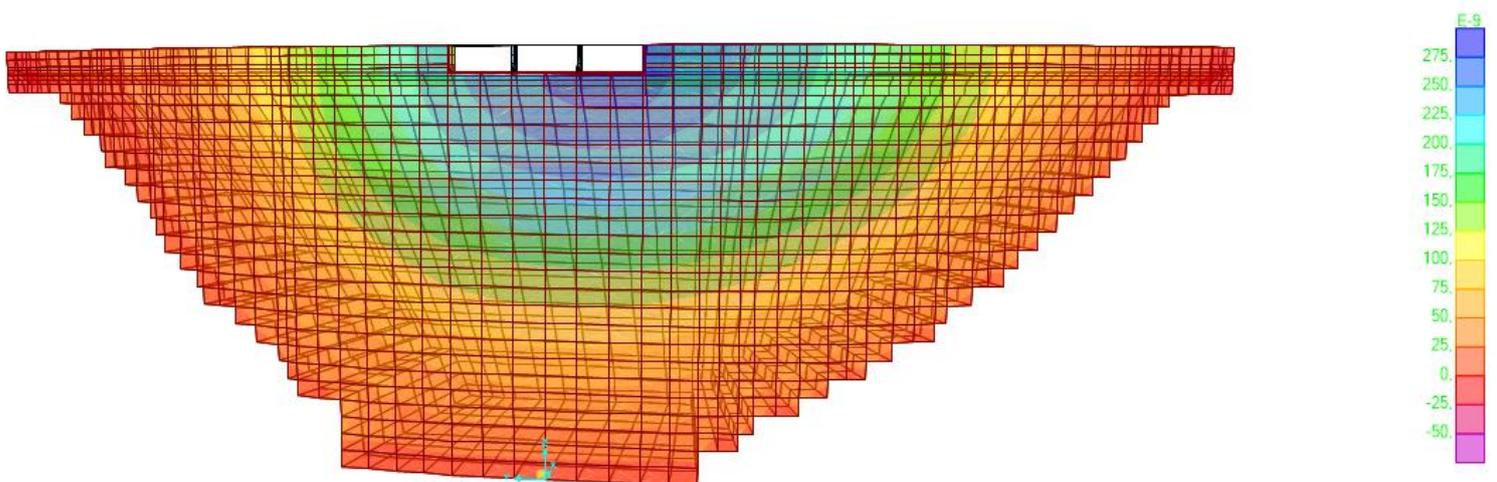


Figure 28 : Etat des contraintes σ_{zz} sous excitation du séisme de Kobe coté amont

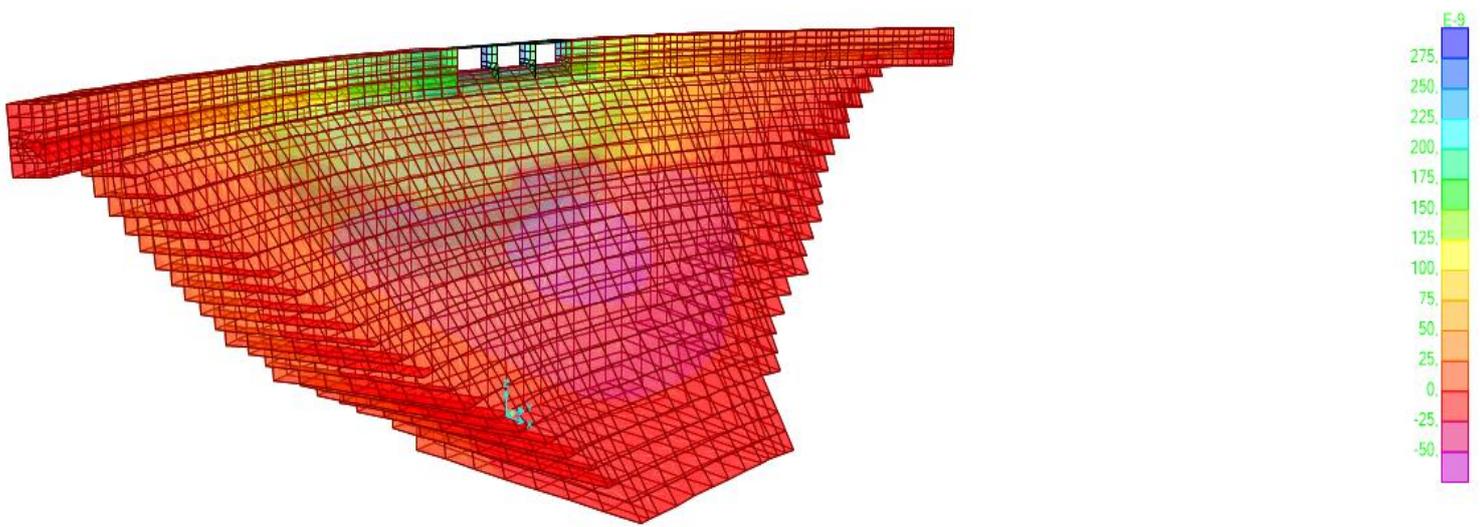


Figure 29 : Etat des contraintes σ_{zz} sous excitation du séisme de Kobe coté aval

Les contraintes de compression les plus importantes se trouvent sur le côté amont du barrage avec de plus grande valeurs en allant vers l'évacuateur de crue aussi on remarque le développement de contrainte de traction suivant z de la même façon ainsi que des contraintes de compression en aval.

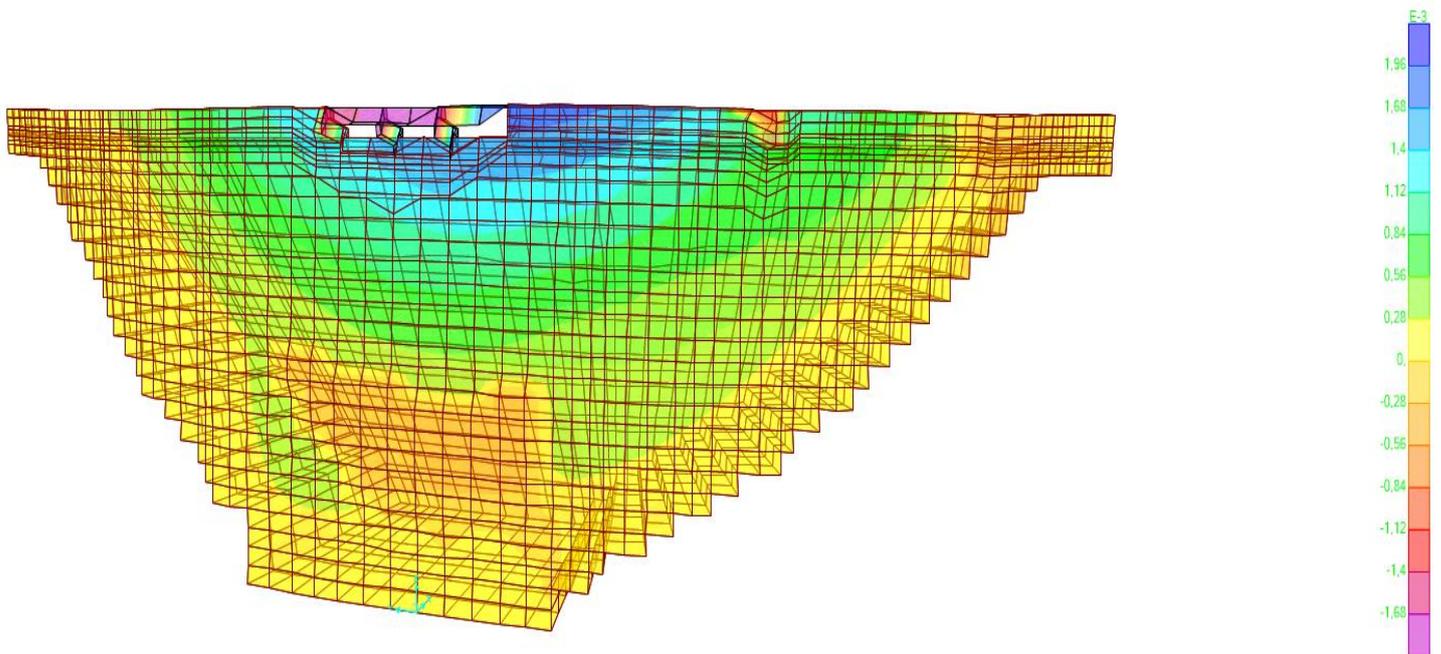


Figure 30 : Etat des contraintes σ_{xx} sous excitation du séisme de Imperial Valley

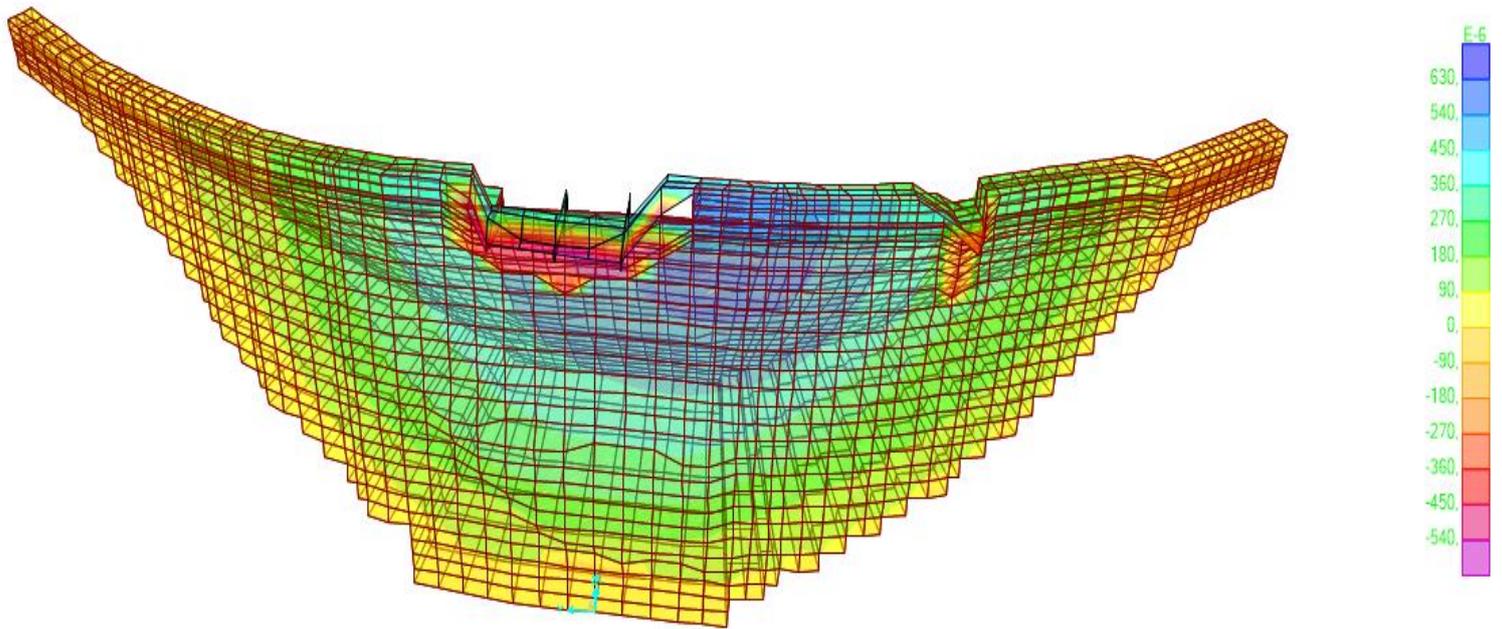


Figure 31 : Etat des contraintes σ_{zz} sous excitation du séisme de Imperial Valley

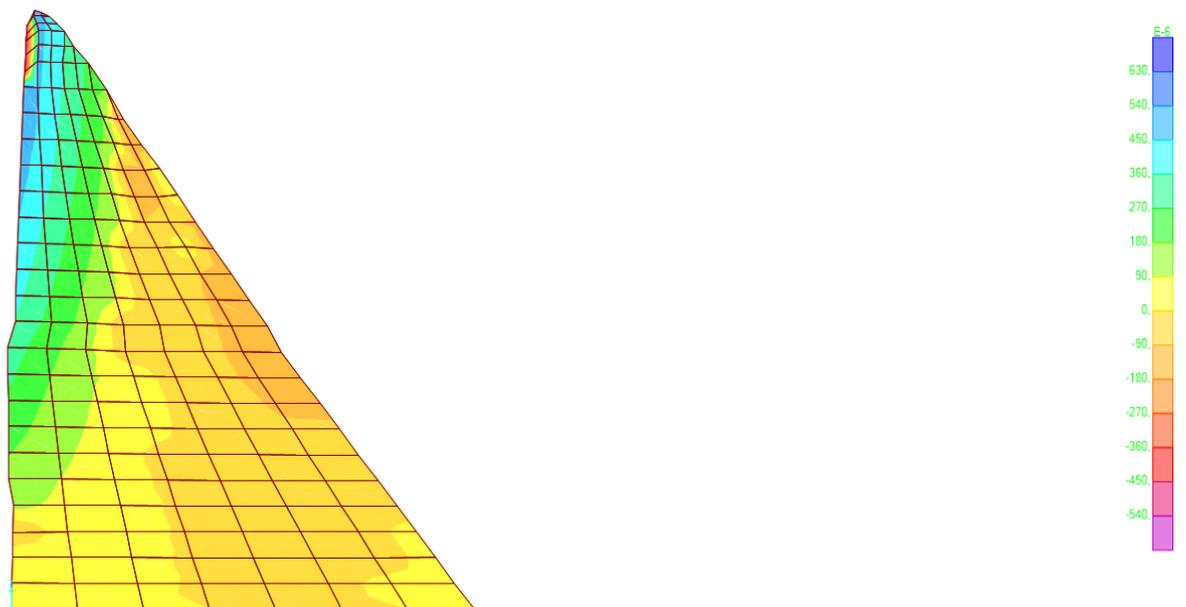


Figure 32 : Etat des contraintes σ_{zz} sous excitation du séisme de Imperial Valley en 2d

Suivant la direction x les contraintes de traction sont disposées près du pied amont avec une compression non négligeable au niveau de l'évacuateur de crue, selon Z la traction est importante sur le côté amont et diminue en allant vers le pied aussi une importante compression du coté aval du barrage

7.Sélection des zones de dommages probables :

D'après l'analyse de la répartition de contrainte, les zones qui sont plus à risque de souffrir de dommages sont la zone aux alentours du pont de l'évacuateur de crues (la crête) ainsi que du côté du parement aval et les zones supérieure du parement amont.

En tout 4 zones sont retenues comme le montre les figurent suivantes :

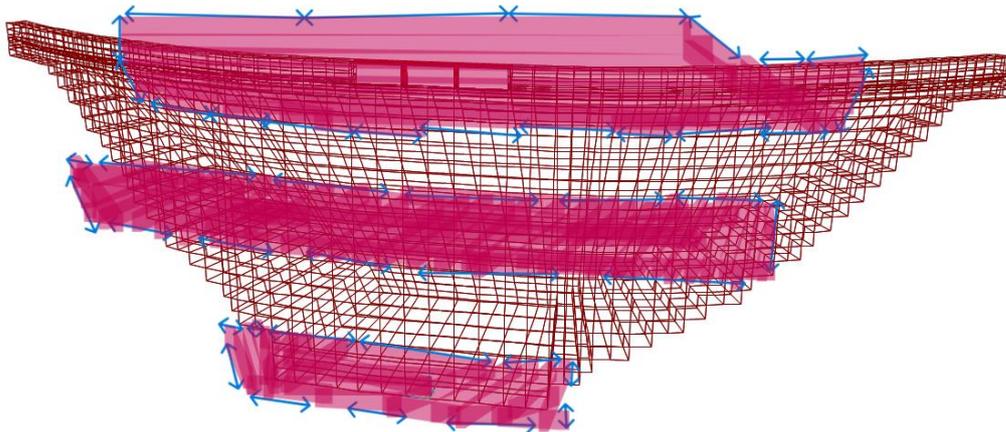


Figure 33 : Les zones retenues du coté amont du modèle 3d

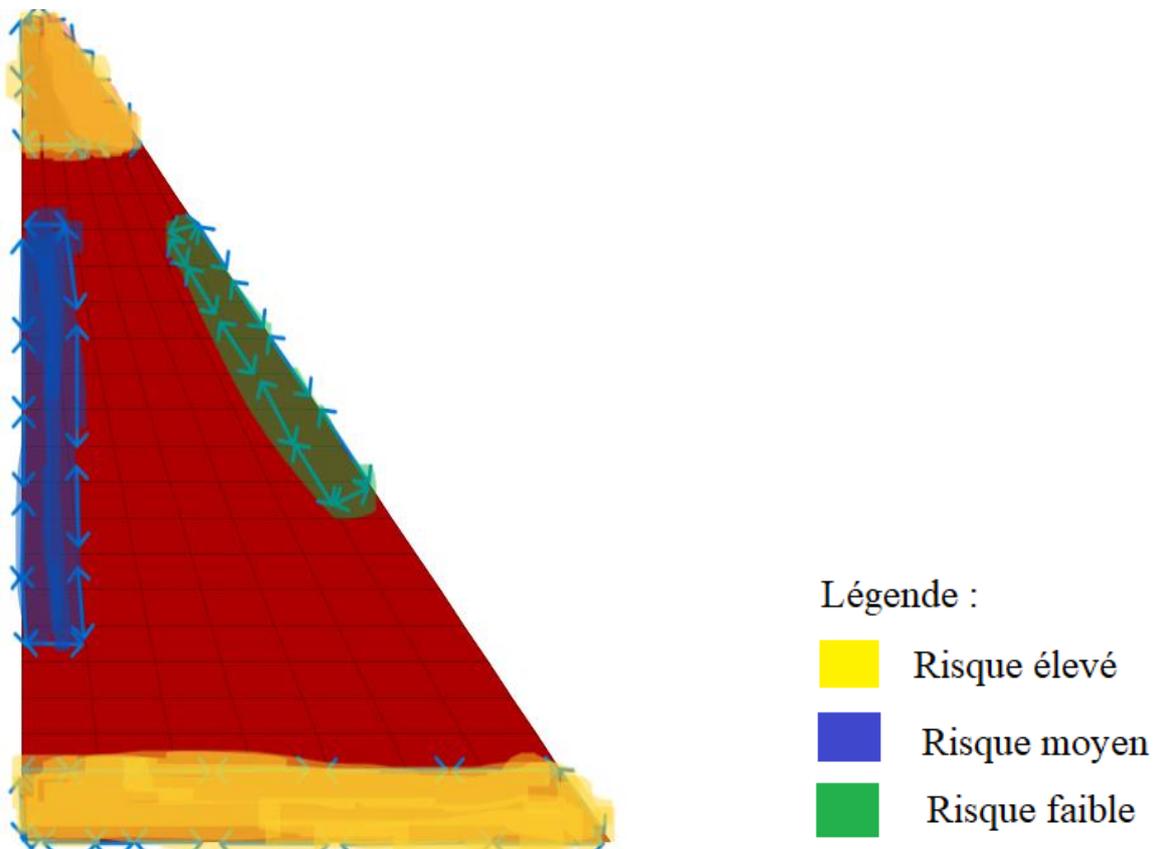


Figure 34 : Les 4 zones retenues en vue 2d

8.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous présentons le modèle 3d du barrage et le soumettons à des analyses modales pour tirer les fréquences propres de chaque mode de vibration et comparer les résultats, d'un côté l'influence de l'interaction fluide-structure a été clairement démontré avec une diminution de 58% des fréquences pour le barrage rempli par rapport à celle du barrage vide aussi la méthode simplifiée de TARDIEU surestime la fréquence fondamentale dans le cas du barrage rempli, mais se rapproche de la fréquence du barrage vide en 3D.

Enfin, l'analyse de la répartition des contraintes dans l'état statique et dynamique du barrage a permis de définir des zones plus à risques de subir des dommages où les contraintes sont maximales, ces zones serviront dans le chapitre suivant à optimiser le nombre et emplacement des capteurs en se basant sur le dommage subi par la structure.

Chapitre 3 :

Optimisation du nombre et emplacement des capteurs

1.Introduction :

Dans le domaine de la surveillance de la santé structurelle (SHM), l'utilisation de capteurs est primordiale pour assurer une évaluation continue et précise de l'intégrité des ouvrages. Ces dispositifs permettent de détecter et de suivre les dégradations potentielles en mesurant divers paramètres physiques, tels que les vibrations, les déformations, et les déplacements, qui sont des indicateurs clés de la condition d'une structure. Leur rôle est particulièrement critique pour des infrastructures massives et sensibles comme les barrages, où la défaillance peut avoir des conséquences catastrophiques.

Cependant, l'implantation d'un réseau de capteurs efficace soulève des défis complexes, notamment en ce qui concerne l'optimisation du nombre et de l'emplacement des capteurs. Une distribution inadéquate peut non seulement entraîner des lacunes dans la détection des dommages, mais également générer des coûts supplémentaires et des données inutilisables. Il devient alors essentiel de déterminer judicieusement la quantité minimale de capteurs nécessaires pour assurer une couverture optimale de la structure tout en minimisant les redondances.

Ce chapitre se penchera sur l'importance de l'optimisation du placement et du nombre de capteurs dans le cadre du SHM, en mettant l'accent sur les techniques modernes de sélection des capteurs et les avantages qu'elles apportent en termes d'efficacité et de coût. En tenant compte des contraintes économiques et techniques, il est crucial de développer des stratégies qui garantissent un diagnostic précis et fiable tout au long de la vie d'une structure.

2.Objectif du placement optimale des capteurs (OSP):

L'objectif du problème OSP est de trouver une configuration optimale des capteurs qui maximise la sensibilité et la fiabilité de la détection des dommages structurels. Cela implique de :

1. **Maximiser l'information** : Choisir des emplacements de capteurs qui capturent les données les plus représentatives et informatives sur l'état de la structure.
2. **Assurer la couverture** : Garantir que les capteurs couvrent toutes les zones critiques de la structure pour une surveillance exhaustive.
3. **Minimiser les coûts** : Optimiser le nombre de capteurs utilisés pour minimiser les coûts tout en assurant une surveillance efficace.

3.Solutions proposées :

Les solutions dépendent des critères d'évaluation et de la méthode d'optimisation choisie. Pour les critères nous adopterons 2 critères différents et nous comparerons les résultats, le premier étant le critère d'assurance modale (MAC) et le second sera le changement de flexibilité ΔF calculé à l'aide de la méthode basée sur la flexibilité, dans ce qui suit un rappel bref des 2 méthodes :

3.1.Le critère d'assurance modale MAC :

Le critère d'assurance modale (MAC) est utilisé pour comparer les formes modales d'une structure dans son état non endommagé (φ_i^u) et endommagé (φ_i^d). La formule du MAC est :

$$MAC(\varphi_i^u, \varphi_i^d) = \frac{[(\varphi_i^u)^T \varphi_i^d]^2}{[(\varphi_i^u)^T \varphi_i^u][(\varphi_i^d)^T \varphi_i^d]}$$

- **Valeur proche de 1** : Indique que la forme modale endommagée est presque identique à la forme non endommagée, signifiant que la structure est probablement intacte.
- **Valeur nettement inférieure à 1** : Suggère des différences significatives entre les formes modales, indiquant que la structure est endommagée.

La fonction objective qui quantifie la performance d'une configuration de capteurs dans le cas de ce critère cherchera à favoriser les individus avec une valeur de MAC minimale.

3.2. Méthode basée sur la flexibilité :

La détection des dommages structurels peut être effectuée en comparant les matrices de flexibilité des états sain et endommagé.

$$[F]_s = \sum_{k=1}^N \frac{1}{w_{s,k}^2} \varphi_{s,k} \varphi_{s,k}^t$$

$$[F]_d = \sum_{k=1}^N \frac{1}{w_{d,k}^2} \varphi_{d,k} \varphi_{d,k}^t$$

Les matrices de flexibilité pour les états sain $[F]_s$ et $[F]_d$ endommagé sont comparées pour obtenir la matrice de changement de flexibilité $[\Delta F]$:

$$[\Delta F] = |F_s - F_d|$$

La localisation des dommages est déterminée en calculant les valeurs maximales des colonnes de $[\Delta F]$. La flexibilité modale est particulièrement sensible aux dommages, offrant une précision supérieure par rapport à d'autres méthodes.[10]

4.Méthode d'optimisation :

Pour notre cas, on a choisi parmi les multiples méthodologies existantes les algorithmes évolutifs, Le concept de l'évolution en biologie repose sur l'adaptation des individus aux changements environnementaux. Les individus les plus aptes survivent et se reproduisent grâce à des processus tels que la sélection naturelle, la mutation, la compétition, la symbiose et l'immigration. Les algorithmes évolutionnaires imitent ces mécanismes en utilisant une population d'individus et des opérateurs qui traduisent ces processus.

Les différents types d'algorithmes évolutionnaires sont nés de la combinaison et de l'application de ces opérateurs dans divers ordres et configurations, comme exemples on cite les **Stratégies Évolutionnaires (ES)** : Simulent les règles d'évolution et l'évolution des règles d'évolution , **Évolution Différentielle (DE)** : Utilise des différences pondérées entre les vecteurs de solutions pour diriger la recherche , **Co-évolution** : S'inspire de l'évolution de deux populations en interaction de type symbiose (coopération) ou prédateur-proie (compétition) et pour notre cas on utilisera les **Algorithmes Génétiques (GA)** : Utilisent la combinaison, la mutation et la sélection pour évoluer une population de solutions. [15]

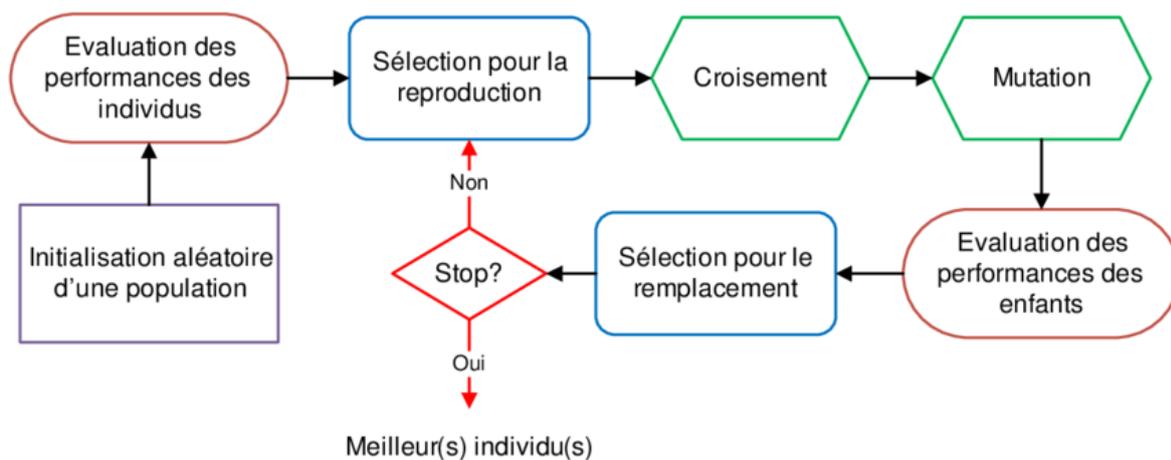


Figure 35 : Procédure suivie par un algorithme évolutionnaire

En résumé, les algorithmes évolutifs offrent une approche puissante et flexible pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes, en exploitant des mécanismes inspirés de l'évolution naturelle pour explorer efficacement l'espace des solutions possibles.

5.Algorithme génétique :

L'Algorithme Génétique est un algorithme d'optimisation qui s'inspire du processus d'évolution des êtres vivants. Il fut développé par le scientifique américain John Henry Holland dans les années 1970.[16]

En recherche opérationnelle, l'Algorithme Génétique est une métaheuristique de la grande famille des algorithmes d'évolution (Evolutionary Algorithms) qui offrent l'avantage de fournir des solutions de très grande qualité en un temps raisonnable, l'inconvénient est qu'il n'y a aucune garantie que la solution soit l'optimum global.

L'Algorithme Génétique se base au départ sur une population de solutions candidates appelées parfois individus, créatures, phénotypes qui va évoluer de génération en génération jusqu'à la génération qui contient les meilleures solutions.

Chaque individu comprend des propriétés et il peut être sujet à des transformations génétiques (mutation, croisement par exemple).

Chaque individu est évalué et cette valeur d'aptitude (fitness value) est un critère pour sa survie d'une génération à une autre.

Les étapes de l'algorithme génétique sont présentées dans le schéma suivant :

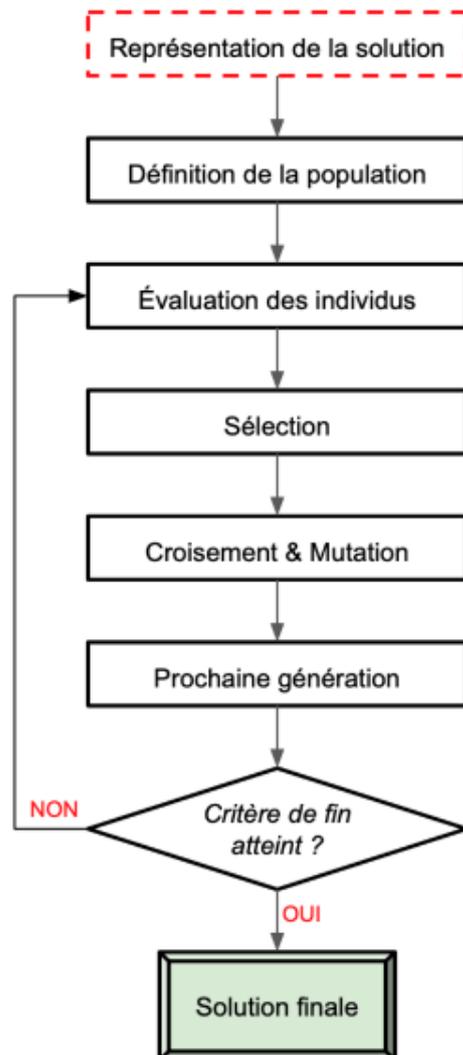


Figure 36 : Etapes de l'algorithme génétique

5.1.Représentation de la solution :

-Dans notre cas la représentation de la solution n'est rien de plus que les points où seront positionné les capteurs sur la structure et seront facilement observés sur le modèle 3d du barrage.

5.2.Définition de la population :

On choisira à partir de l'ensemble des points de la structure (8679 points) un sous ensemble appelé points candidats, ces points seront choisis selon leur accessibilités, sur le côté aval pour éviter les interférences causées par l'eau sur le côté amont et enfin de façon qu'il couvre toute la structure :

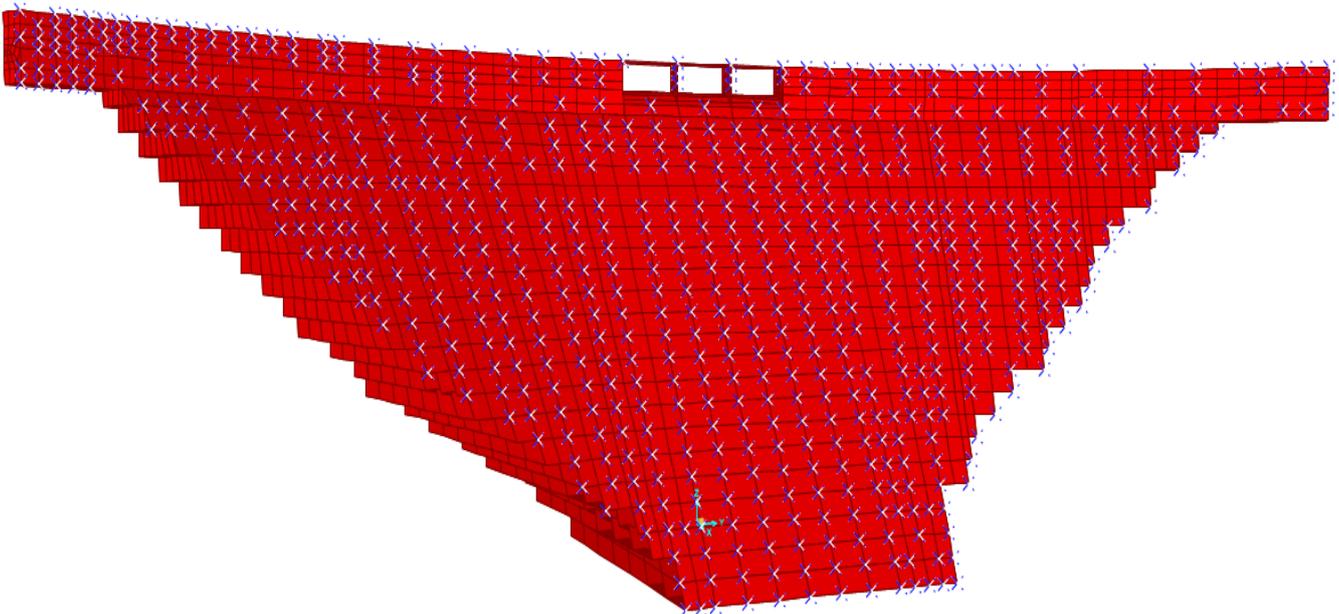


Figure 37 : Les points candidats retenus

5.3.Evaluation : calcul de la valeur du fitness :

Cette étape consiste à définir la fonction objective de notre problème. L'objectif étant selon l'expression de la fonction soit de la minimiser ou la maximiser selon le besoin.

Pour les 2 méthodes MAC et variation de flexibilité , la fonction objectives sera les valeurs respectives obtenus des méthodes (mac et ΔF) couplé à des contraintes concernant la distance minimale entre les points.

5.4. Selection :

Après avoir constitué notre population, Nous définissons donc un nombre d'*individus* que nous voulons avoir par génération. Pour ce faire, nous utilisons des [méthodes aléatoires](#) comme le [Tournament Selection](#).

Cette méthode consiste à sélectionner, parmi une liste d'*individus* extraits de la population, l'*individu* ayant le meilleur *fitness*.

5.5. Croisement et mutation :

Dans la science des gènes : le croisement et la mutation permettent de produire la génération descendante.

Le croisement :

Il consiste à partir de 2 *parents* de donner 2 *enfants* en faisant s'échanger leurs *propriétés*. Il existe plusieurs types de croisement :

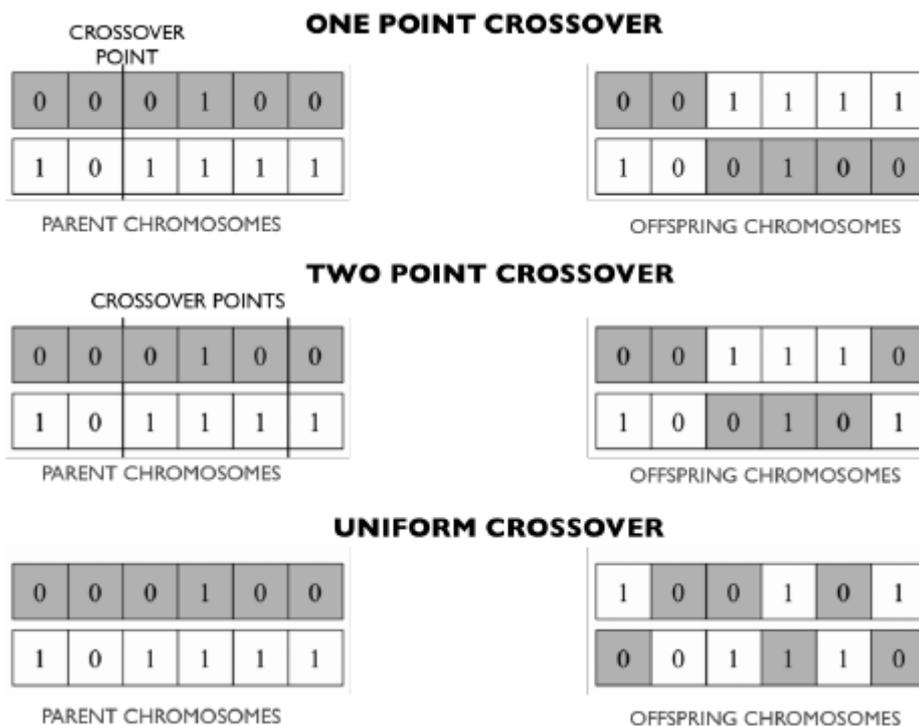


Figure 38 : les différents types de croisement

La mutation :

La mutation quant à elle consiste à modifier les propriétés d'un *individu*. Il existe 3 principaux types de mutation :

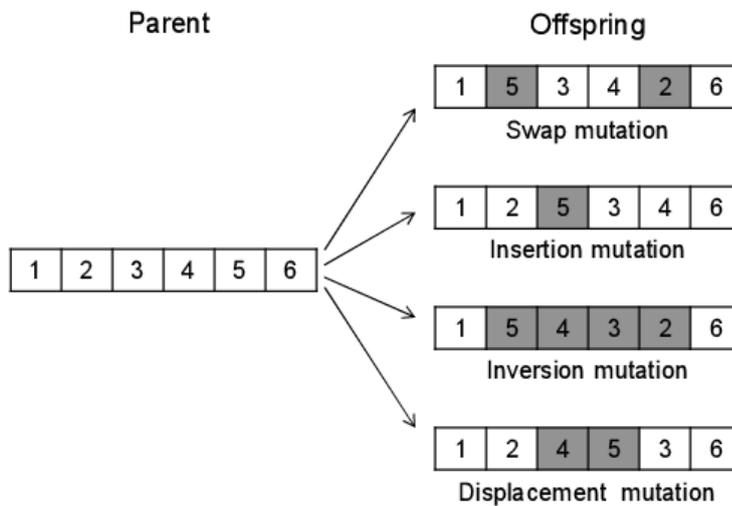


Figure 39 : les différents types de mutation

5.6. Prochaine génération :

La dernière étape consiste à former la génération suivante (*ascendants* vers *descendants*). Durant cette phase, il consiste à appliquer les différentes transformations génétiques sur une partie de notre génération actuelle. Ici également, nous avons deux méthodes (stratégies) pour produire la prochaine génération :

Méthode 1 : l'élitisme

On sélectionne les élites (*individus* ayant les meilleurs *fitness*) de notre génération actuelle et on les positionne **dans l'ordre** dans notre prochaine génération. Le reste de la population sera croisé et muté, puis ajouté **dans l'ordre** également dans la prochaine génération.

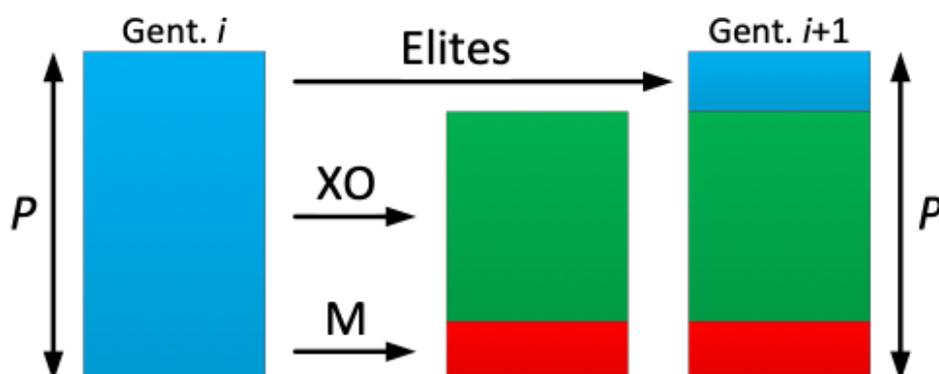


Figure 40 : schéma de l'élitisme, P : taille de génération, M : mutation, XO : Croisement

Méthode 2 : la fusion

On sélectionne toute la génération actuelle et on lui ajoute des individus croisés et des individus mutés issus de la génération actuelle. Puis, on trie et on sélectionne les P (la taille de la génération de base) premiers individus de notre liste d'individus récemment créée pour former la prochaine génération.

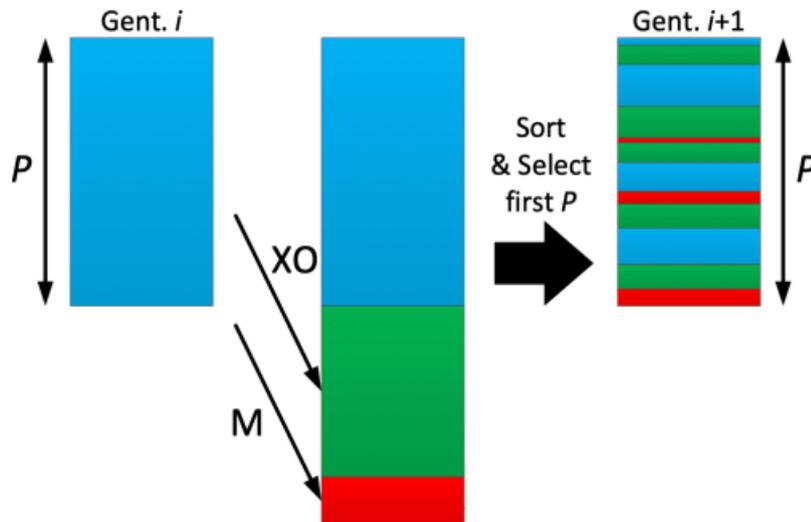


Figure 41 : schéma de la fusion

5.7.Solution finale :

Pour obtenir la solution finale de notre algorithme évolutif, il est crucial de définir un critère de fin de cycle, qui déterminera notre génération finale. Voici les principaux critères :

1. **Nombre de générations (d'itérations)** : Fixer un nombre spécifique d'itérations pour l'algorithme. Dans notre cas, nous choisirons 100 itérations ou générations.
2. **Temps de calcul CPU** : Définir une limite de temps d'exécution pour l'algorithme.
3. **Absence d'amélioration de la fitness** : Si, après un certain nombre d'itérations, la fonction objective (fitness) ne s'améliore plus, on arrête l'algorithme. Si elle continue de s'améliorer, on poursuit jusqu'à atteindre le nombre d'itérations défini.

6. Etude de cas :

6.1. Barrage vide :

On applique les 2 méthodes et on compare les résultats :

Pour la méthode basée sur le critère d'assurance modale MAC on obtient :

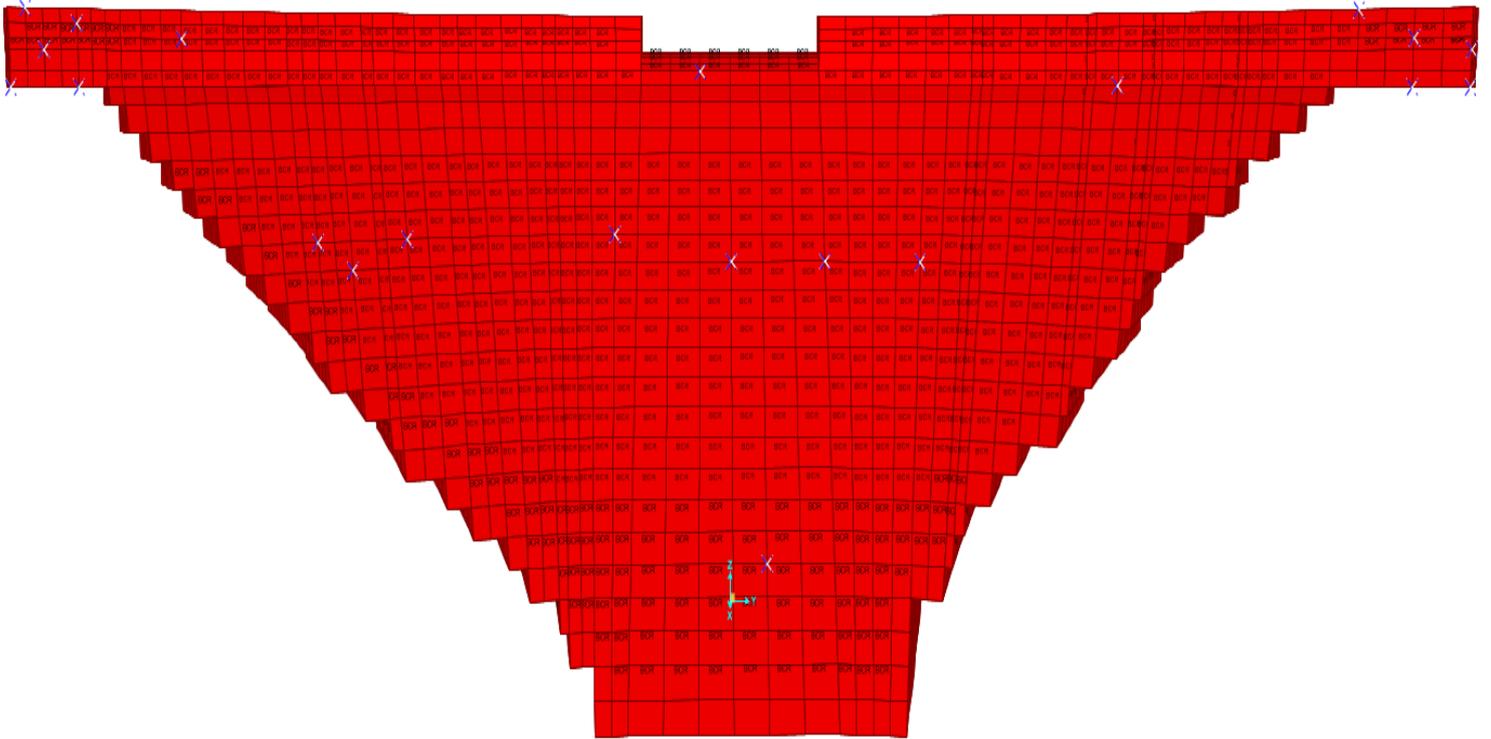


Figure 42 : 21 capteurs obtenus avec la méthode MAC

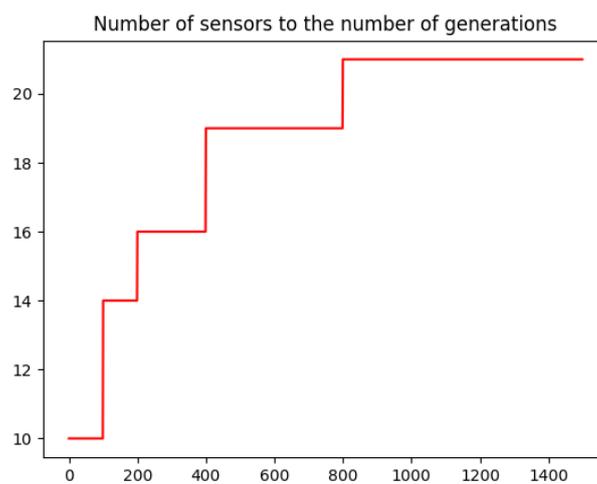
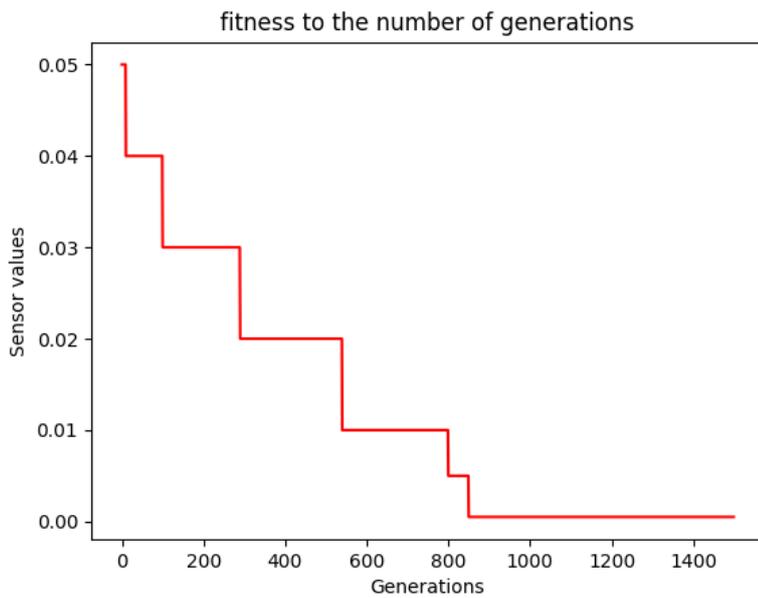


Figure 43 : nombre de capteurs et fitness en fonction du nombre de génération par le MAC



- Le bilan est 21 capteurs répartis sur notre structure du côté aval, à partir des graphes on remarque la convergence de la méthode pour le nombre de capteurs et la stabilisation du nombre à partir de la génération 800 aussi la fonction objective est minimisée autant que possible
- Pour la méthode basée sur le changement de flexibilité on obtient :

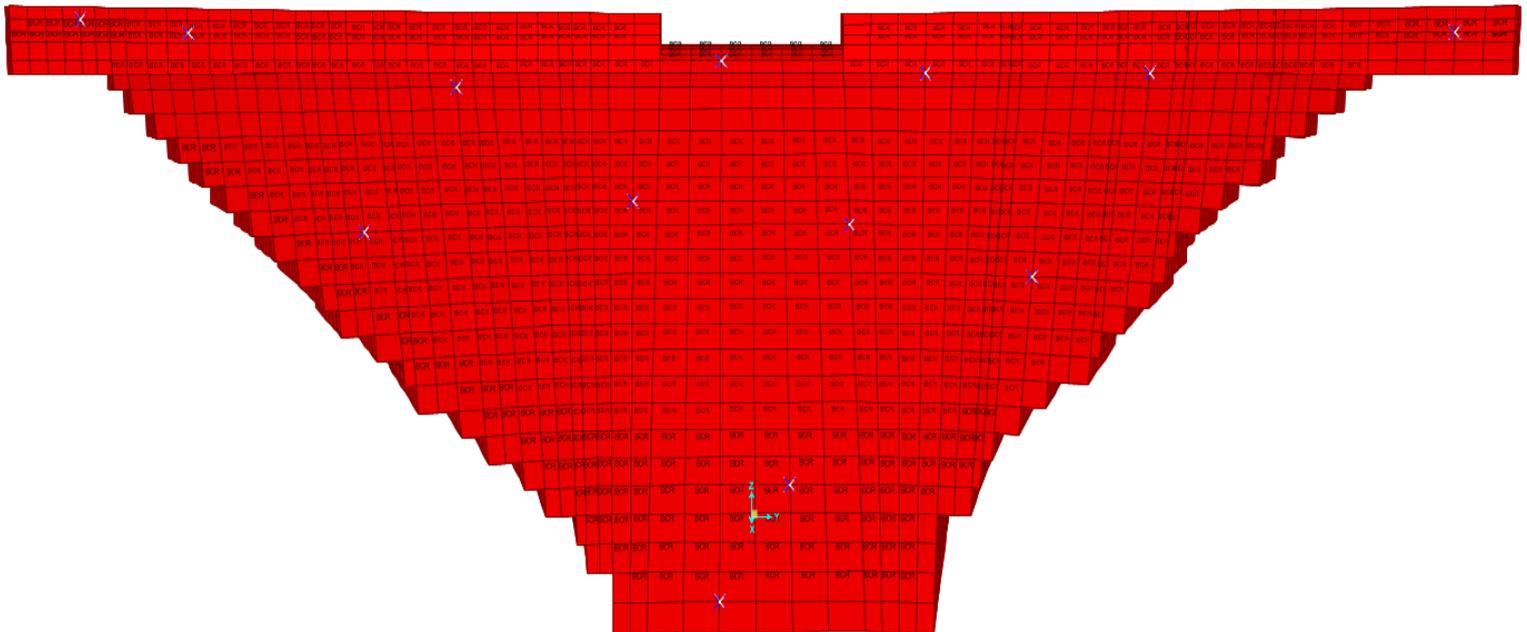


Figure 44 : 13 capteurs obtenus avec la méthode de changement de flexibilité

- Voici les graphes de l'évolution de la fitness et du nombre de capteurs en fonction du nombre de génération :

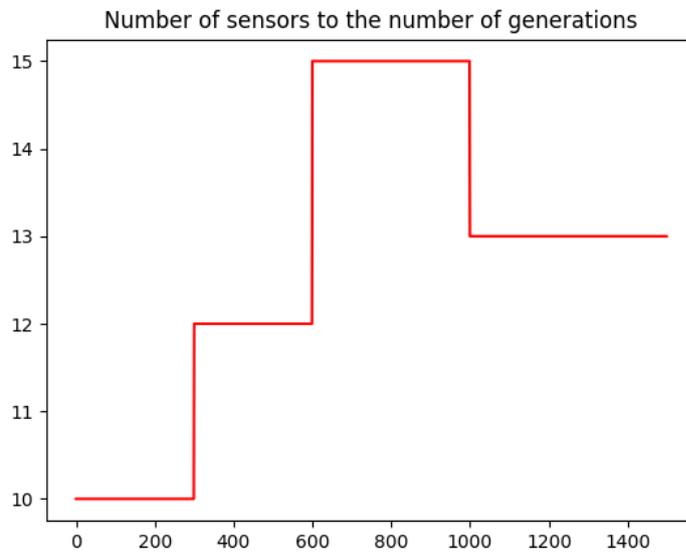


Figure 45 : nombre de capteurs en fonction du nombre de génération par la méthode de changement de flexibilité

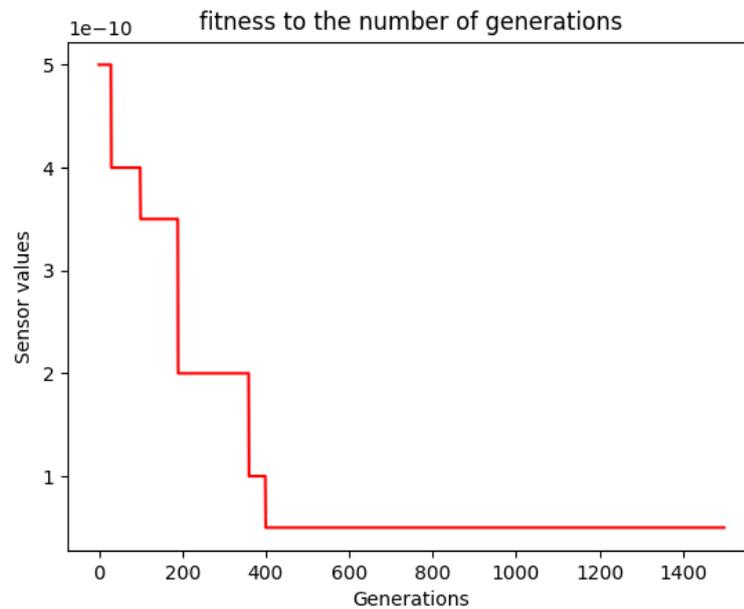


Figure 46 : fitness en fonction du nombre de génération par la méthode de changement de flexibilité

- Le bilan est 13 capteurs répartis sur notre structure du côté aval, à partir des graphes on remarque la convergence de la méthode pour le nombre de capteurs et la stabilisation du nombre à partir de la génération 1000 aussi la fonction objective est minimisée autant que possible, on applique une fonction objective qui prend en compte les distance euclidiennes et de manhattan(distance Taxicab)

Note :

Soit deux points A (x1, y1) et B(x2, y2) dans le plan cartésien. La distance Taxicab entre ces deux points est alors donnée par :

$$D(A, B) = |x_2 - x_1| + |y_2 - y_1|$$

Cette formule correspond à la distance de Manhattan (ou distance de bloc) entre les deux points A et B, elle est égale à la somme des différences absolues des coordonnées des deux points.

Rappelons que la distance euclidienne se calcule par la formule :

Pour deux points P (x₁, y₁) et Q (x₂, y₂) dans un plan à deux dimensions, la distance euclidienne est définie comme :

$$d(P, Q) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

- L'association de ces 2 distances assure qu'une distance minimale est respectée entre les points.

6.2. Barrage rempli (100%) :

Voici les résultats obtenus pour la méthode basée sur le MAC :

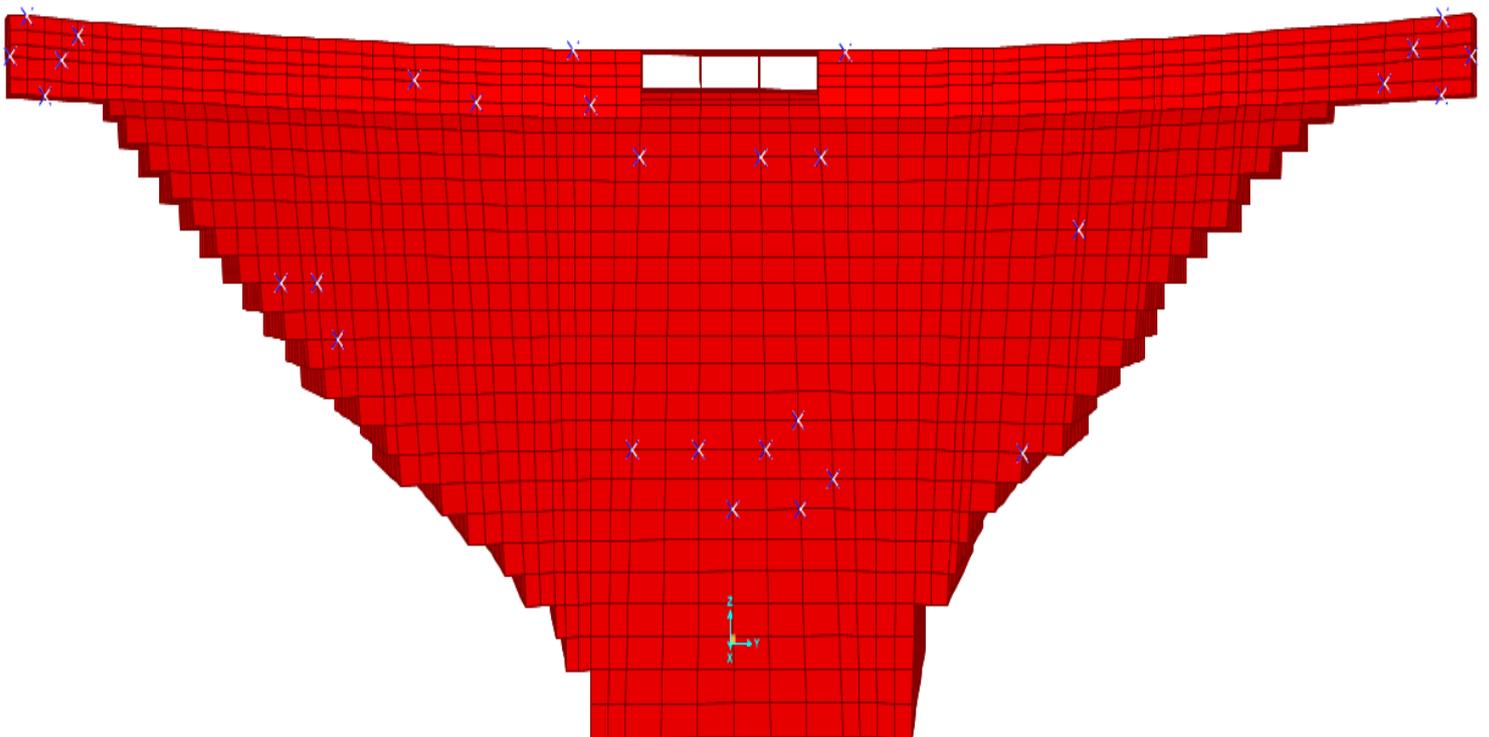


Figure 47 : 30 capteurs obtenus avec la méthode MAC

- Voici les graphes de l'évolution de la fitness et du nombre de capteurs en fonction du nombre de génération :

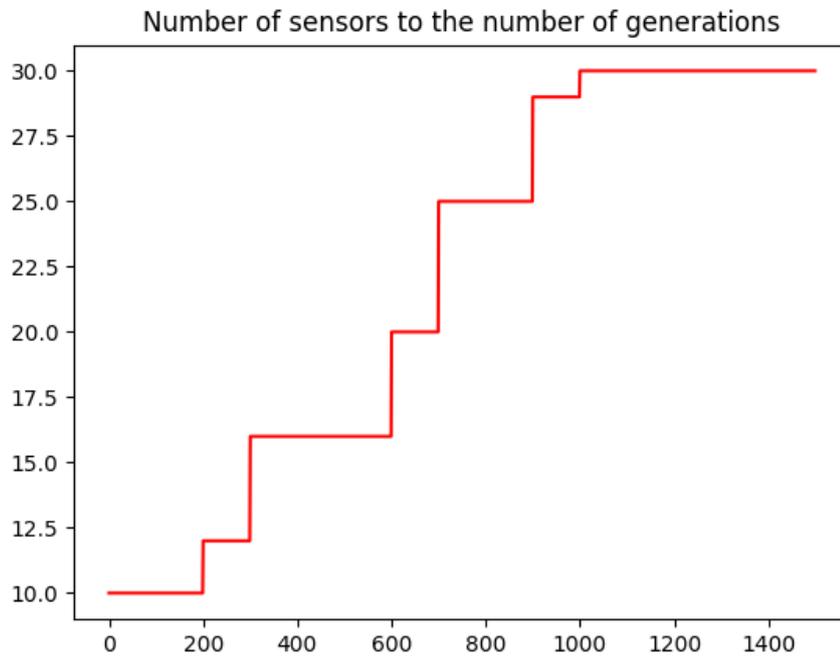


Figure 48 : Nombre de capteurs en fonction du nombre de génération

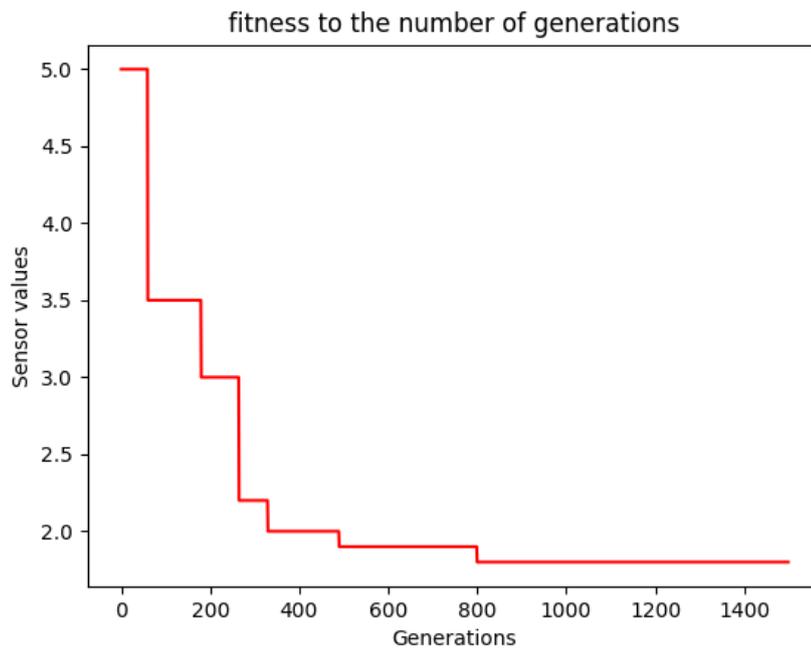


Figure 49 : fitness en fonction du nombre de génération

- Le bilan est 30 capteurs répartis sur notre structure du côté aval.

-Pour la méthode basée sur le changement de flexibilité on obtient :

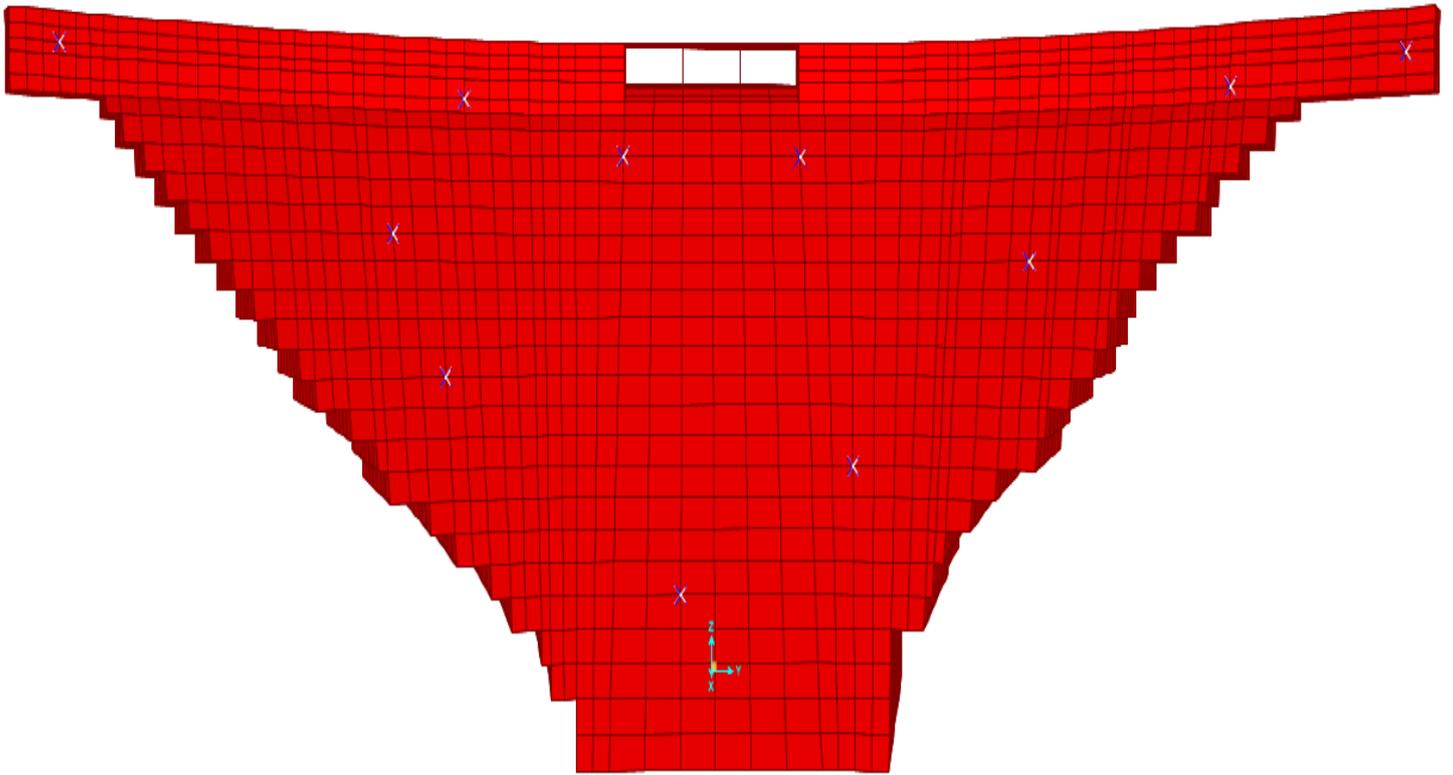
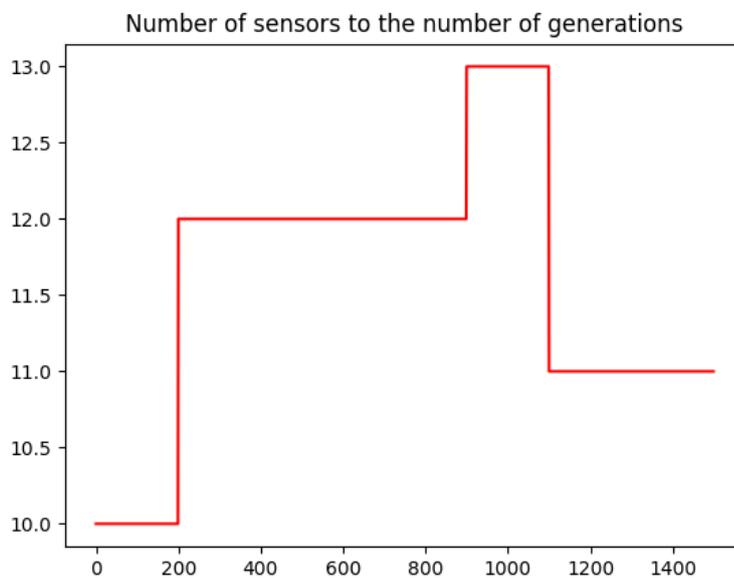


Figure 50 : 11 capteurs avec la méthode de changement de flexibilité

-Voici les graphes de l'évolution de la fitness et du nombre de capteurs en fonction du nombre de génération :



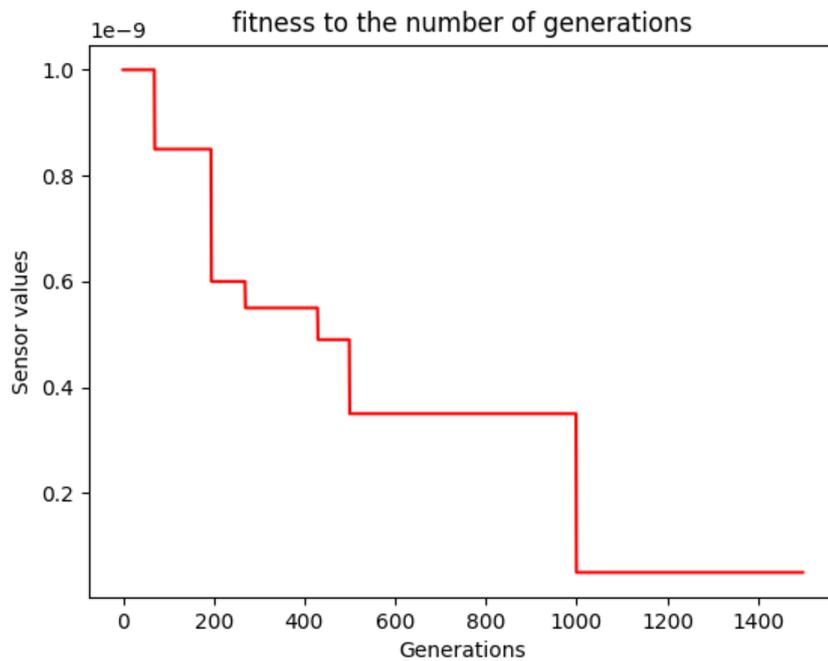


Figure 51 : fitness et nombre de capteurs en fonction du nombre de génération

6.3.Analyse des résultats :

En comparant les résultats obtenus pour les 2 cas (barrage vide et rempli) , les 2 méthodes donnent des résultats cohérents et satisfaisant pour le barrage vide et rempli , la méthode basée sur le changement de flexibilité donne une meilleure couverture avec un nombre moins important des capteurs et ceci pour le même nombre de générations dans les 2 cas.

Dans ce qui suit, la méthode basée sur le changement de flexibilité sera utilisée au détriment de la méthode MAC pour la détermination du nombre et emplacement des capteurs dans un barrage avec différents scénarios de dommages et sévérités, ce choix se justifie du fait du nombre de capteurs qui est minimal dans le cas de la méthode de flexibilité et la meilleure répartition de ces derniers.

6.4. Application pour différents scénarios de dommages:

Dans ce qui suit on essaiera d'optimiser le nombre et emplacement des capteurs en se basant sur différents scénarios de dommages et sévérités, celle-ci se manifesteront par une diminution progressive de la rigidité, On considère une baisse de rigidité variant de 1 % à 60 %. C'est à dire si la rigidité initiale du matériau est prise égale à E_0 , on diminue par la suite cette rigidité (99% à 40%) E_0 . Les sévérités prises en compte sont 1%, 5%, 10%, 20% ,40%, 50% et 60%. Dans le chapitre précédent 4 zones ont été considérées pour l'application du dommage ainsi ces zones seront utilisées dans les scénarios de dommages suivant :

- Endommagement total d'une zone
- Endommagement total d'une zone et partiel d'une autre
- Endommagement total d'une zone et partiel de 2 autres
- Endommagement total d'une zone et partiel de 3 autres
- Endommagement total de 2 zones et le reste ne change pas
- Endommagement total de 2 zones et partiel d'une autre
- Endommagement total de 2 zones et partiel de 2 autres
- Endommagement total de 3 zones
- Endommagement total de 3 zones et partiel d'une zone
- Endommagement total de toutes les zones
- Endommagement partiel d'une zone
- Endommagement partiel de 2 zones
- Endommagement partiel de 3 zones
- Endommagement partiel de 4 zones
- 50% d'endommagement d'une zone
- 50% d'endommagement d'une zone et total de 3 autres
- 50% d'endommagement d'une zone et total de 2 autres
- 50% d'endommagement d'une zone et total de 1 autre
- 50% d'endommagement d'une zone et partiel de 3 autres
- 50% d'endommagement d'une zone et partiel de 2 autres

- 50% d'endommagement d'une zone et partiel de 1 autre
- 50% d'endommagement de 2 zones
- 50% d'endommagement de 2 zones et total de 2 autres
- 50% d'endommagement de 2 zones et total de 1 autre
- 50% d'endommagement de 2 zones et partiel de 2 autres
- 50% d'endommagement de 2 zones et partiel de 1 autre
- 50% d'endommagement de 3 zones
- 50% d'endommagement de 3 zones et total de 1 autre
- 50% d'endommagement de 3 zones et partiel de 1 autre
- 50% d'endommagement de 4 zones

Note : Endommagement --> diminution de la rigidité des solides de la zone sélectionnée

Total → tous les solides de la zone sont touchés par le dommage

Partiel → quelque solides (pourcentage fixé 30% des solides) sont touchés aléatoirement

50% d'endommagement → 50% du nombre total des solides de la zone seront endommagés

-Pour le premier cas par exemple, « Endommagement total d'une zone » chaque zone subira pour la sévérité en cours le scénario de dommage càd pour cette exemple 4 scénarios possible : Endommagement total de la zone 1, Endommagement total de la zone 2, Endommagement total de la zone 3 et Endommagement total de la zone 4. L'intersection entre les différentes configurations de capteurs sera prise comme solution pour le scénario en cours.

6.5.Rappel des zones retenues :

Dans le chapitre précédent 4 zones ont été retenues pour recevoir les différents scénarios d'endommagement : le pied amont, la crête et ses alentours, le parement amont supérieur et enfin le parement aval.

-38 solides sélectionnés pour le pied amont « Zone 1 » :

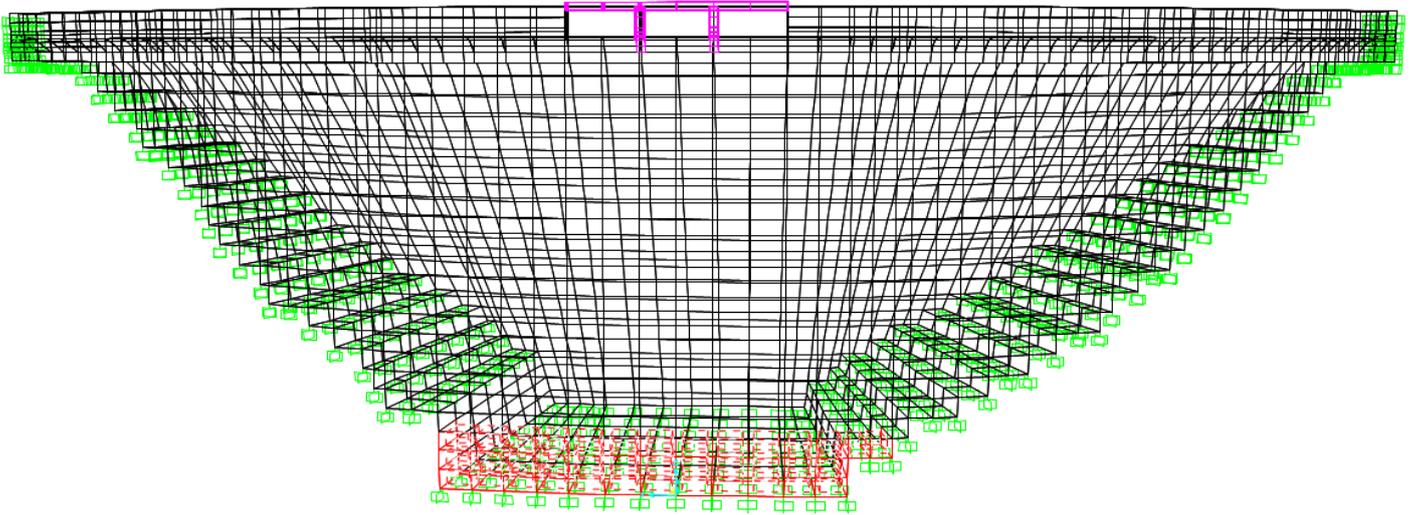


Figure 52 : La zone du pied amont sélectionnée

- 178 solides sélectionnés pour la crête et ses alentours « zone 2 » :

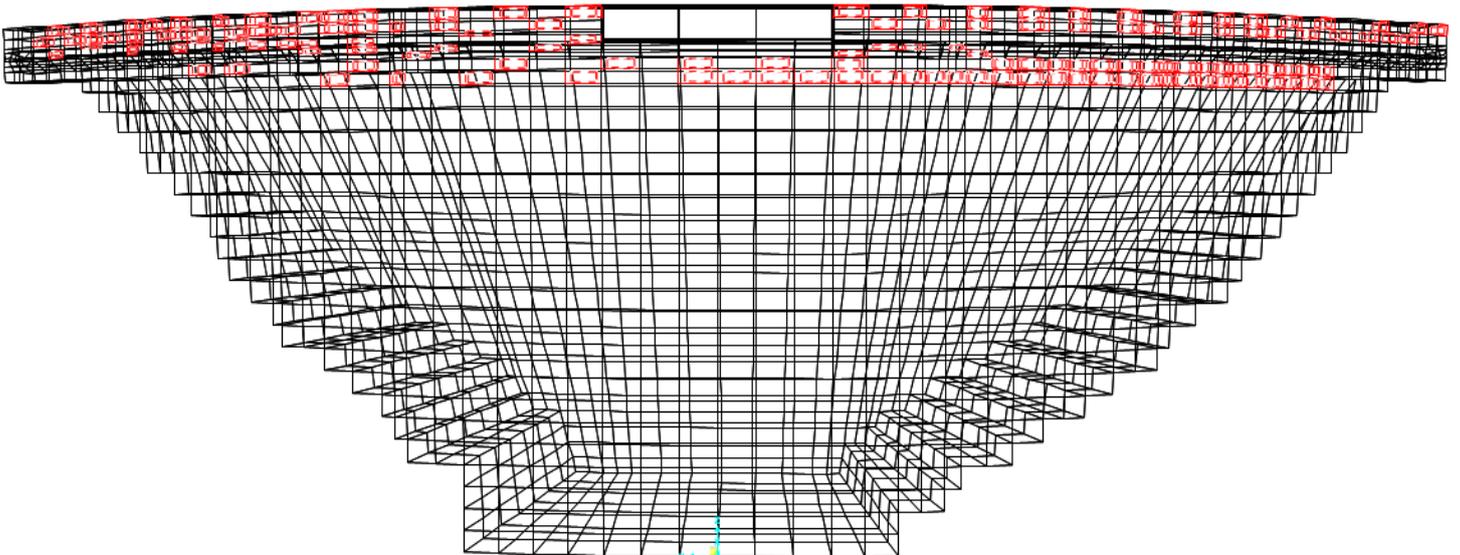


Figure 53 : La zone de la crête sélectionnée

- 99 solides sélectionnés pour le parement aval « Zone 3 » :

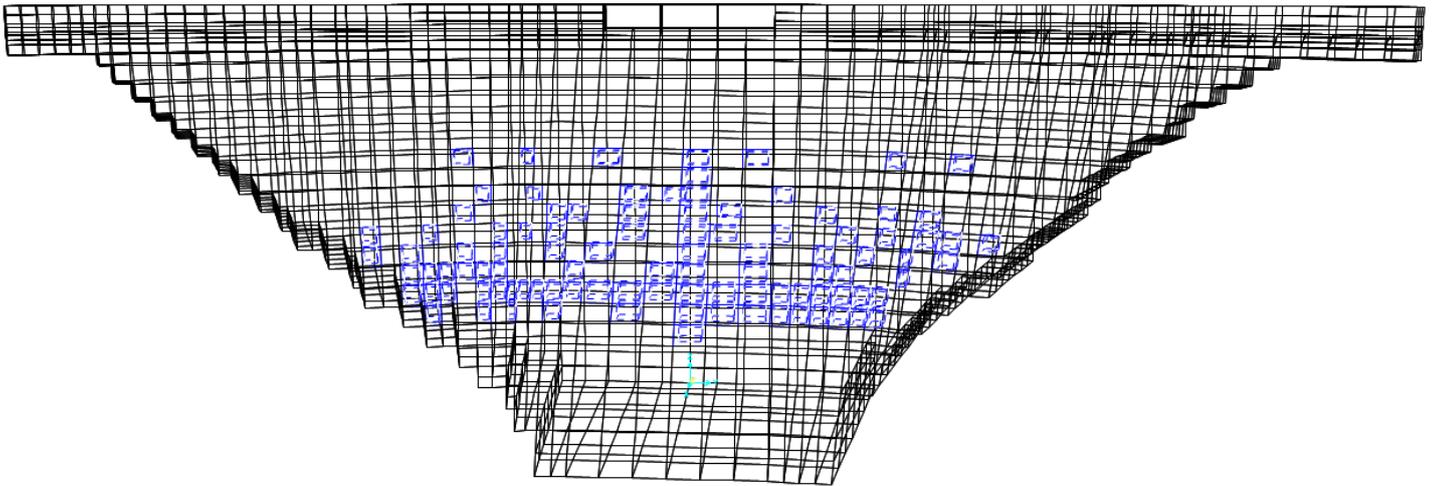


Figure 54 : La zone du parement aval sélectionnée

-96 solides sélectionnés pour le parement amont « Zone 4 » :

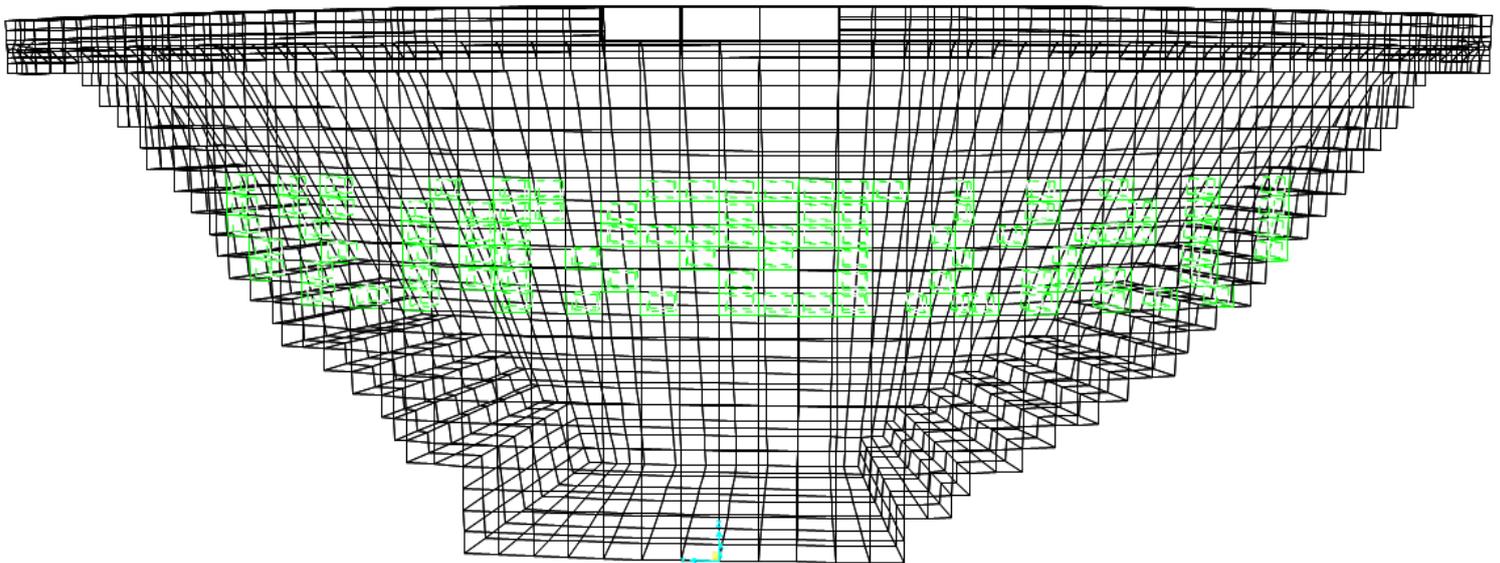


Figure 55 : La zone du parement amont sélectionnée

-Les solides de chaque zone verront leur rigidité réduite selon la sévérité choisie aussi pour chaque sévérité une disposition optimale de l'emplacement des capteurs sera choisi par l'intersection des différentes configurations obtenues des différents cas possibles .

6.6.Endommagement total d'une zone :

Résultats :

Sévérité 1% :

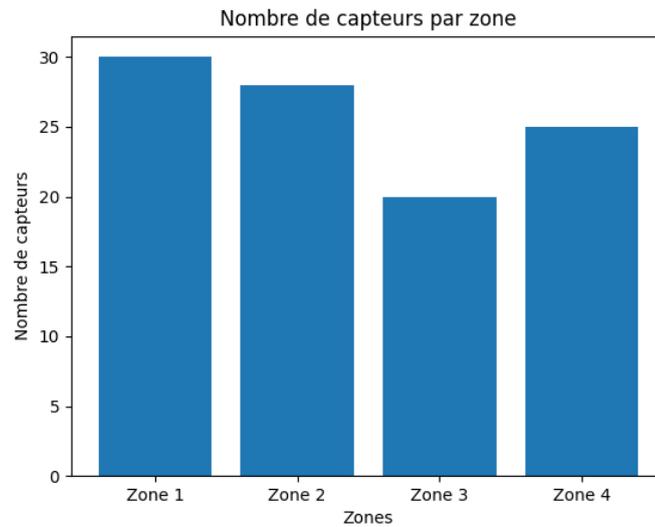


Figure 56 : résultats du nombre de capteurs pour la sévérité 1%

L'intersection donne :

[37,560,544,108,525,549,390,219,140,162,88,455,280,420,350,15,5979] chaque nombre représente l'identifiant d'un point sur la face aval du barrage .

Sévérité 5% :

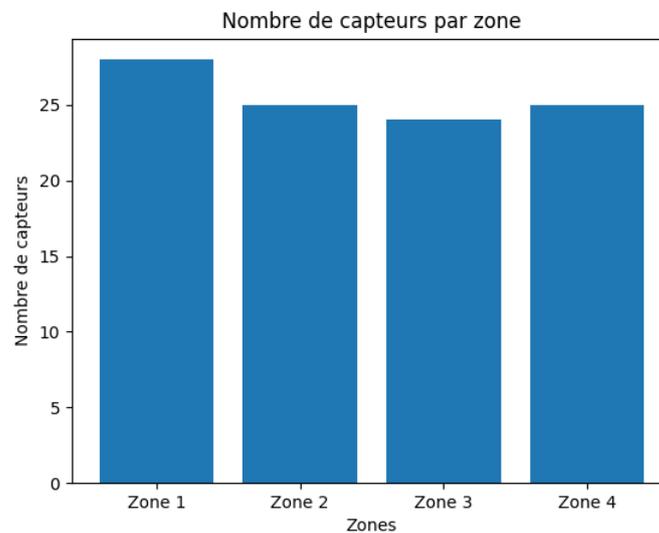


Figure 57 : résultats du nombre de capteurs pour la sévérité 5%

- L'intersection donne dans ce cas :

[85,219,350,165,450,368,105,280,420,395,141,15,545,524,37]

Sévérité 10% :

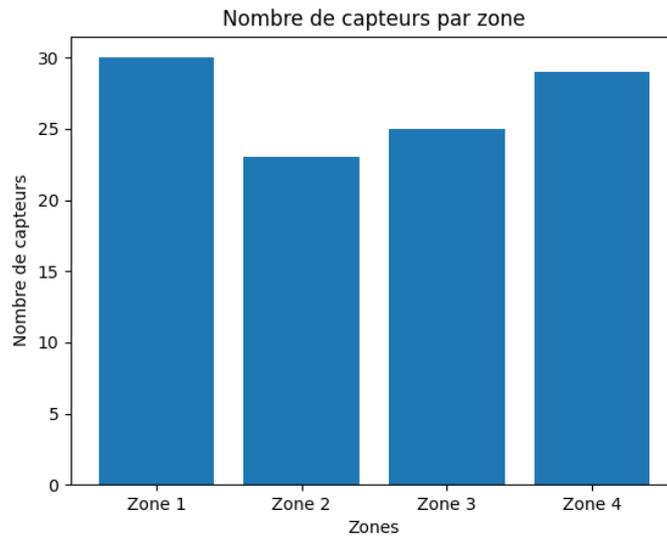


Figure 58 : résultats du nombre de capteurs pour la sévérité 10%

L'intersection donne : [162,220,88,265,450,355,100,280,420,395,141,15,544,526,35,5979]

Sévérité 20% :

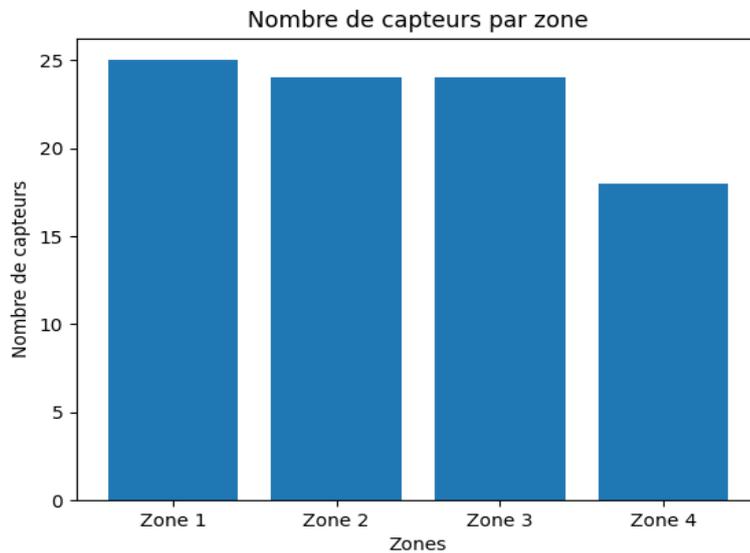


Figure 59 : résultats du nombre de capteurs pour la sévérité 20%

L'intersection donne :

[40,88,390,280,160,261,350,544,140,108,289,526,420,220,450,10,5979]

Sévérité 40% :

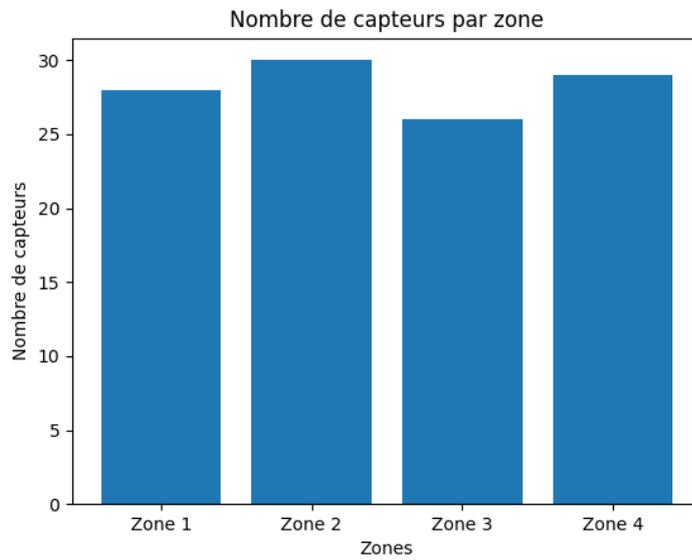


Figure 60 : résultats du nombre de capteurs pour la sévérité 40%

L'intersection donne :

[420,450,545,162,15,139,265,280,349,37,108,640,520,395,190,220,87]

Sévérité 50% :

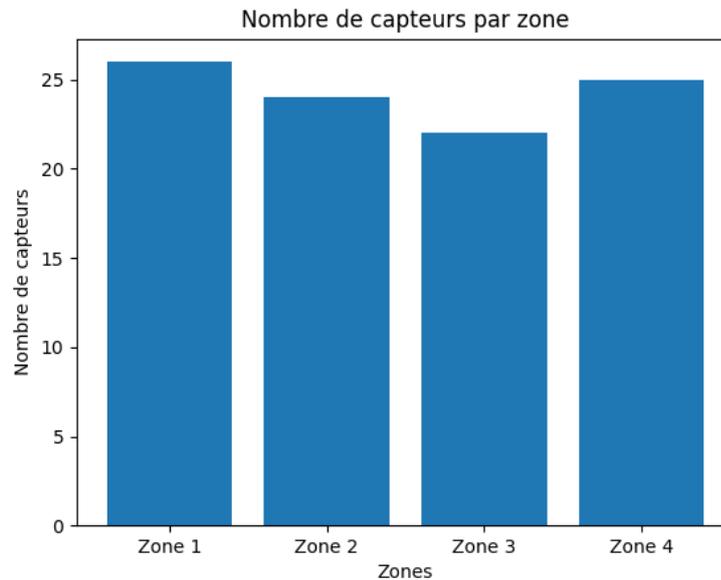


Figure 61 : résultats du nombre de capteurs pour la sévérité 50%

L'intersection donne : [110,525,37,88,141,395,419,270,544,445,197,218,484,15,350,5979]

Sévérité 60% :

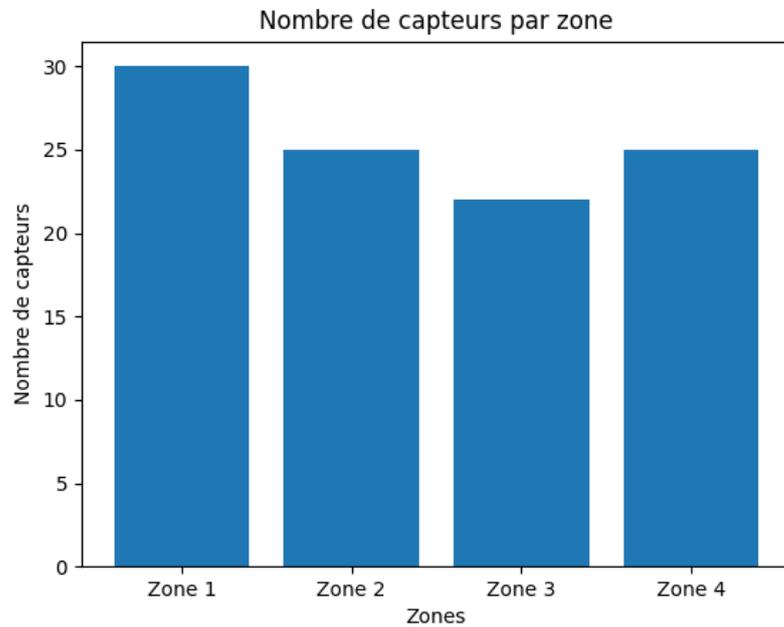


Figure 62 : résultats du nombre de capteurs pour la sévérité 60%

L'intersection donne :

[40,280,108,15,140,544,90,425,305,395,356,249,219,160,526,449,5979]

Finalement, la configuration idéale (15 capteurs) pour toute ces sévérités pour ces cas d'endommagement est :

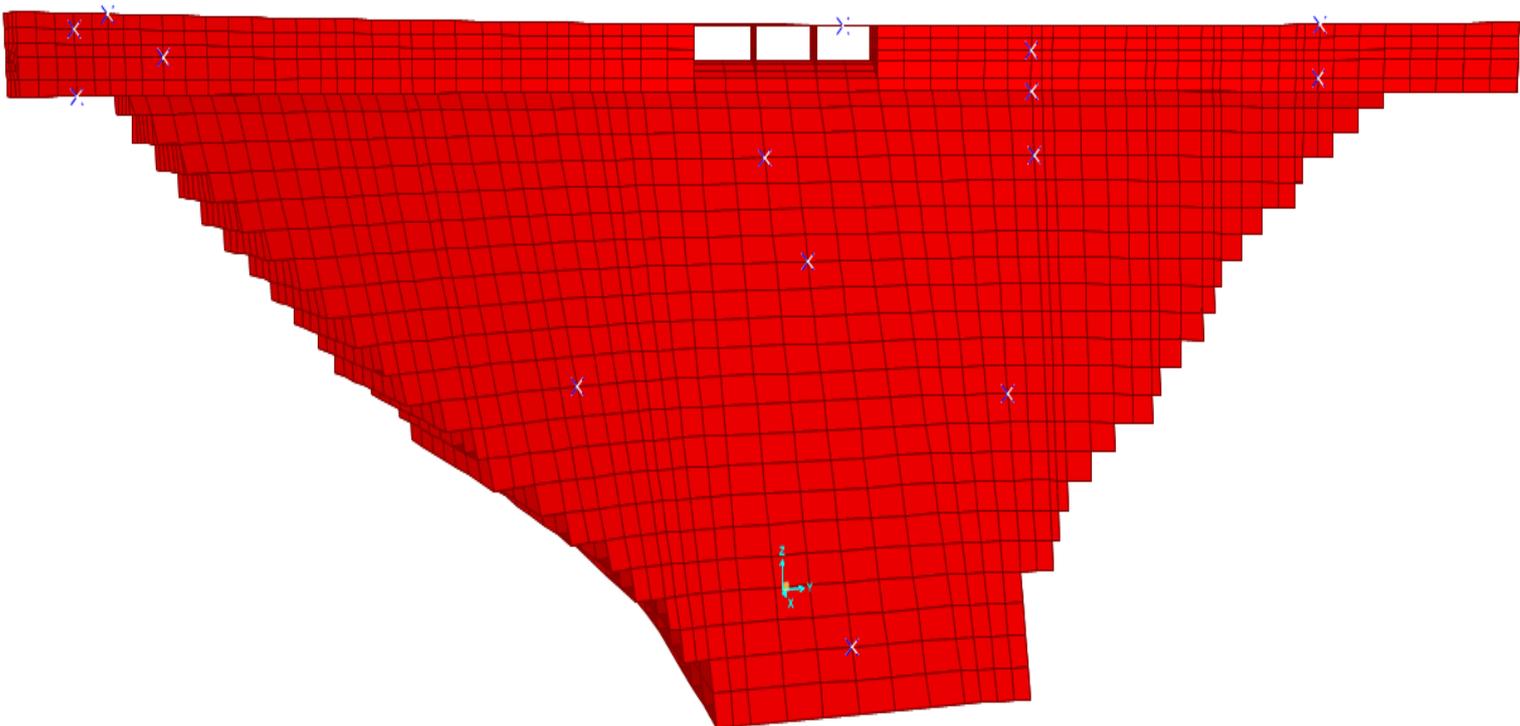


Figure 63 : Configuration optimale des capteurs pour Endommagement total d'une zone

6.7. Endommagement total de toute les zones :

Pour chaque sévérité, un seul cas envisageable : zone 1 + zone 2 + zone 3 + zone 4 :

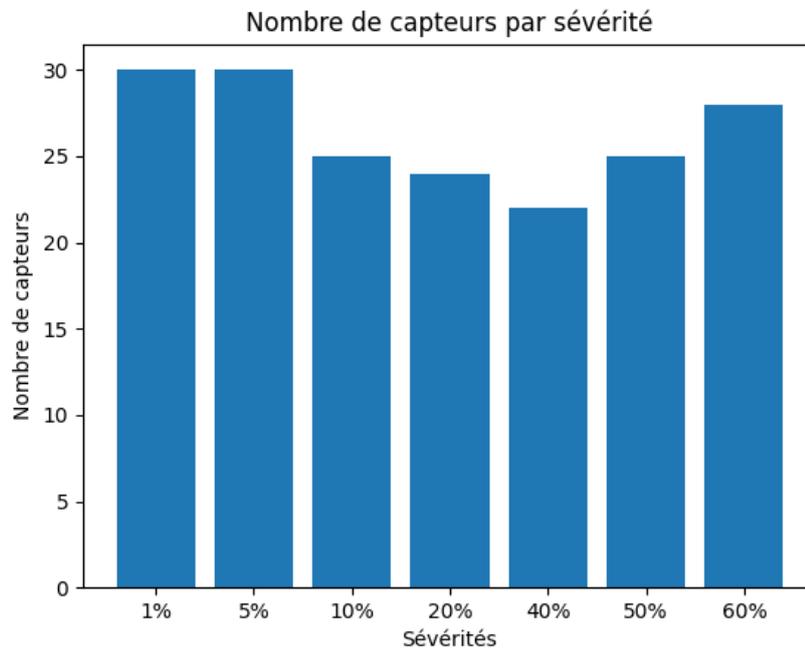


Figure 64 : Nombre de capteurs par sévérité pour chaque cas

On obtient après intersection la configuration optimale des capteurs pour toutes les sévérités sur le barrage :

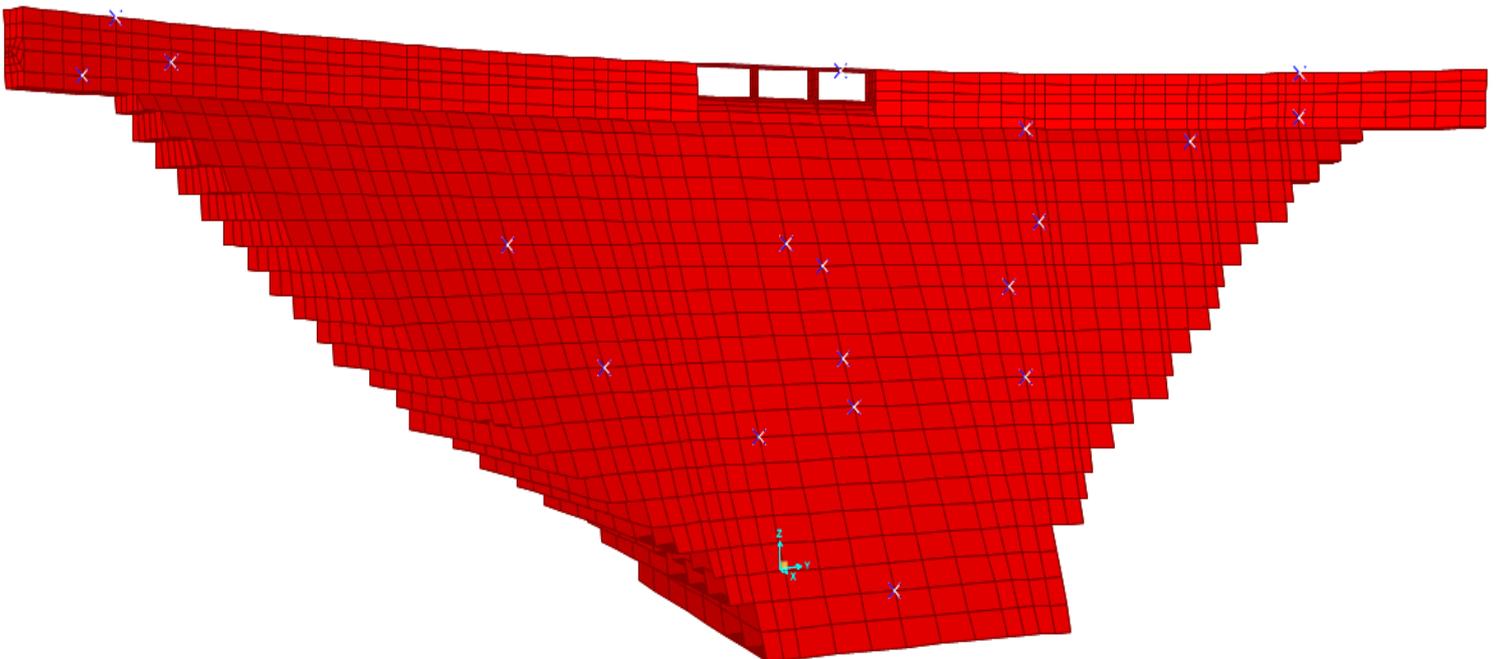


Figure 65 : Configuration optimale des capteurs pour Endommagement total de toute les zones

6.8.50% d'endommagement pour toute les zones :

Pour chaque sévérité, un seul cas envisageable : zone 1 + zone 2 + zone 3 + zone 4 et pour chaque zone la moitié du nombre total des éléments de la zone sera soumis à l'endommagement :

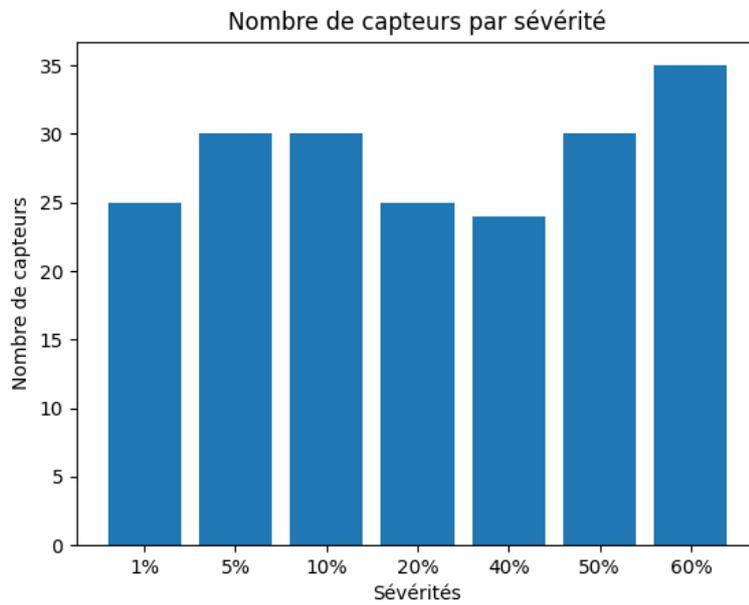


Figure 66 : Nombre de capteurs par sévérité pour chaque cas

On obtient après intersection la configuration optimale des capteurs pour toutes les sévérités :

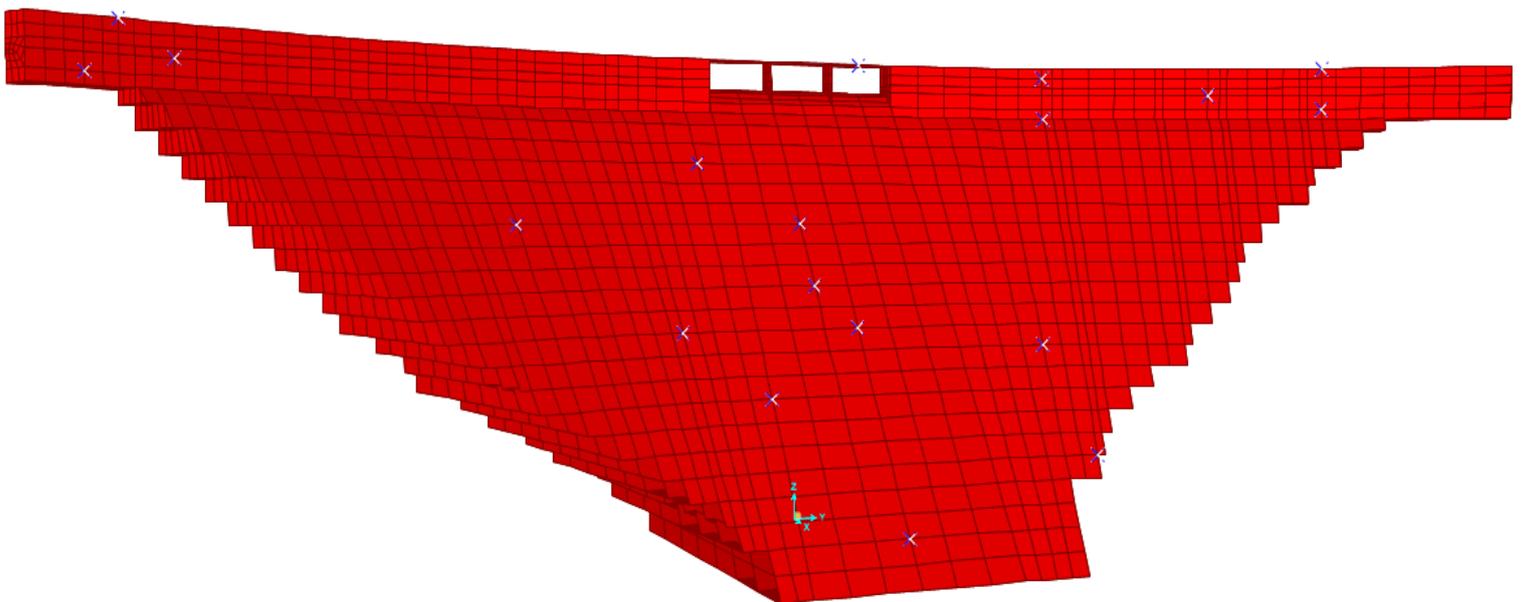


Figure 67 : Configuration optimale des capteurs pour ce cas

6.9. Endommagement partiel des 4 zones :

Pour chaque sévérité, un seul cas envisageable : zone 1 + zone 2 + zone 3 + zone 4 et pour chaque zone 30% du nombre total des éléments de la zone sera soumis à l'endommagement :

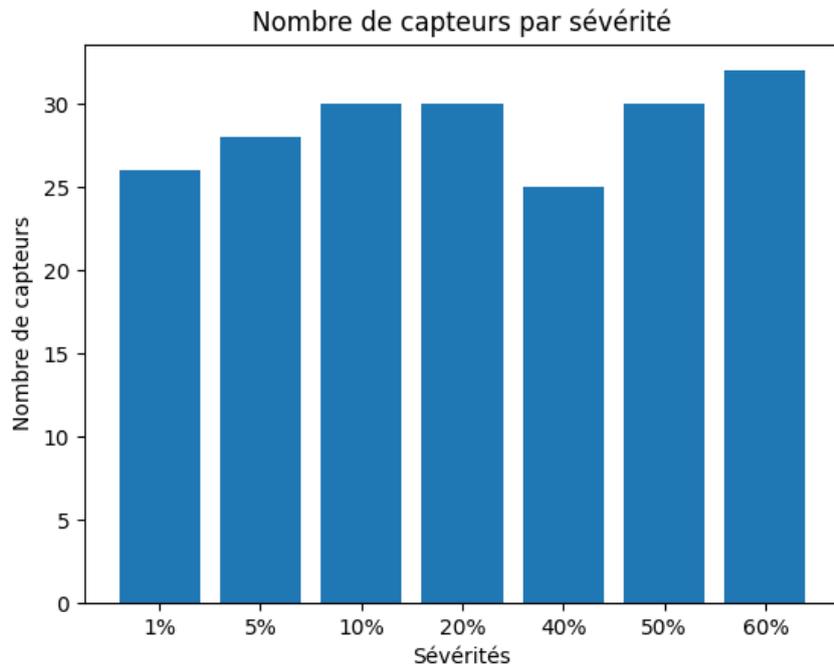


Figure 68 : Nombre de capteurs par sévérité pour chaque cas

On obtient après intersection la configuration optimale des capteurs pour toutes les sévérités sur le barrage:

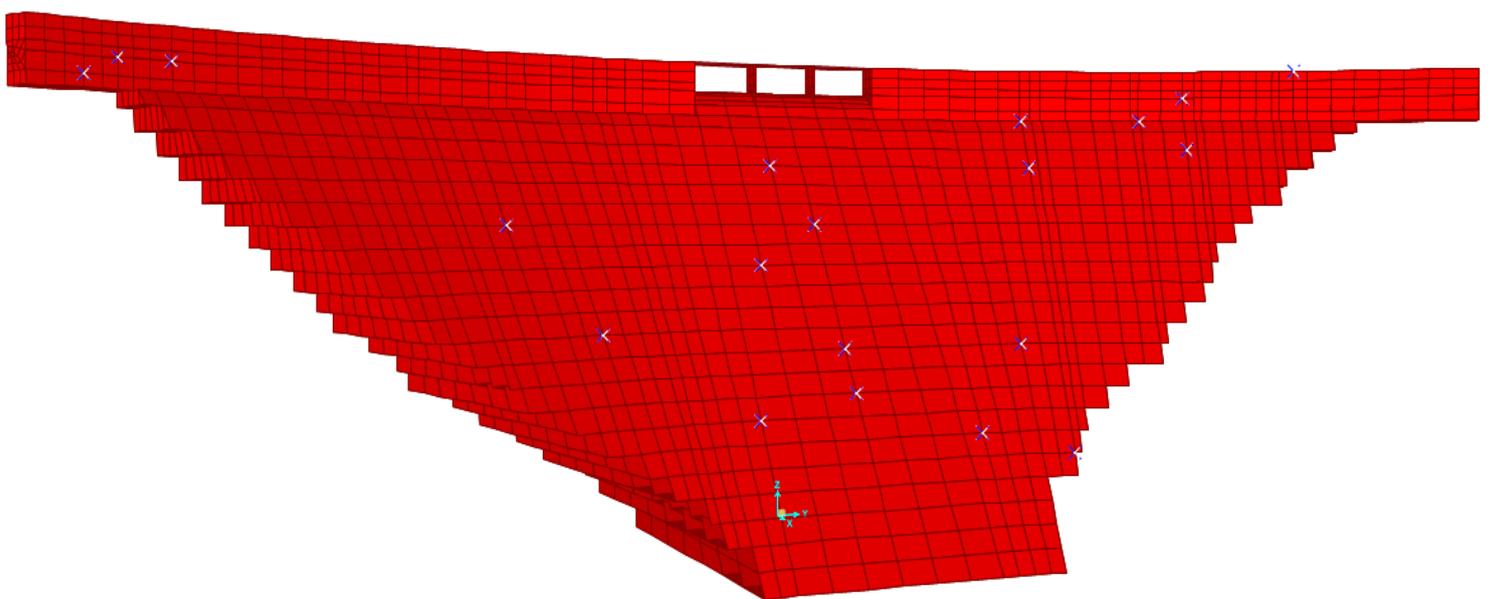


Figure 69 : Configuration optimale des capteurs pour Endommagement partiel des 4 zones

6.10.Récapitulation des résultats :

4 cas d'endommagement ont été présentés pour différentes sévérités de dommage, il est à noter que l'intersection des différentes configurations obtenues pour un cas donné a été faite avec des compromis pour avoir un nombre plus important de solutions et ainsi recouvrir une plus grande surface sur le barrage. Les scénarios d'endommagement restants ne seront pas présentés car ils suivent la même procédure déjà illustrée.

En faisant l'intersection entre ces solutions et celles des autres cas, on obtient la configuration optimale pour tous les cas d'endommagement quel que soit la sévérité du dommage :

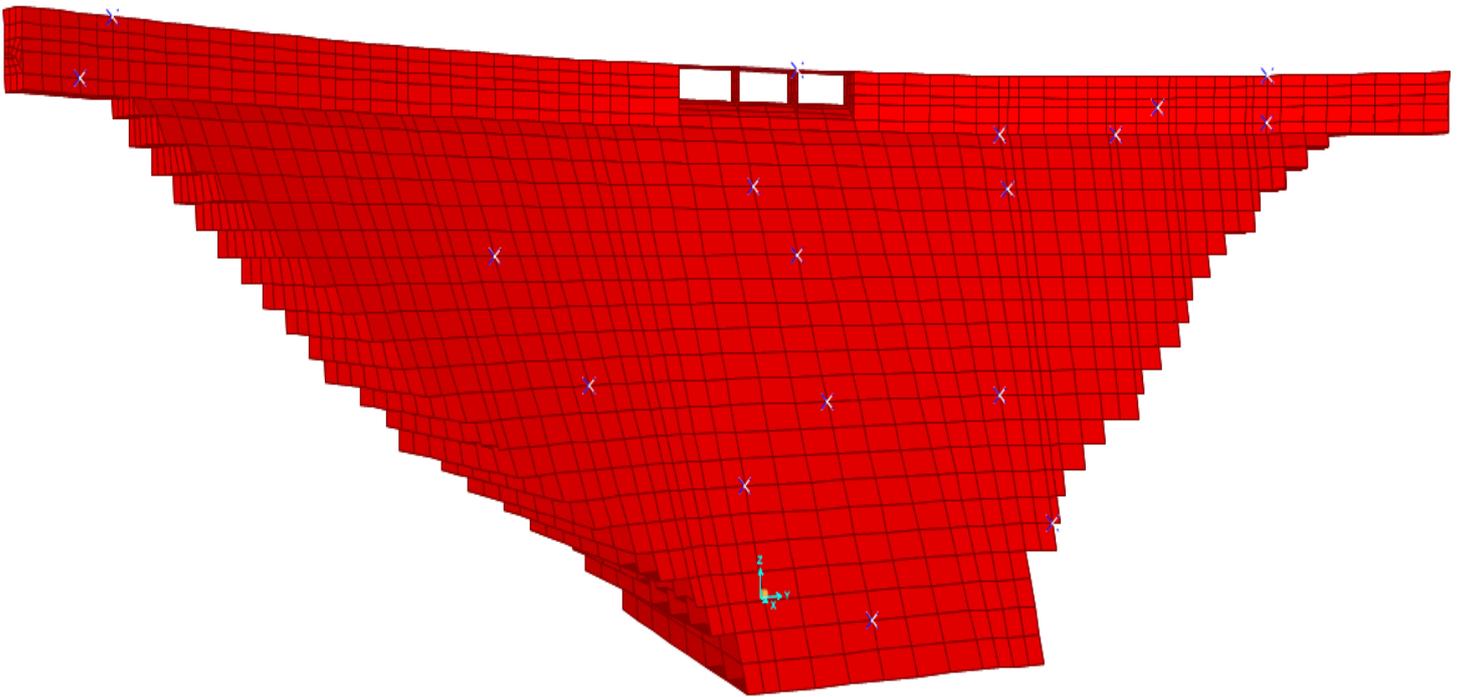


Figure 70 : Configuration finale des capteurs

- ❖ Finalement, on retient ces 18 capteurs avec leur emplacement et ils seront utilisés dans le chapitre suivant pour la détection de dommage.

7.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons à travers la méthode basée sur la flexibilité caractérisé le dommage et la façon de le détecter, ensuite en utilisant un algorithme génétique on a pu optimiser le nombre et emplacement des capteurs pour différents scénarios de dommage avec différentes sévérités de dommage pour enfin aboutir à la configuration optimale qui prend en charge tous les cas d'endommagement

Ainsi le fruit de ce travail va être exploiter dans le chapitre suivant traitant de la détection de dommage en utilisant les réseaux de neurones artificiels.

Chapitre 4 :
Identification des dommages
par réseaux de neurones
artificiels

1.Introduction :

Les dommages structurels modifient les caractéristiques dynamiques d'une structure, impactant ainsi sa réponse, les techniques d'identification des dommages détectent ces écarts et changements pour évaluer l'état de santé de la structure. Dans le chapitre précédent, la méthode de variation de flexibilité a montré des résultats prometteurs, mais ses limites sont apparues lorsqu'elle a été appliquée à une structure complexe comme un barrage.

Pour améliorer cette méthode, des réseaux de neurones seront utilisés pour prédire les dommages. Ces réseaux, efficaces pour la reconnaissance de formes, sélectionnent des paramètres optimaux afin de localiser et quantifier les dommages. Divers scénarios de dommages ont été simulés, et les propriétés dynamiques du barrage ont été obtenues via une analyse modale numérique. Les résultats de la méthode de variation de flexibilité ainsi que les pulsations ont ensuite été utilisés pour créer une base de données, servant d'entrée aux réseaux de neurones.

L'étude vise à appliquer l'apprentissage profond pour obtenir un modèle prédictif valide grâce à des fonctions d'optimisation. Différents types de réseaux de neurones, chacun avec des règles d'apprentissage distinctes, seront utilisés par le biais de la librairie Keras de Python. Après évaluation, le réseau le plus performant sera retenu comme outil de détection des dommages pour le barrage.

2.Les réseaux de neurones:

Les réseaux de neurones sont beaucoup plus complexes que les autres modèles de Machine Learning, car ils représentent des fonctions mathématiques avec des millions de paramètres.

En comparaison, la régression linéaire qui est une méthode utilisée dans le machine Learning ne nécessite que deux coefficients, a et b. [17]

Cependant, créer une fonction aussi complexe a un coût. Pour y parvenir, il est souvent nécessaire de fournir :

- Un Dataset plus grand (des millions de données)
- Un temps d'apprentissage plus long (parfois plusieurs jours)
- Une plus grande puissance de calcul

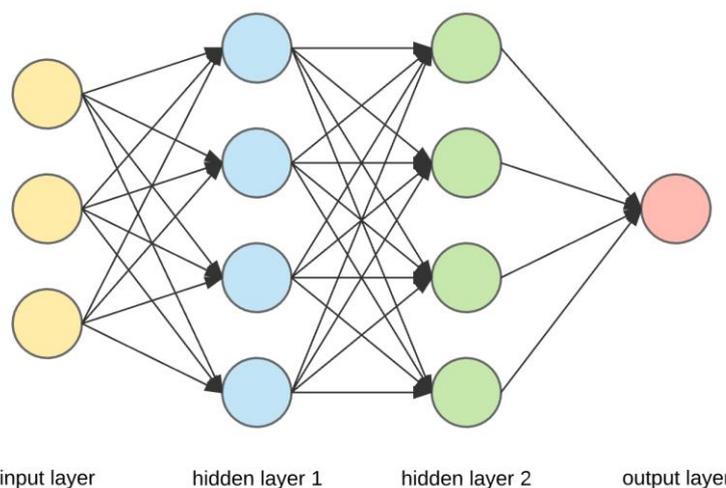
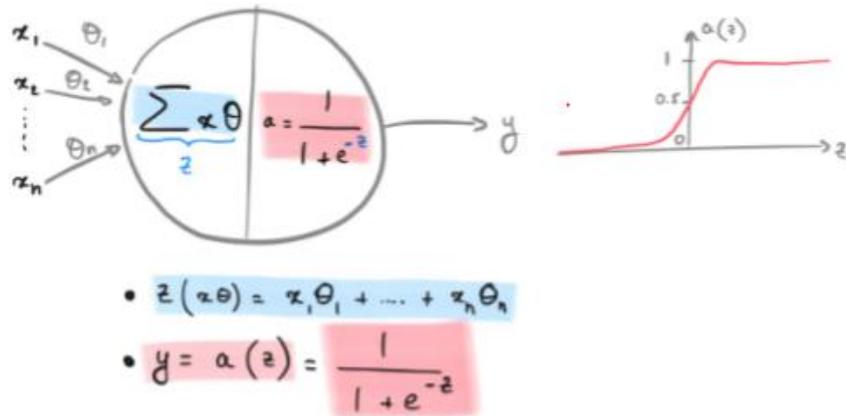


Figure 71 : Représentation simplifiée d'un réseau de neurones

2.1. Réseau de neurones à 1 neurone :

Le réseau de Neurones le plus simple qui existe porte le nom de **perceptron**.



Les entrées du neurone sont les features x multipliées par des paramètres θ à apprendre. Le calcul effectué par le neurone peut être divisé en deux étapes :

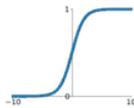
Figure 72 : Fonctionnement d'un neurone

1. Le neurone calcule la somme z de toutes les entrées $z = \sum x\theta$, C'est un calcul linéaire
2. Le neurone passe z dans sa fonction d'activation. Ici la fonction sigmoïde (fonction Logistique), C'est un calcul non-linéaire.[17]

Activation Functions

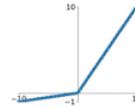
Sigmoid

$$\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$$



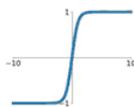
Leaky ReLU

$$\max(0.1x, x)$$



tanh

$$\tanh(x)$$

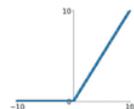


Maxout

$$\max(w_1^T x + b_1, w_2^T x + b_2)$$

ReLU

$$\max(0, x)$$



ELU

$$\begin{cases} x & x \geq 0 \\ \alpha(e^x - 1) & x < 0 \end{cases}$$

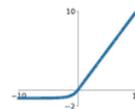


Figure 73 : Exemple de fonction d'activation

2.2. Réseau à plusieurs neurones :

Pour créer ce type de réseau, il suffit de relier entre eux plusieurs **perceptrons** d'une façon particulière :

- On réunit les neurones en colonne (on dit qu'ils représentent des **couches** ou **layers**) au sein de la même colonne les neurones ne sont pas connectés entre eux.
- On connecte toutes les sorties des neurones d'une colonne à gauche aux entrées de tous les neurones de la colonne de droite qui suit

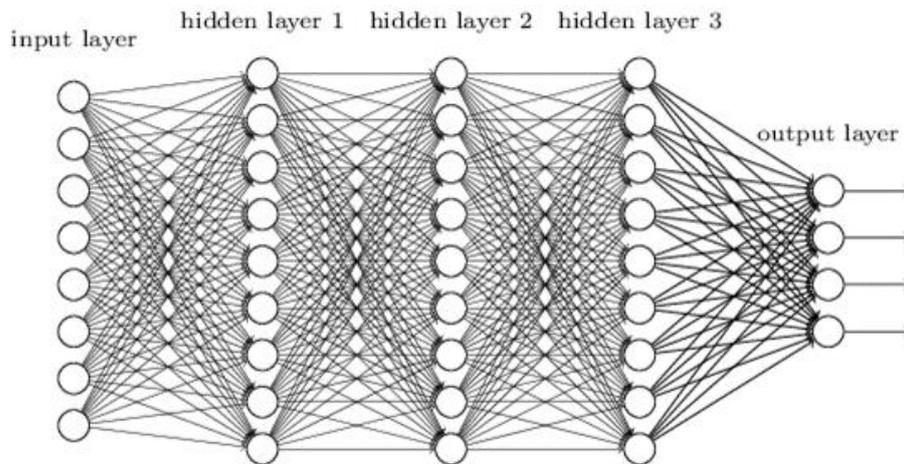


Figure 74 : Réseau à plusieurs neurones

3.Apprentissage des réseaux de neurones :

L'apprentissage dans les réseaux de neurones consiste à améliorer les performances d'un modèle en ajustant ses paramètres grâce à l'expérience, généralement via un ensemble de données. L'objectif est de permettre au modèle de bien généraliser ses connaissances pour qu'il fonctionne efficacement sur de nouvelles données non vues, au-delà des exemples d'entraînement.

3.1. Apprentissage supervisé et non supervisé :

Dans l'apprentissage supervisé, le réseau de neurones est entraîné à partir d'un ensemble de données étiquetées. Chaque exemple d'entraînement comprend des entrées (features) et une sortie correcte (étiquette ou label).

Contrairement à l'apprentissage supervisé, les données utilisées pour l'apprentissage non supervisé ne sont pas étiquetées. Le réseau doit découvrir des structures ou des patterns cachés dans les données. L'objectif dans ce cas est l'identification des groupes ou des relations dans les données sans guidance explicite.

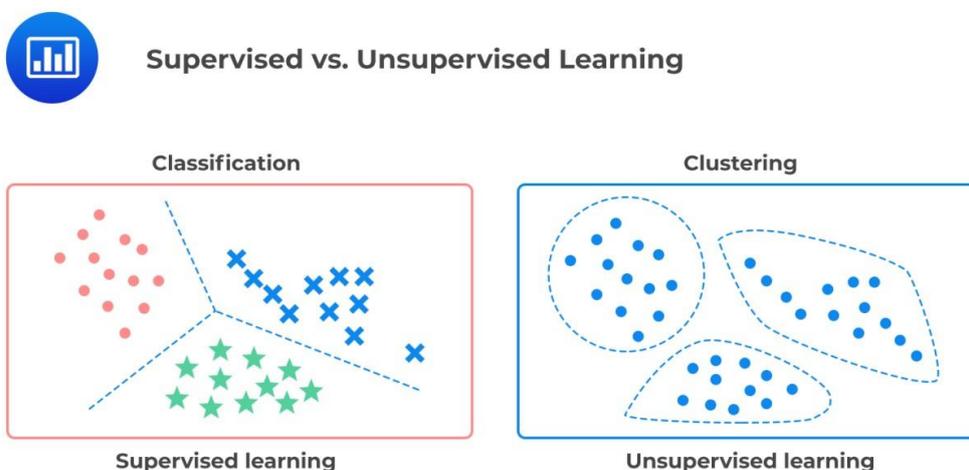


Figure 75 : comparaison entre l'apprentissage supervisé et non supervisé

4. Elements pour l'entraînement d'un réseau de neurones :

4.1. Fonction Coût :

La Fonction Coût $J(\theta)$ mesure l'ensemble des erreurs entre le modèle et le Dataset. De nombreux métriques d'évaluations peuvent être utilisés pour la Fonction Coût :

- Mean Absolute Error (MAE)
- Root Mean Squared Error (RMSE)
- Accuracy : pour les classifications [17]

4.2. Gradient Descent :

C'est un algorithme de minimisation de la Fonction Coût. Il existe beaucoup de variante de cet algorithme :

- Mini Batch Gradient Descent
- Stochastic Gradient Descent
- Momentum
- RMSProp
- Adam [17]

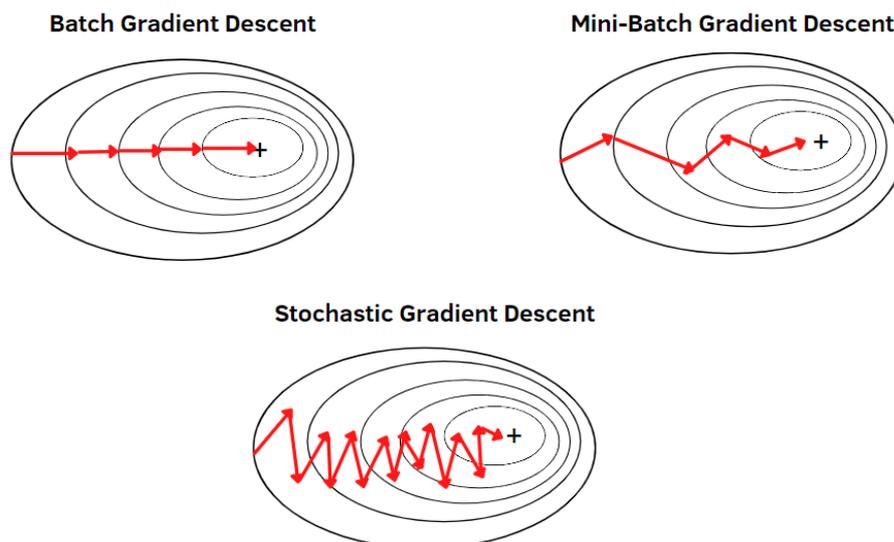


Figure 76 : Exemple d'algorithme de minimisation

5.Détection de dommage à l'aide de réseaux de neurones :

A Travers la librairie Keras écrite en Python nous utiliserons les réseaux de neurones pour détecter les dommages, le choix de cette librairie est justifié par le fait de la simplicité de son utilisation ainsi que la rapidité d'exécution et obtention des résultats

Dans le chapitre précédent 18 points ont été choisis pour le positionnement des capteurs chargés de récolter les résultats de l'analyse modale du modèle du barrage 3d et extraire les paramètres dynamiques (formes modales et pulsations) , ainsi pour tous les cas d'endommagement nous aurons 30 neurones en entrée pour tous les réseaux représentant la variation de la flexibilité pour les points capteurs + les pulsations pour les 12 modes de vibration pour le cas en cours. Les étapes de réalisation comprennent :

- Le choix de l'entrée et de la sortie
- Normalisation des données d'entrée et de sortie
- Choix du nombre de layers et du nombre de nœuds par couche
- Choix du type de Gradient descent ou minimisation

5.1. Le choix de l'entrée et de la sortie :

Pour les entrées 18 neurones représentant les variations de flexibilité et 12 autres neurones représentant les pulsations pour un total de 30 neurones , une base de données a été constitué à partir des variations de flexibilité et pulsations obtenues (2769 Cas)

Pour les sorties : un vecteur de 5 colonne où :

- les 4 premières valeurs représentent la localisation de l'endommagement (0.3 veut dire 30% des éléments sont endommagés)
- la 5 -ème valeurs représente la sévérité d'endommagement (comme elle peut représenter le niveau d'eau)

Par exemple un vecteur sorti de la forme : [1 , 0 , 0.5 , 0.3 , 1] veut dire que tous les solides de la zone 1 ont été endommagés (tous les solides ont subi la même perte de rigidité qui se situe entre 1% jusqu'à 50% de E0), que 50% des solides de la zone 3 ont été endommagés, que 30% des solides de la zone 4 ont été endommagés avec un barrage rempli d'eau (100%) aussi les solides de la zone 2 n'ont subi aucun endommagement.

5.2. Normalisation des données:

Cette opération permet une meilleure précision des réseaux de neurones, ça consiste essentiellement à manipuler les données de tel sorte que les valeurs soient dans la plage [0,1].

Pour les données de sortie le problème ne se pose pas car les valeurs sont déjà entre le 0 et 1, ainsi il faut transformer les données d'entrée pour normaliser nos données, la formule suivante sera utilisée :

$$Z_T = \frac{Z - Z_{max}}{Z_{max} - Z_{min}}$$

Avec Z_T la valeur normalisée, Z la valeur d'origine, Z_{max} la valeur maximale relative à toutes les valeurs d'entrée et Z_{min} la valeur minimale relative à toutes les valeurs d'entrée

```
#Normalisation des valeurs

# Définir les chemins des fichiers Excel
filepath1 = 'output_matrices.xlsx'
filepath2 = 'output_matrices2.xlsx'

# Vérifier si les fichiers existent
if os.path.exists(filepath1) and os.path.exists(filepath2):
    # Charger les données depuis les fichiers Excel
    df1 = pd.read_excel(filepath1)
    df2 = pd.read_excel(filepath2)

    # Extraire les valeurs de la colonne (supposant que la colonne est nommée 'valeurs')
    #values1 = df1['valeurs'].values
    values2 = df2['valeurs'].values

    # Combiner les deux ensembles de valeurs pour calculer Z_max et Z_min
    #all_values = np.concatenate((values1, values2), axis=0)

    Z_max = np.max(values2)
    Z_min = np.min(values2)

    # Appliquer la normalisation sur l'ensembles de données

    normalized_values2 = (values2 - Z_min) / (Z_max - Z_min)
    # Mettre à jour le DataFrames avec les valeurs normalisées
    df2['valeurs_normalisées'] = normalized_values2
    # Définir le chemin pour sauvegarder le fichier normalisé
    output_filepath2 = 'output_matrices2_normalized.xlsx'
```

Figure 77 : Exemple de code pour la normalisation

5.3. Nombre de couches et nombre de nœuds par couche:

C'est un choix difficile à faire par rapport aux enjeux encourus : d'une part si le nombre de couche cachée est trop petit , le sous -apprentissage du réseau risque d'échouer (la reconnaissance nécessaire) d'autres part si le nombre de couche cachée est trop grand ceci risque de causé un sur-apprentissage le réseau est capable d'apprendre la classification exacte lors de la phase d'apprentissage mais il échoue lors de la phase de test car il aura mémoriser les données au lieu du modèle introduit.

```
#Empilement des couches

# Définir la couche d'entrée avec 18 neurones
input_layer = Input(shape=(18,))

# Ajouter la première couche cachée avec 450 neurones
hidden1 = Dense(500, activation='relu')(input_layer)

# Ajouter la deuxième couche cachée avec 300 neurones
hidden2 = Dense(400, activation='relu')(hidden1)

# Ajouter la troisième couche cachée avec 200 neurones
hidden3 = Dense(300, activation='relu')(input_layer)

# Ajouter la quatrième couche cachée avec 100 neurones
hidden4 = Dense(200, activation='softmax')(hidden3)

# Ajouter la quatrième couche cachée avec 100 neurones
hidden5 = Dense(100, activation='softmax')(hidden4)

hidden6 = Dense(50, activation='relu')(hidden5)

# Ajouter la couche de sortie avec 5 neurones (1 vecteur de 5 colonnes)
output_layer = Dense(4, activation='linear')(hidden6)

# Créer le modèle final
model = Model(inputs=input_layer, outputs=output_layer)

# Afficher un résumé du modèle
model.summary()
```

Figure 78 : Exemple de code pour l'empilement des couches

Lors de cette étude différentes topologies de réseau de neurones seront utilisés ainsi que différents algorithmes de minimisation (Gradient Descent) , ainsi 4 modèles ont été retenus :

Modèle 1 : recevra la variation de flexibilité (18 neurones) + pulsations de chaque mode de vibration en entrée (12 neurones), donnera en sortie la localisation du dommage et son intensité

Layer (type)	Output Shape	Param #
input_layer (InputLayer)	(None, 30)	0
dense (Dense)	(None, 450)	13,950
dense_1 (Dense)	(None, 300)	135,300
dense_2 (Dense)	(None, 200)	60,200
dense_3 (Dense)	(None, 100)	20,100
dense_4 (Dense)	(None, 5)	505

Total params: 230,055
 Trainable params: 230,055
 Non-trainable params: 0

Figure 79 : Nombre de couches et neurones pour le modèle 1

Modèle 2 : Même entrée que le modèle 1, donnera en sortie la localisation du dommage et l'influence de l'eau

Layer (type)	Output Shape	Param #
input_layer (InputLayer)	(None, 30)	0
dense (Dense)	(None, 400)	12,400
dense_1 (Dense)	(None, 300)	120,300
dense_2 (Dense)	(None, 200)	60,200
dense_3 (Dense)	(None, 100)	20,100
dense_4 (Dense)	(None, 50)	5,050
dense_5 (Dense)	(None, 5)	255

Total params: 218,305
 Trainable params: 218,305
 Non-trainable params: 0

Figure 80 : Nombre de couches et neurones pour le modèle 2

Modèle 3 :il recevra en entrée la variation de flexibilité, donnera en sortie l'emplacement des dommages selon les 4 zones

Layer (type)	Output Shape	Param #
input_layer (InputLayer)	(None, 18)	0
dense (Dense)	(None, 500)	9,500
dense_1 (Dense)	(None, 400)	200,400
dense_2 (Dense)	(None, 300)	120,300
dense_3 (Dense)	(None, 200)	60,200
dense_4 (Dense)	(None, 100)	20,100
dense_5 (Dense)	(None, 50)	5,050
dense_6 (Dense)	(None, 4)	204

Total params: 415,754
 Trainable params: 415,754
 Non-trainable params: 0

Figure 81 : Nombre de couches et neurones pour le modèle 3

Modèle 4 : Même entrée que le modèle 1, donnera en sortie la sévérité du dommage

Layer (type)	Output Shape	Param #
input_layer (InputLayer)	(None, 30)	0
dense (Dense)	(None, 500)	15,500
dense_1 (Dense)	(None, 400)	200,400
dense_2 (Dense)	(None, 300)	120,300
dense_3 (Dense)	(None, 200)	60,200
dense_4 (Dense)	(None, 100)	20,100
dense_5 (Dense)	(None, 50)	5,050
dense_6 (Dense)	(None, 1)	51

Total params: 421,601 |
 Trainable params: 421,601
 Non-trainable params: 0

Figure 82 : Nombre de couches et neurones pour le modèle 4

6.Apprentissage des modèles choisis :

-Les règles d'apprentissage mobilisées sont Adam et Adamax .

-L'évaluation du modèle et sa validation se fait à travers les méthodes de « Categorical cross-entropy » et de l'erreur quadratic moyenne (MSE).

- Le processus d'apprentissage consistera à :

- Diviser les données en données d'apprentissage et de validation. On a une base de données de 2769 cas d'endommagement différents avec 30% de ces cas pour la validation des différents modèles (831 cas).
- Après normalisation des données dans l'intervalle [0,1].
- Commencer l'apprentissage avec des réglages aléatoires et étalonner au fur et à mesure de l'apprentissage.
- Arrêt du processus si le nombre d'itération fixé (Epochs) est atteint

7.Analyse des Résultats :

❖ Résultats du modèle 1 :

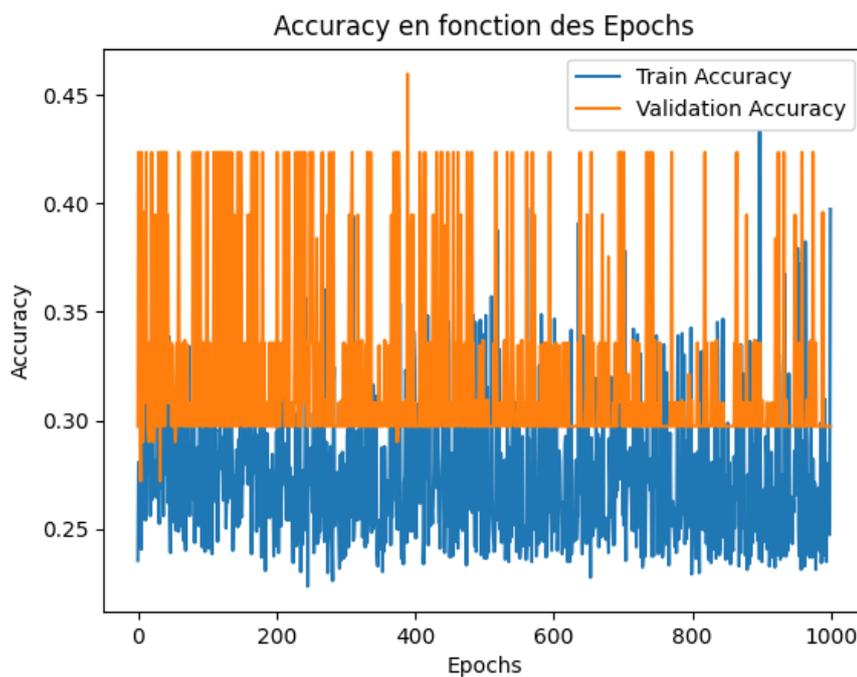


Figure 83 : Précision du modèle 1 en fonction des Epochs

-La précision du modèle 1 évolue au fil des epochs mais connaît une diminution à la fin du cycle d'apprentissage avant de se stabiliser au tour de 40%.

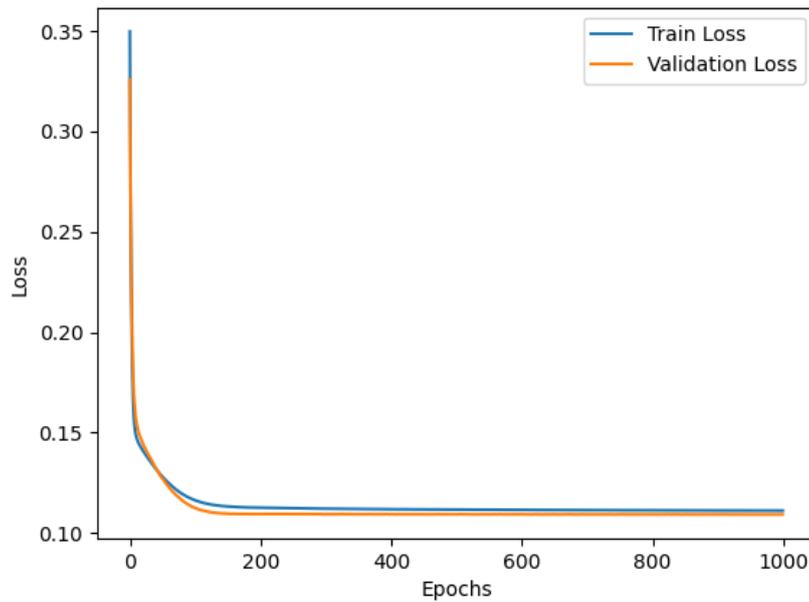


Figure 84 : résultat de la fonction coût au fil des epochs

-Comme on peut le voir ci-dessus la fonction *coût* diminue au fur et à mesure que l'apprentissage du modèle avance à travers les epochs, plus cette valeur est faible plus l'erreur sur les prédictions du modèle sera tout autant faible. Cependant malgré une faible erreur du Loss, la précision du modèle n'a pas pu dépasser 40% ceci pourrait être expliquer par un manque de données càd une base de données trop réduite (2769 cas d'endommagement dont 30% de ces cas pour la validation du modèle).

❖ Résultats du modèle 2 :

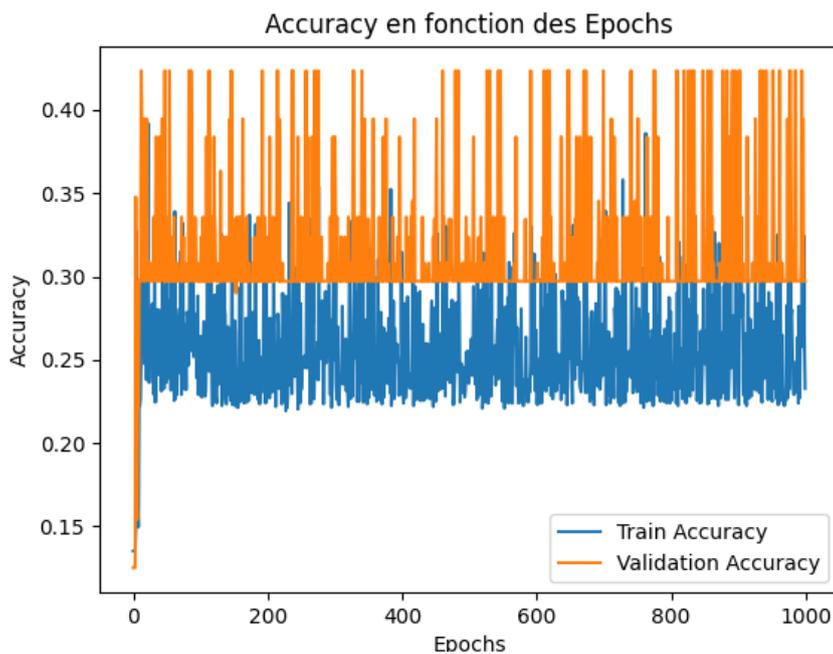


Figure 85 : Précision du modèle 2 en fonction des Epochs

-La précision du modèle 2 ci-dessus suit le même schéma que celui du modèle précédent et se stabilise aux alentours de 43%, encore une fois par manque de données il est impossible d'améliorer ce résultat. La fonction *coût* ou objectif du modèle 2 ci-dessous diminue logiquement au fil du passage à travers répétés les données d'apprentissage.

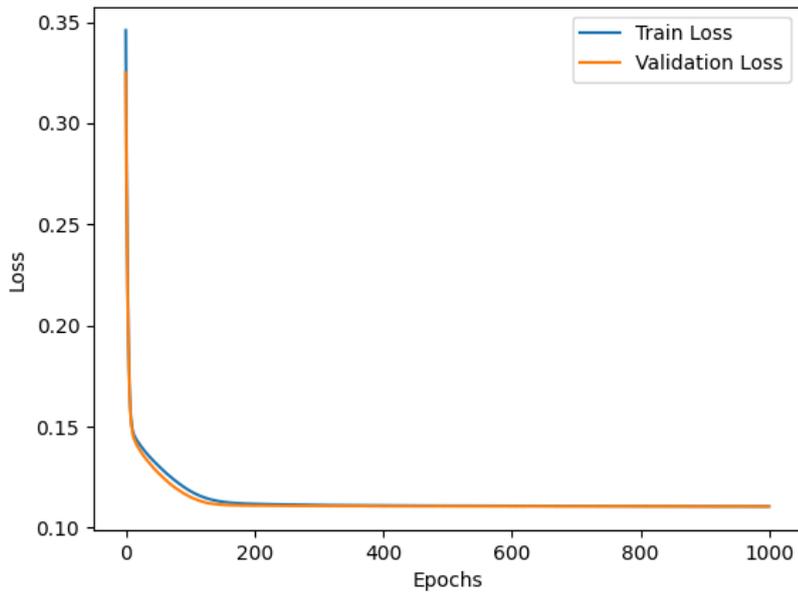


Figure 86 : Fonction coût du modèle 2 en fonction des epochs

❖ Résultats du modèle 3 :

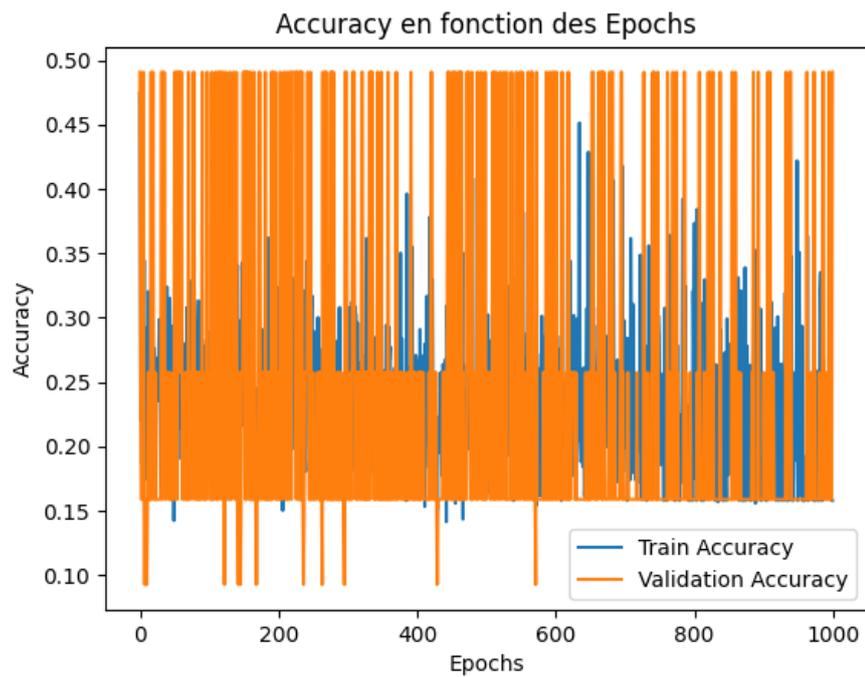


Figure 87 : Précision du modèle 3 en fonction des Epochs

-La précision du modèle 3 ci-dessus s'approche de 50% mais reste comme les autres cas faible et ceci malgré une faible valeur de la fonction coût comme démontré ci-dessous :

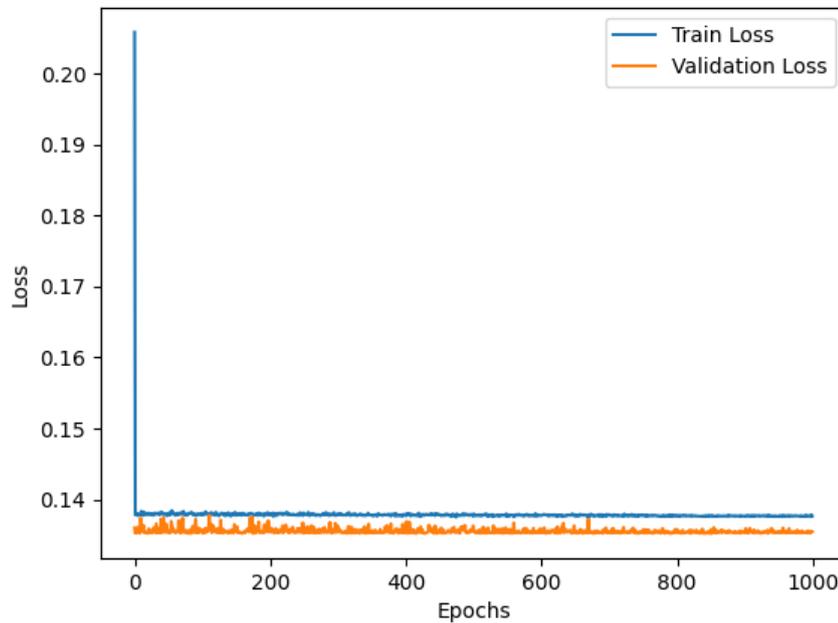


Figure 88 : Fonction coût du modèle 3 en fonction des epochs

❖ Résultats du modèle 4 :

-Pour ce modèle on obtient des résultats similaires aux autres et le graphe ci-dessous en témoigne :

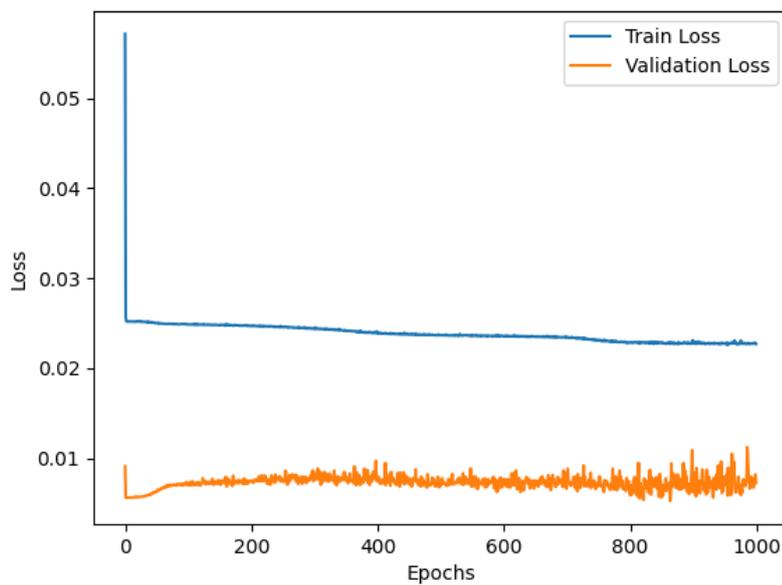


Figure 89 : Fonction coût du modèle 4 en fonction des epochs

-Ce modèle ne dépasse pas les 50% de précision et voici ci-dessous les résultats de quelques prédictions à partir de données tests (200 cas d'endommagement) non utilisés lors de l'apprentissage :

```
# Définir le chemin du fichier Excel
file_path2 = 'test.xlsx'

# Lire les données depuis le fichier Excel dans un DataFrame Pandas
df = pd.read_excel(file_path2, sheet_name='Feuil1')
# Transformer le DataFrame en tableau NumPy
X_test = df.to_numpy()

# Faire des prédictions sur les données de test
predictions = model.predict(X_test)

# Afficher quelques exemples de prédictions et de vérités terrain
for i in range(30): # Montrer les 5 premiers exemples
    print(f'Prédiction: {predictions[i]}, Vérité terrain: {Y_test[i]}')
```

Figure 90 : Exemple du code pour le test du modèle

```
Prédiction: [0.40238872], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.4124898], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.482157], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.5164143], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.47693118], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.41216204], Vérité terrain: 0.4
Prédiction: [0.47553], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.41299865], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.48089808], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.48048592], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.513625], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.4748463], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.3656664], Vérité terrain: 0.3
Prédiction: [0.41942215], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.3524667], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.41640398], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.3700845], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.35884836], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.25907204], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.34627947], Vérité terrain: 0.3
Prédiction: [0.29723537], Vérité terrain: 0.3
Prédiction: [0.27207786], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.36449057], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.46627417], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.50070524], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.4619366], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.49475503], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.49672616], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.4621004], Vérité terrain: 0.5
Prédiction: [0.49960896], Vérité terrain: 0.5
```

Figure 91 : Prédictions du modèle 4 sur les données test échantillon de 30 cas

8.Conclusion :

- Les réseaux de neurones sont généralement fiables pour les problèmes de prédiction et identification mais force a constaté que sans une base de données exhaustive et assez grande l'amélioration des résultats sera compliquée.
- La règle d'apprentissage Adamax donne de meilleur résultat que celle d'Adam.
- Malgré la limitation imposée par la base de données et faute de temps pour l'agrandir, les modèles 3 et 4 sont les plus performant
- La variation de flexibilité est largement suffisante pour prédire la localisation des dommages.

Conclusion générale :

Le but de ce travail était l'utilisation d'une technique hybride d'intelligence artificielle pour la détection de dommage au sein d'un barrage, dans notre cas le barrage de Tabellout.

En premier lieu, une synthèse de la bibliographie existante a été réalisée concernant le SHM surveillance de santé des structures ainsi que les notions relatives aux barrages. La surveillance du comportement statique et dynamique des barrages, devient de plus en plus cruciale pour assurer leur intégrité et longévité. Actuellement, l'inspection visuelle et les techniques d'évaluation non destructives sont les méthodes standard, mais elles sont laborieuses et nécessitent des temps d'arrêt significatifs. L'avancée fulgurante dans le domaine des capteurs sans fil, offre une alternative prometteuse en réduisant les inspections manuelles.

Les méthodes d'identification des dommages à partir des réponses vibratoires des structures permettent de détecter et de localiser les dommages en se basant sur les caractéristiques modales telles que les fréquences et les modes propres, ou en développant des indicateurs basés sur ces caractéristiques.

Par la suite, nous utilisons le modèle 3d du barrage de Tabellout et le soumettons à des analyses modales pour extraire les caractéristiques modales et ceci à travers le logiciel Sap2000, L'interaction fluide-structure dû à la poussée de la retenue d'eau sur le parement amont du barrage a été pris en compte par l'introduction des masses ajoutées calculées par la formule de Westergaard, ainsi l'influence de la retenue d'eau sur le comportement dynamique du barrage a été démontré. Effectivement, les fréquences propres dans le cas du barrage rempli sont plus faibles que celle du barrage vide, dans notre cas une diminution de 58% a été enregistrée.

L'analyse de la répartition des contraintes dans l'état statique et dynamique du barrage a permis de définir des zones plus à risques de subir des dommages où les contraintes sont maximales.

En second lieu, après la détermination des zones à risques nous avons à travers la méthode basée sur la flexibilité caractérisé le dommage et la façon de le détecter, ensuite en utilisant un algorithme génétique on a pu aboutir à une configuration de 18 capteurs répartis sur la surface du parement aval du barrage.

La méthode de variation de flexibilité s'est révélée sensible aux dommages dus à une réduction de rigidité, permettant une identification relativement précise des dommages en correspondance avec les maxima locaux. La flexibilité, en tant que fonction croissante de l'endommagement, permet de suivre l'évolution des dommages au fil du temps.

Et enfin, les réseaux de neurones artificielles ont été testé pour la détection de dommage et sa localisation en utilisant différents modèles, règles d'apprentissages et les résultats de variations de flexibilité et fréquences propres obtenues par les 18 points choisis auparavant, les résultats ont été médiocre par rapport à la précision des différents modèles qui n'a pas dépasser 50% .

Références
bibliographiques :

- [1] GHODBANE Messaoud « Polycopié de cours ouvrages hydrauliques » , Département d'hydraulique , Université de Mohamed BOUDIAF M'sila-Faculté de technologie ,Algérie ,2023
- [2] DJAFERKHODJA Hakim « Maitrise des Crues » , Département génie de l'eau , Université de Akli Mohand Oulhadj Bouira-Institut de technologie ,Algérie ,2020
- [3] « COURS DE BARRAGES AU PROFIT DES ETUDIANTS DE MASTER 2 EN HYDROGEOLOGIE » , Département de Geologie , Université Mostafa Ben Boulaid Batna-Faculté des sciences de la terre ,Algérie ,2021
- [6] Danish Zaman, Amir Ali , Ayush Singh, STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF CIVIL INFRASTRUCTURE,International Journal of Advance Research in Science And Engineering Vol No.5 , Issue No.3 ,March 2016
- [4] P. Bukenya, P. Moyo • H. Beushausen & C. Oosthuizen, Health monitoring of concrete dams: a literature review , Journal of civil structural health monitoring 2014 Springer
- [5] Li, Z. S., Blanc, M., & Thorel, L. (2023). Effects of embedding depth and load eccentricity on lateral response of offshore monopiles in dense sand: A centrifuge study. *GEOTECHNIQUE*, 73(9), 811-825. Advance online publication. <https://doi.org/10.1680/jgeot.21.00200>
- [7] Yang Y, Zhang Y, Tan X. Review on Vibration-Based Structural Health Monitoring Techniques and Technical Codes. *Symmetry*. 2021; 13(11):1998. <https://doi.org/10.3390/sym13111998>
- [8] Kot P, Muradov M, Gkantou M, Kamaris GS, Hashim K, Yeboah D. Recent Advancements in Non-Destructive Testing Techniques for Structural Health Monitoring. *Applied Sciences*. 2021; 11(6):2750. <https://doi.org/10.3390/app11062750>
- [9] [Srinivasan Chandrasekaran](#), Structural Health Monitoring With Application To Offshore Structures, World Scientific Publishing Company, 2019
- [10] Burcu Gunes & Oguz Gunes , Structural health monitoring and damage assessment Part I: A critical review of approaches and methods , International Journal of Physical Sciences , academic Journals , Department Civil of Engineering, Atilim University, Ankara, Turkey,2013
- [11] Deliah KHEMISSA, Application des réseaux de neurones à la détection des dommages d'un barrage en BCR, Département de génie civil, école Nationale polytechnique d'Alger ,Algérie ,2019
- [12] Groupe Fayat, Projet : Réalisations : Barrage de Tabellout, <https://fayat.com/projets/realisations/barrage-de-tabellout>, Consulté le 02/06/2024.
- [13] Chelbi Zahir, Amaouche Douadi « Etude du barrage poids « Tabellout » en béton compacté au rouleau » , département de génie civil , Université A.Mira Bejaia ,2012

[14] GUECHARI Lounis « Réponse sismique des tours de prise d'eau », département de génie civil , Université Abderrahmane Mira-Béjaïa

[15] Barchiesi Dominique, Kessentini Sameh , Initiation à l'optimisation : métaheuristiques - Problèmes à variables continues ,Edition ellipses ,2020

[16] Alban , « Algorithme Génétique » , Le DataScientist ,
<https://ledatascientist.com/algorithme-genetique/#:~:text=Les%20principes%20de%20l%27Algorithme,qui%20contient%20les%20meilleures%20solutions.> , consulté le 14/07/2024

[17] Guillaume Saint-Cirgue , « Apprendre le machine Learning en une semaine » ,machinelearnia.com , 2019