

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



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

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

Réalisé par :

Mr. Abdel Aziz Amine HIRECHE
Mr. Mohamed Sofiane ZEROUTI

Sous la direction de :

Mme H. DJABALI-MOHABEDDINE

Présenté et soutenu le 13/09/2020

Composition du Jury :

Président	Mr N. BOURAHLA	Prof.	ENP
Promotrice	Mme H. DJABALI-MOHABEDDINE	MC B	ENP
Co-Promoteur	Mr A. SI-CHAYEB	Dr COYNE et BELLIER	
Examinatrice	Mme D. CHERID	MCB	ENP
Examineur	Mr S. LAKEHAL	MCB	ENP

ENP 2020

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



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

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

Réalisé par :

Mr. Abdel Aziz Amine HIRECHE
Mr. Mohamed Sofiane ZEROUTI

Sous la direction de :

Mme H. DJABALI-MOHABEDDINE

Présenté et soutenu le 13/09/2020

Composition du Jury :

Président	Mr N. BOURAHLA	Prof.	ENP
Promotrice	Mme H. DJABALI-MOHABEDDINE	MC B	ENP
Co-Promoteur	Mr A. SI-CHAYEB	Dr COYNE et BELLIER	
Examinatrice	Mme D. CHERID	MCB	ENP
Examineur	Mr S. LAKEHAL	MCB	ENP

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail tout d'abord à nos parents qui nous ont toujours soutenus et pour qui nous portons un amour interminable, que Dieu leurs procure bonne santé et longue vie.

A nos frères et sœurs qui étaient toujours là quand on avait besoin d'eux.

A nos amis : Oussama, Houcine, Yanis, Adelane, Alilou, Abdeslam et Said qui nous font sourire et nous encouragent à aller de l'avant.

HIRECHE Abdel Aziz Amine

ZEROUTI Mohamed Sofiane

Remerciements

Au terme de ce travail nous tenons à exprimer notre gratitude profonde à notre promotrice **Mme Hafida MOHABEDDINE**, à **M. Nouredine BOURAHLA** et à **M. Abdelghani Si-CHAYEB** pour leur suivi, leurs conseils et leurs encouragements qu'ils nous ont prodigué tout au long de la période du projet.

Nos vifs remerciements à tous nos professeurs du département de Génie Civil de l'Ecole Nationale Polytechnique qui nous ont enrichis de connaissance.

Nous remercions également toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de notre projet de fin d'étude notamment

M. LAGHOUB Mohamed Said.

الملخص:

يقع سد الدويرة على وادي بن عمار على بعد حوالي 2 كم جنوب غرب مدينة الدويرة وحوالي 17 كم جنوب غرب الجزائر العاصمة. هذا السد هو خزان يسمح بتخزين المياه التي ينقلها من وديان مازافران والحراش وهي مخصصة أساساً لري سهل مركز متيجة وتغذية المياه الجوفية عن طريق التسلل.

في هذه الدراسة استخدمنا أولاً برنامج تصميم SAP2000 لنمذجة السد ، ثم نستخدم خوارزمية جينية لتحسين مواقع أجهزة الاستشعار المخصصة لجمع البيانات لمراقبة السد. الخطوة التالية هي محاكاة استجابة الهيكل تحت الاهتزاز المحيطي باستخدام برنامج SAP2000 تقدم هذه الدراسة للتعرف على أضرار السدود و باستخدام وظائف استجابة التردد (FRF) والشبكات العصبية (NN). يتم إجراء تحليل المكون الرئيسي (ACP) على FRF المقاسة للتخفيف البُعدي، ثم يتم استخدام بيانات FRF المضغوطة بواسطة ACP كإدخال في NN لتحديد التلف.

الكلمات الدالة:

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

Title:

Hybrid method of detection and localization of damage: Application on a dam

Abstract:

The Douera dam is located on the Oued Ben Amar about 2 km southwest of Douera and about 17 km southwest of Algiers. This dam is a reservoir that allows the storage of water transferred by the Mazafran and El-Harrach rivers, intended mainly for the irrigation of the Mitidja Center plain and the recharge of the water table by infiltration.

In this study, we first use the SAP2000 Design Software to model the dam, and then we use a genetic algorithm to optimize the locations of the sensors dedicated to collecting data for the dam monitoring. The next step is to simulate the responses of the structure under ambient vibration using SAP2000 software.

This study presents an experimental study of identifying the dam damages using frequency response functions (FRF) and neural networks (NN). Principal Component Analysis (APC) is performed on the measured FRFs for dimensionality reduction, and then the APC-compressed FRF data are used as input into the NNs for damage identification.

Keywords :

Dams, damage, sensors, artificial intelligence, neural networks,

Titre :

Méthode hybride de détection et localisation des dommages : Application sur un barrage

Résumé :

Le barrage de Douera est situé sur l'Oued Ben Amar à environ 2 km au sud-ouest de Douera et à environ 17 km au sud-ouest d'Alger. Ce barrage est un réservoir qui permet le stockage des eaux transférées par les oueds Mazafran et El-Harrach, destiné principalement à l'irrigation de la plaine de la Mitidja Centre et la réalimentation de la nappe par infiltration.

Dans cette étude, nous utilisons d'abord le Logiciel de conception SAP2000 pour modéliser le barrage, et puis on utilise un algorithme génétique pour optimiser les emplacements des capteurs consacrés à la collecte de données pour le suivi du barrage. L'étape suivante consiste à simuler la réponse d'une structure sous une vibration ambiante à l'aide du logiciel SAP2000. Cette étude présente une étude expérimentale de l'identification des dommages du barrage à l'aide des fonctions de réponse en fréquence (FRF) et des réseaux de neurones (NN). L'analyse en composantes principales (ACP) est effectuée sur les FRF mesurées pour la réduction de la dimensionnalité, puis les données FRF compressées par ACP sont utilisées comme entrées dans les NN pour l'identification des dommages.

Mots clés :

Barrages, dommages, capteurs, intelligence artificielle, réseaux de neurones, « »

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale	15
Chapitre I : Synthèse bibliographique.....	17
I.1 Introduction.....	18
I.2 Généralités sur les barrages.....	18
I.2.1 Définition.....	18
I.2.2 Les types de barrages.....	19
I.2.2.1 Barrage en béton.....	19
I.2.2.2 Barrages en remblai.....	20
I.2.3 Avantages et inconvénients des barrages en remblais à noyau.....	22
I.2.4 Les ouvrages annexes.....	23
I.2.4.1 Evacuateurs de crues.....	23
I.2.4.2 Ouvrages de prise.....	23
I.2.4.3 Ouvrage de vidange.....	24
I.2.4.4 Les équipements de circulation.....	24
I.2.4.5 Les équipements hydroélectriques.....	24
I.2.5 Choix du site et du type du barrage.....	25
I.2.5.1 Topographie et apports du bassin versant.....	25
I.2.5.2 Morphologie de la vallée.....	25
I.2.5.3 Géologie et conditions de fondation.....	26
I.3 Pathologie des barrages en remblais.....	27
I.3.1 Mécanismes de rupture.....	27
I.3.2 Auscultation des barrages en remblai.....	30
I.4 Surveillance de la santé structurale (SHM).....	30
I.4.1 Définition de la SHM.....	30
I.4.2 Surveillance locale et globale.....	31
I.4.2.1 Surveillance Locale.....	31
I.4.2.2 Méthode de Surveillance Globale.....	31
I.4.2.2.1 Méthode du domaine fréquentiel.....	31
I.4.2.2.2 Méthode du domaine temporel.....	32
I.4.2.2.3 Méthode basée sur l'indicateur MAC.....	32

I.4.2.2.4	Méthode basée sur le changement de rigidité.....	33
I.4.2.2.5	Méthode cross-corrélation basée sur la transmissibilité.....	33
I.4.2.2.6	Méthodes basées sur l'intelligence artificielle.....	34
I.5	Conclusion.....	35
Chapitre II	Analyse et modélisation numérique.....	36
II.1	Introduction.....	37
II.2	Présentation du barrage de Douera.....	37
II.3.1	Caractéristiques géométriques du barrage.....	38
II.3.2	Caractéristiques physiques des matériaux constitutifs.....	40
II.4	Evaluation de la fréquence propre par méthode simplifiée.....	41
II.4.1	Rappel des principes de la méthode simplifiée.....	41
II.4.2	Application de la méthode simplifiée sur le barrage de Douera.....	42
II.5	Modélisation EF et analyse numérique.....	44
II.5.1	Présentation du modèle 2D (sans retenue).....	46
II.5.1.1	Analyse modale du modèle numérique bidimensionnel (sans retenue).....	46
II.5.2	Présentation du modèle numérique 2D (avec retenue).....	48
II.5.2.1	Approche théorique de la méthode de ZANGAR.....	48
II.5.2.2	Analyse modale du modèle numérique bidimensionnel (Avec retenue).....	50
II.6	Présentation du Modèle 3D (sans retenue).....	54
II.6.1	L'Analyse modale du Modèle 3D.....	54
II.7	Analyse modale du modèle 3D (Avec retenue).....	57
II.8	Correspondance des modes des modèle 2D et 3D (sans retenue).....	58
II.9	Conclusion.....	59
Chapitre III	Optimisation des emplacements de capteurs par l'algorithme génétique....	60
III.1	Introduction.....	61
III.1.1	Objectif de ce chapitre.....	61
III.1.2	La formulation du problème.....	61
III.2	Description du problème OSP (Optimal Sensor Placement).....	61
III.2.1	Critère d'évaluation.....	62
III.2.1.1	Le critère d'assurance modale (MAC).....	62
III.2.1.2	La matrice d'informations de Fisher (FIM).....	63
III.2.1.3	L'Entropie des Informations.....	63
III.2.1.4	Driving-point residue EFI-DPR.....	63

III.2.1.5 Les critères énergétiques.....	63
III.3 Méthodologies d'optimisation.....	64
III.3.1 Méthodologies d'optimisation évolutives.....	64
III.3.1.1 Algorithme génétique.....	64
III.3.1.1.1 Aspect de l'algorithme génétique.....	64
III.4 Les capteurs.....	67
III.5 L'application sur le modèle.....	68
III.5.1 La conception de l'algorithme génétique.....	68
III.6 Conclusion.....	83
Chapitre IV : Identification des dommages par la méthode des neurones artificiels.....	84
IV.1 Introduction.....	85
IV.2 Simulation des dommages dans la structure.....	85
IV.3 Choix des zones d'endommagement.....	85
IV.3.1 Choix des degrés d'endommagement.....	87
IV.4 Simulation d'une excitation ambiante.....	87
IV.5 Analyse en composantes principales.....	89
IV.5.1 Application de l'ACP.....	89
IV.6 La méthode des réseaux de neurones artificiels.....	90
IV.6.1 Généralité sur les réseaux de neurones.....	90
IV.6.1.1 Machine Learning and Deep Learning.....	90
IV.6.1.2 Deep Learning – DL (ou apprentissage profond).....	90
IV.6.2 Réseaux de neurones.....	90
IV.6.3 Conception du réseau.....	93
IV.7 Conclusion.....	98
Conclusion et perspectives.....	99
Référence.....	101

Liste des tableaux :

Tableau 1 - Caractéristiques géométriques du barrage de Douéra.....	38
Tableau 2 - Caractéristiques géométriques du barrage de Douéra.....	40
Tableau 3 - Valeurs moyennes obtenues des caractéristiques mécaniques.....	43
Tableau 4 - Fréquences fondamentales calculées par la méthode simplifiée.....	43
Tableau 5 - Résultats de l'analyse modale en 2D sans retenue.....	46
Tableau 6 - Masses ajoutées selon ZANGAR.....	49
Tableau 7 - Résultats de l'analyse modale en 2D avec retenue.....	50
Tableau 8 - participations massiques du barrage 2D avec retenue.....	53
Tableau 9 - Résultats de l'analyse modale en 3D sans retenue.....	54
Tableau 10 - Résultats de l'analyse modale en 3D avec retenue.....	57
Tableau 11 - Comparaison entre les fréquences en 2D et 3D sans retenue.....	58
Tableau 12 - Degré de sévérité des dommages adoptés.....	87

Liste des figures :

Figure 1 - Disposition d'un barrage déversant	18
Figure 2 - Barrage poids	19
Figure 3 - Barrage voûte	19
Figure 4 - Les types de barrage en béton.....	20
Figure 5 - Barrage homogène	21
Figure 6 -Barrage à noyau	21
Figure 7 - Barrage à masque	21
Figure 8 - Les types de barrage en remblai	22
Figure 9 - Evacuateur de crues	23
Figure 10 - Ouvrage de vidange	24
Figure 11 - L'instabilité par glissement concerne le parement aval lorsque le réservoir est plein (a), et le parement amont au moment d'une vidange rapide (b).	27
Figure 12 - Un renard peut survenir dans le corps de l'ouvrage (a) ou dans la fondation (b).	28
Figure 13 - Évolution type d'un renard dans le corps de l'ouvrage. Vue en coupe rive/rive. Le diamètre du conduit s'agrandit par érosion latérale, puis provoque une brèche par effondrement.	28
Figure 14 - Évolution type d'une brèche par surverse. Vue en coupe amont/aval	29
Figure 15 - Évolution type d'une brèche par surverse. Vue en coupe rive/rive	29
Figure 16 - Contexte de la SHM	31
Figure 17 - Vue sur la retenue du barrage de Douera	38
Figure 18 - Vue en plan du barrage principal	39
Figure 19 - Profil en long du barrage	39
Figure 20 - Modèle pour résonateur simple à 2 degrés de liberté	41
Figure 21 - Organigramme définissant le fonctionnement du logiciel SAP2000	44
Figure 22 – La coupe type du barrage.....	45
Figure 23 - Le modèle 2D en éléments finis du barrage	46
Figure 24 - Les déformées modales en 2D sans retenue	47

Figure 25 - La distribution des pressions pour différentes pentes inférieures selon ZANGAR	48
Figure 26 - Distribution de la masse sur les nœuds de 1 à 10	49
Figure 27 - Le pression d'eau appliquée sur le parement extérieur du barrage (coté amont)	50
Figure 28 - Les digrammes des efforts modaux	51
Figure 29 - Comparaison entre les fréquences max sans et avec retenue	52
Figure 30 - Comparaison entre les fréquences min avec et sans retenue	52
Figure 31 - Modèle3D du barrage vue côté amont	54
Figure 32 - Modèle3D du barrage vue côté aval	54
Figure 33 - Modèle3D du barrage	54
Figure 34 – Déformées modales en 3D sans retenue	55
Figure 35 – Comparaison entre les fréquences en 2D et 3D sans retenue	58
Figure 36 – Illustration des procédures dans les algorithmes évolutionnaires	64
Figure 37 – Représentation d'une population génétique.....	65
Figure 38 – L'opération de croisement.....	66
Figure 39 – Opérateur de mutation.....	66
Figure 40 – Les points candidats choisis dur le modèle.....	69
Figure 41 – L'emplacement des points candidats choisis	70
Figure 42 – Les emplacements des capteurs après 30 milles générations selon x (27 capteurs)	70
Figure 43 – Les emplacements des capteurs après 30 milles générations selon x (27 capteurs) sans solide inclus	71
Figure 44 – Les emplacements des capteurs après 30 milles générations selon z (23 capteurs)	71
Figure 45 – les emplacements des capteurs après 30 milles générations selon z (23 capteurs) sans solide inclus.....	71
Figure 46 – La courbe donnant le nombre de capteur en fonction des générations (1 ^{er} cas)	72
Figure 47 – les emplacements des capteurs après 90 milles générations selon x (19 capteurs).....	73
Figure 48 – Les emplacements des capteurs après 90 milles générations selon x (19 capteurs) sans solide inclus	73

Figure 49 – Les emplacements des capteurs après 90 milles générations selon y (19 capteurs).....	74
Figure 50 – Les emplacements des capteurs après 90 milles générations selon z (21 capteurs).....	74
Figure 51 – La courbe donnant le nombre de capteur en fonction des générations (2 ^{eme} cas).....	75
Figure 52 – les emplacements des capteurs après 150 milles générations selon x (36 capteurs).....	75
Figure 53 – les emplacements des capteurs après 150 milles générations selon y (21 capteurs).....	76
Figure 54 – Les emplacements des capteurs après 150 milles générations selon z (42 capteurs).....	76
Figure 55 – La courbe donnant le nombre de capteur en fonction des générations (3 ^{eme} cas).....	77
Figure 56 – Les points candidats sur la crête	77
Figure 57 – La courbe donnant le nombre de capteur en fonction des générations (4 ^{eme} cas)	78
Figure 58 – Les points candidats sur la crête et quelques parties du coté aval.....	79
Figure 59 – Les emplacements des capteurs selon x (1 ^{er} cas).....	79
Figure 60 – Les emplacements des capteurs selon z (1 ^{er} cas).....	80
Figure 61 – Courbe d'évolution (1 ^{er} cas).....	80
Figure 62 – Les points candidats sur la crête et le coté aval.....	81
Figure 63 – Les emplacements des capteurs selon x (2 ^{eme} cas).....	81
Figure 64 – Les emplacements des capteurs selon z (2 ^{eme} cas).....	82
Figure 65 – Courbe d'évolution (2 ^{eme} cas).....	82
Figure 66 - représentations des contraintes maximales sur le barrage.....	86
Figure 67 - Les zones en vert représentent les zones choisies.....	86
Figure 68 - Les spectres ciblés.....	88
Figure 69 - La forme de l'enveloppe.....	88
Figure 70 - Les 200 premières secondes des accélérogrammes générées	88
Figure 71 - Schéma représentant un neurone artificiel.....	90
Figure 72 - Exemple de réseaux de neurones.....	91
Figure 73 - les fonctions d'activation.....	92
Figure 74 - Schéma du réseau adopté.....	93

Figure 75 - Erreur relative en fonction du nombre d'axes principaux considérés (input).....	94
Figure 76 - Courbe montrant l'évolution de la précision sur les données d'apprentissage en fonction des itérations	96
Figure 77 - Courbe montrant l'évolution la perte de précision de l'apprentissage en fonction des itérations.....	96
Figure 78 - Courbe montrant l'évolution de la précision sur les données de validation en fonction des itérations	97

Introduction générale

Introduction générale :

La construction des barrages est coûteuse et très complexe, sur le plan économique et technique, l'importance de ces ouvrages exige une surveillance continue. D'où la SHM (Structural Health Monitoring) qui consiste à surveiller de manière constante ces ouvrages afin de prolonger leur durée de vie.

Problématique :

Les barrages sont soumis à de différentes charges au cours de leurs durées de vie, ces sollicitations peuvent par la suite induire une baisse de résistance des différents constituants, cette baisse pourrait induire des dégâts, d'où l'importance de la surveillance de la structure.

Objectif :

L'objectif de cette étude est de mettre en œuvre les méthodes de la SHM afin d'élaborer un processus de surveillance de l'état de santé du barrage du Douéra à l'aide de l'outil informatique afin de pouvoir détecter les dommages, leurs intensités et leurs emplacements à l'aide du signal vibratoire de la structure.

Organisation de la thèse :

Ce travail commence par une introduction générale.

Le premier chapitre consiste à une synthèse bibliographique sur les barrages et sur la SHM.

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse et à la modélisation du barrage.

Le troisième chapitre porte sur l'optimisation des emplacements à l'aide des algorithmes génétiques.

Le dernier chapitre comporte l'élaboration d'un réseau de neurones avec son apprentissage.

Pour enfin conclure le travail avec une conclusion générale.

Chapitre I :

Synthèse bibliographique

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1 Introduction :

L'eau est l'une des ressources les plus importantes et la demande augmente régulièrement à travers le monde.

D'après la commission internationale des grands barrages (CIGB ICOLD), depuis les trois derniers siècles, la quantité d'eau extraite des sources naturelles a été multipliée par 35 et la population mondiale par 8. Avec une population mondiale actuelle de 7,5 milliards grandissant en moyenne de 90 millions par an et les attentes légitimes des populations, la demande mondiale en eau devrait augmenter d'au moins 2 à 3% dans les décennies à venir.

Cette augmentation continue de la consommation, nécessite une conception des ouvrages pour la couvrir, d'où l'importance des barrages dans le monde.

I.2 Généralités sur les barrages :

I.2.1 Définition :

Un barrage est un ouvrage artificiel coupant le lit d'un cours d'eau et servant soit à en assurer la régulation, l'alimentation en eau des villes, l'irrigation des cultures, ou bien à produire de l'énergie.

Il doit être pourvu d'un dispositif qui permet de laisser passer l'eau que la retenue ne peut stocker. Cet organe est appelé déversoir pour les petits barrages, ou évacuateur de crues.

Barrage et évacuateur de crue peuvent être confondus. On parlera alors d'un barrage déversant. Il doit être équipé d'une vidange de fond qui permet de vider la retenue si cela est nécessaire et de rester maître de la montée du niveau dans la retenue.

Le dernier ouvrage annexe est constitué par la ou les prises d'eau qui servent à assurer la fonction pour laquelle a été conçu le barrage, alimentation d'un réseau d'irrigation, alimentation en eau potable, alimentation d'une usine hydroélectrique [2].

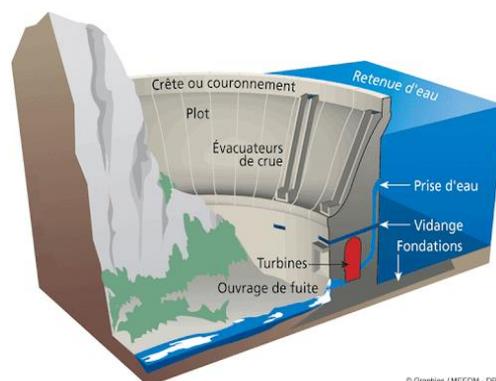


Figure 1 - Disposition d'un barrage déversant

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.2.2 Les types de barrages :

Les barrages peuvent être classés en deux groupes :

- Les barrages rigides, en béton ou en maçonnerie : font l'objet de nombreuses méthodes de calcul basées sur la résistance des matériaux et la théorie de l'élasticité notamment.
- Les barrages souples, en enrochement ou en terre : les barrages en terre particulièrement, sont un des principaux champs d'application de la mécanique des sols [1].

I.2.2.1 Barrage en béton :

L'avantage du béton est notamment d'autoriser l'édification d'ouvrages plus résistants. Il en existe trois principaux types :

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 [2].

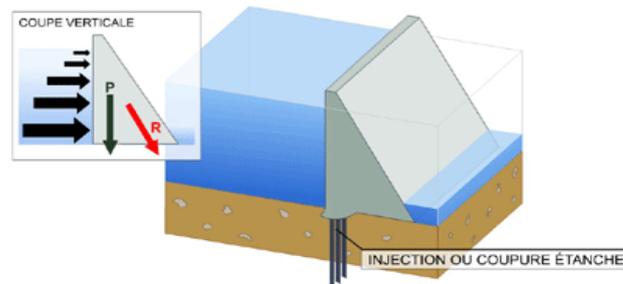


Figure 2 - Barrage poids

Barrage voûte :

Le barrage voûte représente l'ultime aboutissement de l'utilisation des propriétés du béton en termes de résistance. On pourrait comparer sa forme à celle d'un pont couché sur l'un de ses côtés, et qui chargerait de l'eau au lieu de véhicules. L'effort de résistance est ainsi en partie reporté par l'arc central sur les rives, permettant de construire des ouvrages moins volumineux, à performance égale [2].

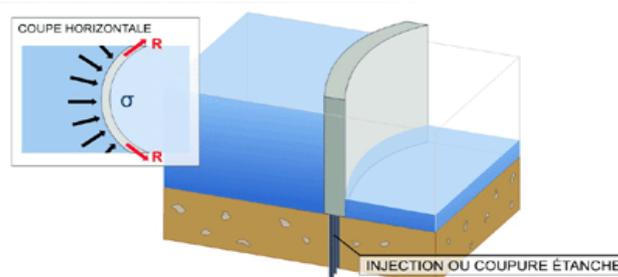


Figure 3 - Barrage voûte

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Barrages à contrefort et à voûtes multiples :

Les autres formes de barrages voûtes 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.

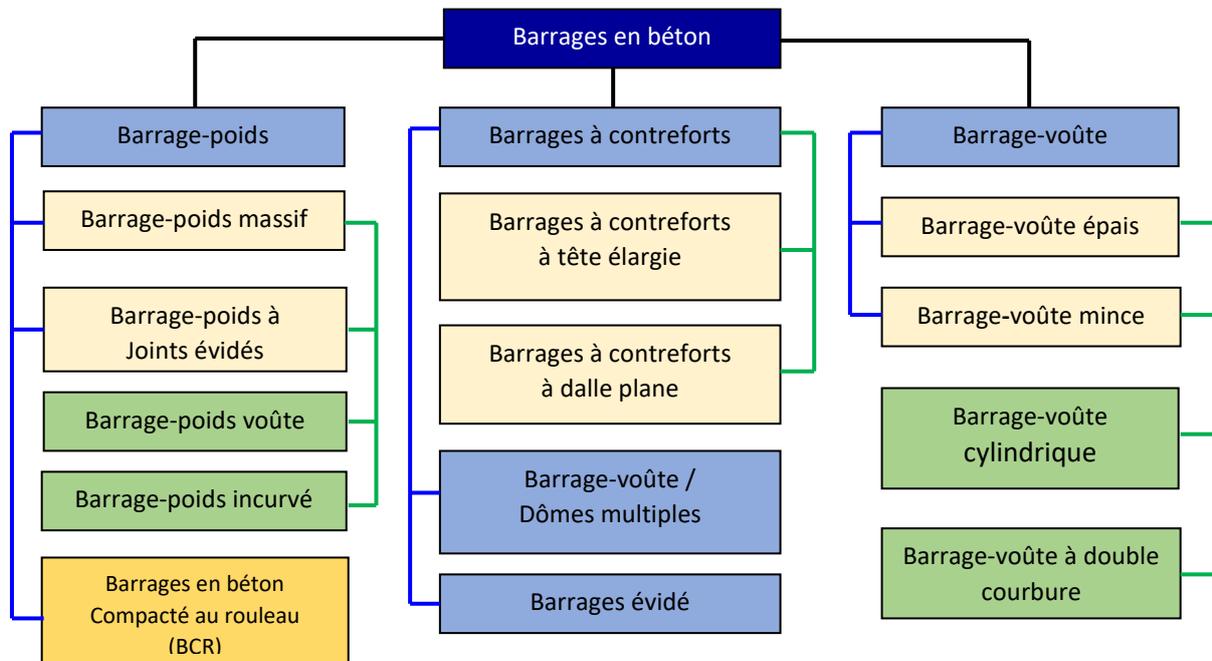


Figure 4 - Les types de barrage en béton

I.2.2.2 Barrages en remblai :

Ce type de barrage se distingue en deux catégories :

➤ Les barrages en terre :

Présentent notamment l'avantage de pouvoir reposer sur un sol de fondation peu portant.

Tous les barrages en terre peuvent être considérés comme des barrages poids. C'est ce qui explique leur section de forme trapézoïdale. On en trouve de trois types :

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Barrage homogène :

Un barrage en terre est dit homogène lorsqu'il est constitué d'un même matériau à dominante argileuse, relativement imperméable. Selon les ouvrages, la pente des talus sera plus ou moins forte, en fonction notamment des caractéristiques du matériau employé [2].

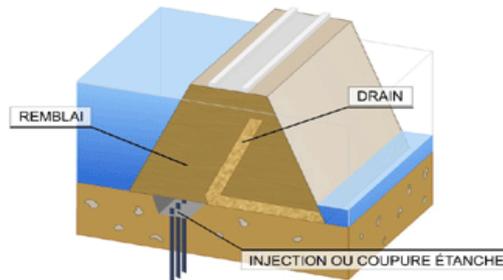


Figure 5 - Barrage homogène

Barrage à noyau :

Dans un barrage à noyau, les fonctions de résistance et d'étanchéité sont en quelque sorte séparées. La résistance est assurée par les recharges placées sur les flancs de l'ouvrage, et l'imperméabilité par le noyau central. 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 [2]

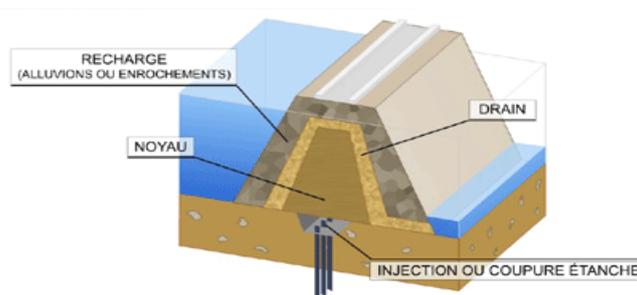


Figure 6 - Barrage à noyau

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, ciment ou béton bitumineux posé sur l'ouvrage lui-même, côté amont [2].

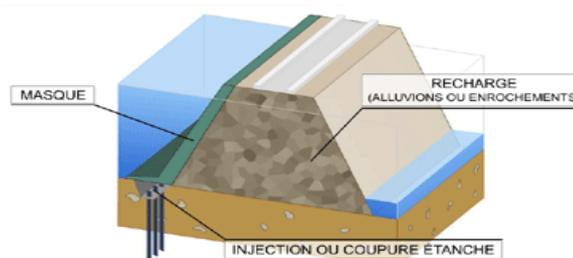


Figure 7 - Barrage à masque

Chapitre I : Synthèse bibliographique

➤ Les barrages en enrochements :

Sont essentiellement des « grands tas de gros cailloux », la fonction de résistance aux efforts externes (pression d'eau) et aux efforts internes (Frottement/Cohésion) étant assurée par le poids du massif. Comme ce dernier n'est pas imperméable par lui-même, il faut lui adjoindre un organe d'étanchéité qui constitue la partie la plus délicate de l'ouvrage.

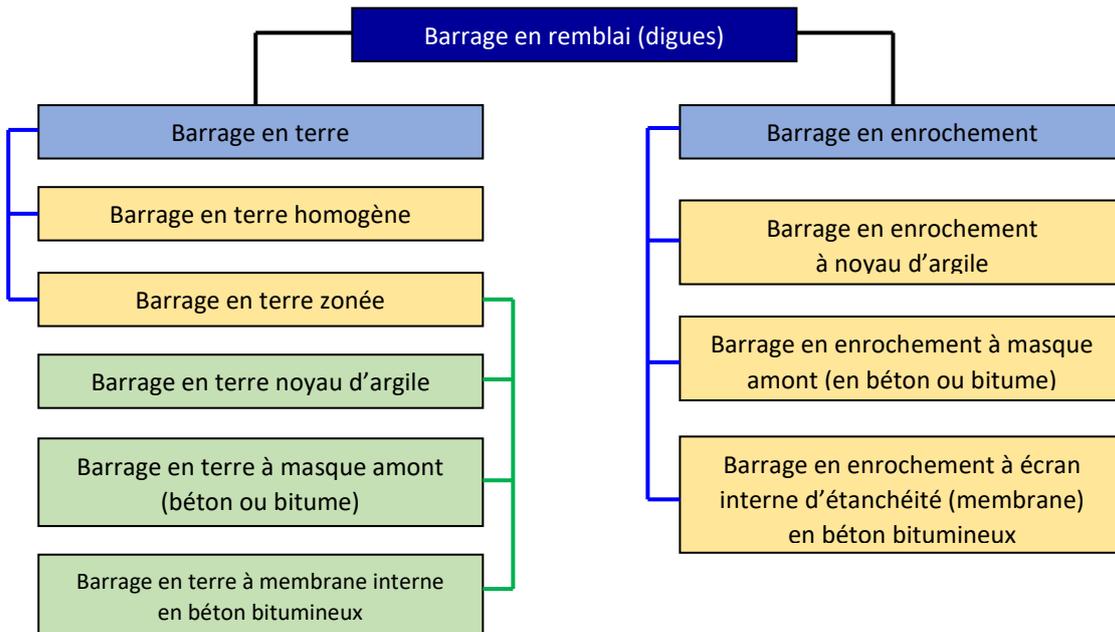


Figure 8 - Les types de barrage en remblai

I.2.3 Avantages et inconvénients des barrages en remblais à noyau :

➤ Avantages :

- Le corps du barrage est très flexible et adaptable aux conditions du terrain.
- Peu susceptible aux tassements et aux séismes.
- Petite à moyenne fouille. La digue n'est pas forcément fondée sur un rocher sain.
- La compression du sol est faible.
- Le gradient des sous-pressions au niveau de la fondation ou du noyau est faible.

➤ Inconvénients :

- Mise en place de grands volumes de matériaux
- Le remblai du noyau en argile est influencé par les conditions atmosphériques (climat pluie).

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.2.4 Les ouvrages annexes :

Un barrage est toujours accompagné d'ouvrages annexes qui concernent l'évacuation des crues, la vidange et la prise d'eau. L'usine hydroélectrique éventuelle peut être séparée ou intégrée au corps du barrage. En outre, l'exécution des fondations du barrage nécessite, par des moyens très divers, l'assèchement provisoire du lit du cours d'eau, en totalité ou par parties successives, sur son emprise. [3]

I.2.4.1 Evacuateurs de crues :

La maîtrise des crues est un élément fondamental de la sécurité des barrages ; elle est en grande partie fonction du dimensionnement des évacuateurs de crues et de leur fonctionnement. L'évacuateur de crues est l'organe dans lequel est concentré le débit à évacuer à l'aval en cas de crue. On réduit ainsi l'étendue des zones à protéger vis-à-vis du pouvoir érosif de l'eau. Le sous-dimensionnement ou le dysfonctionnement des évacuateurs de crues constitue une des causes principales de rupture de barrages au niveau mondial : 1/3 des ruptures sont dues à un problème d'évacuateur.



Figure 9 - Evacuateur de crues

I.2.4.2 Ouvrages de prise :

La prise d'eau proprement dite peut-être fixe au fond de la retenue. Elle peut consister en un simple piquage en dérivation à l'extrémité aval de la conduite de vidange.

Dans certains cas, il peut être intéressant de prélever l'eau soit en surface de la retenue, soit à différents niveaux de celle-ci, en fonction de la température de l'eau notamment. On y parvient au moyen d'une prise flottante ou d'une tour de prise munie d'orifices vannés à différentes hauteurs. Sur les petits ouvrages on peut prévoir un 'moine' qui est une sorte de petite tour de prise rustique très simplifiée. Dans le cas d'une prise par siphon, la partie amont du siphon peut être réalisée en éléments mobiles afin de suivre les variations du plan d'eau.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.2.4.3 Ouvrage de vidange :

Située à un point bas du barrage, elle permet d'évacuer les sédiments qui se déposent dans la retenue.

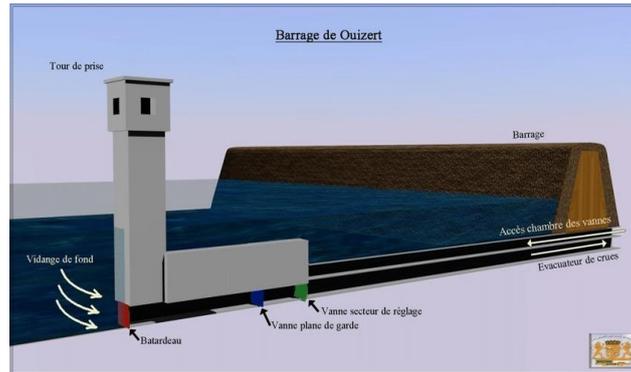


Figure 10 - Ouvrage de vidange

I.2.4.4 Les équipements de circulation :

Les barrages sont équipés de galeries permettant les accès aux équipements hydrauliques et électriques et permettant l'auscultation et le contrôle du barrage. Pour permettre la navigation fluviale, des écluses ou canaux de dérivation peuvent être aménagés (exceptionnellement on peut utiliser des ascenseurs à bateaux pour de fortes dénivellations). Pour favoriser la circulation des poissons migrateurs, on équipe les barrages de passes à poissons (canaux à faible vitesse d'écoulement). Il est très fréquent que les barrages soient utilisés comme voie de circulation en crête, on équipe donc le sommet d'une chaussée et des dispositifs usuels de sécurité.

I.2.4.5 Les équipements hydroélectriques :

Les équipements hydroélectriques peuvent se décomposer en 3 parties:

- Une partie d'équipement hydraulique concernant la circulation de l'eau.
- Une partie de transformation d'énergie (turbine, alternateur).
- Une partie électrique concernant la transformation et le transport de l'électricité.

Seule la partie hydraulique est du domaine des travaux publics. Les prises d'eau doivent être convenablement protégées (criblage, dessablage) pour éviter la dégradation des équipements. L'ensemble des équipements hydrauliques est équipé de vannes et de dispositifs de régulation des pressions et des débits.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.2.5 Choix du site et du type du barrage :

Les principaux paramètres à prendre en compte dans le choix du site et du type de barrages sont les suivants :

- La topographie et les apports du bassin versant ;
- La morphologie de la vallée ;
- Les conditions géologiques et géotechniques ;
- Le contexte météorologique et le régime des crues.

Dans plusieurs cas, après considération de ces aspects, plusieurs types de barrages resteront possibles. Des considérations économiques permettront alors de départager les solutions.

I.2.5.1 Topographie et apports du bassin versant :

Si l'on excepte le cas des plans d'eau à vocation touristique et les petits barrages hydroélectriques, c'est le volume de la retenue qui conditionne toute la conception du barrage. On cherche en effet à disposer d'un volume d'eau pour le soutien d'étiage, l'irrigation ou l'eau potable, ou bien d'un volume disponible pour amortir une crue.

Le tout premier travail consiste à calculer le volume d'eau d'une cuvette, en plusieurs sites éventuellement. Un premier dégrossissage peut être fait à l'aide de la carte IGN au 1/25000, sauf pour les retenues de quelques dizaines de milliers de m^3 . La deuxième étape fait l'objet de vérification du bassin versant autorisant le remplissage de la retenue et la détermination du à risque de défaillance.

I.2.5.2 Morphologie de la vallée :

Tout barrage est nécessairement lié à son environnement. La morphologie de la vallée joue un rôle important dans le choix du site du barrage et du type d'ouvrage le mieux adapté.

Bien entendu, l'emplacement idéal et le plus économique est celui d'un site étroit, précédé à l'amont par un élargissement de la vallée, à condition que les appuis du barrage soient sains (resserrement indépendant d'une zone d'éboulement ou d'un glissement). Ce type de site est peu fréquent, soit parce qu'il n'existe pas toujours de resserrement de vallée dans la nature, soit parce que le choix du site n'obéit pas toujours aux seules considérations techniques.

En première approximation, une vallée large conviendra mieux à l'aménagement d'un barrage en remblai. Un site étroit conviendra aussi à un barrage poids et un site très étroit conviendra aussi à une voûte. Tout cela bien sûr sous réserve que les fondations le permettent.

I.2.5.3 Géologie et conditions de fondation :

La nature, la résistance, l'épaisseur, le pendage, la fracturation et la perméabilité des formations rencontrées au droit du site constituent un ensemble de facteurs souvent déterminants dans la sélection du type de barrage.

➤ **Fondations rocheuses :**

Sauf en cas de roches très fissurées ou de caractéristiques très médiocres, les fondations rocheuses se prêtent à l'édification de tous types de barrages, moyennant des dispositions adéquates concernant la purge des matériaux très altérés et le traitement éventuel par injection.

L'aspect important est le régime des fractures (failles, joints, diaclases, schistosité). Les barrages en remblai conviennent toujours. Pour les autres, les exigences vont en croissant du BCR, au béton conventionnel et à la voûte.

➤ **Fondations graveleuses :**

Sous réserve qu'elles soient suffisamment compactes, ces fondations conviennent en général pour des barrages en terre ou en enrochements, du moins au plan mécanique. Le contrôle des fuites doit être assuré par un dispositif d'étanchéité et de drainage approprié. Dans la pratique, ce type de fondation se rencontre surtout pour les rivières ou fleuves à débit important.

L'ouvrage doit donc évacuer des crues importantes, ce qui exclut les barrages en terre. Des barrages en béton de très petite hauteur peuvent également être édifiés moyennant des précautions concernant les fuites et les percolations (risque de renard) et les tassements différentiels.

➤ **Fondations sablo-silteuses :**

Des fondations de silt ou de sable fin peuvent convenir à l'édification de barrages en terre, voire exceptionnellement à de très petits barrages poids en béton moyennant de sérieuses précautions.

➤ **Fondations argileuses :**

Des fondations argileuses impliquent presque automatiquement le choix de barrages en remblai, avec des pentes de talus compatibles avec les caractéristiques mécaniques des formations en place.

I.3 Pathologie des barrages en remblais :

I.3.1 Mécanismes de rupture :

➤ **Glissement du talus amont ou aval :**

Le glissement par instabilité désigne le détachement et le déplacement le long d'une pente d'un massif de sol ou de matériaux rocheux sous action des forces de gravité. La connaissance des glissements par instabilité doit beaucoup à l'étude des risques naturels.

L'eau est un facteur-clé du glissement du talus d'un barrage ou d'une digue. Ce phénomène peut survenir lorsque la résistance au cisaillement est médiocre (cohésion, angle de frottement interne), ou diminuée par la saturation du matériau initialement mal compacté ou compacté à une teneur en eau trop faible. Il peut également intervenir lorsque la pression interstitielle est trop élevée, à la suite d'une construction trop rapide, d'une vidange trop rapide, ou d'une déficience du drainage.

La stabilité des talus des barrages en remblai est en général vérifiée en fin de construction, à niveau normal du réservoir (figure a) et après une vidange rapide (figure b). Les glissements par instabilité n'intéressent pas que les talus des barrages, mais aussi les fondations, ainsi que les versants de la retenue.

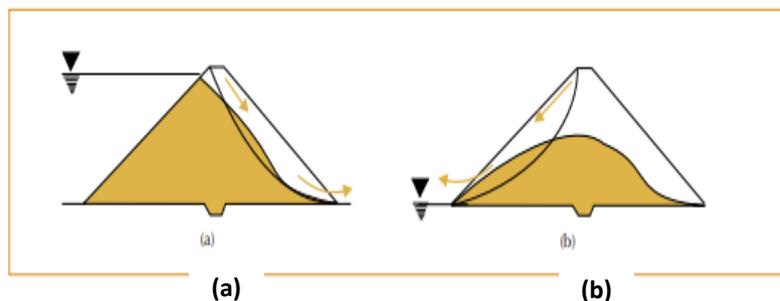


Figure 11 - L'instabilité par glissement concerne le parement aval lorsque le réservoir est plein (a), et le parement amont au moment d'une vidange rapide (b)

➤ **Érosion hydraulique interne**

L'érosion interne résulte du détachement et du transport de matière sous l'effet d'un écoulement d'eau, dans le corps d'un barrage ou dans la fondation. Lorsque le transport est un charriage concentré dans un conduit, c'est un renard. Lorsque le transport est diffus à travers la matrice solide et ne concerne que les fines en suspension, c'est une suffusion. Ce phénomène local est difficile à reproduire en laboratoire, ou à observer in situ. Il n'est pas spécifique aux ouvrages, mais concerne également les risques naturels.

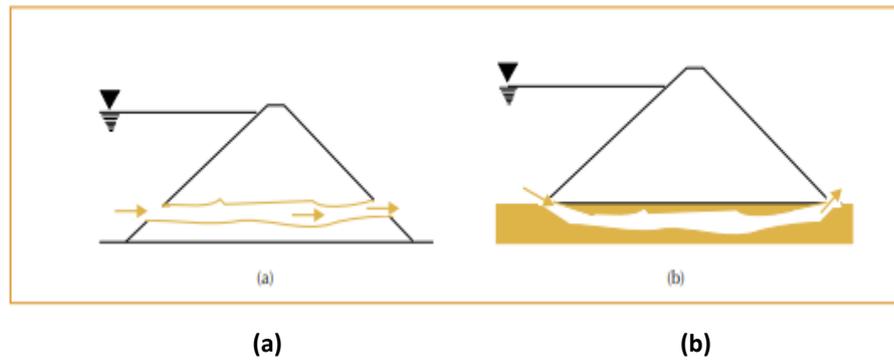


Figure 12 - Un renard peut survenir dans le corps de l'ouvrage (a) ou dans la fondation (b).

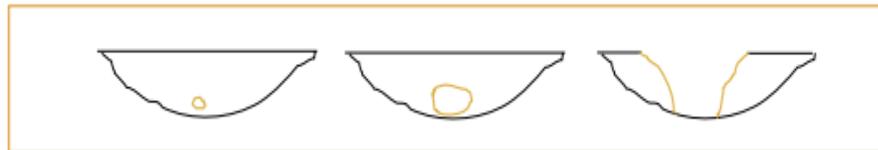


Figure 13 - Évolution type d'un renard dans le corps de l'ouvrage. Vue en coupe rive/rive. Le diamètre du conduit s'agrandit par érosion latérale, puis provoque une brèche par effondrement.

➤ **Érosion hydraulique externe :**

De nombreux facteurs peuvent être à l'origine de la surverse d'un barrage en terre. L'érosion externe concerne les ouvrages, mais aussi les appuis et les rives. L'érosion externe concerne également les phénomènes et risques naturels.

L'analyse statistique des ruptures passées montre que :

- ❖ La largeur de la brèche est de l'ordre de deux à cinq fois la hauteur du barrage.
- ❖ La moitié des brèches est initiée par moins de cinquante centimètres de hauteur d'eau.
- ❖ La durée de formation de la brèche est de quelques minutes à quelques heures.

Deux phénomènes en sont à l'origine :

- ❖ Le détachement et le transport solide par charriage sur le parement aval puis sur le fond et les côtés de la brèche.
- ❖ Le glissement par instabilité des parois latérales ainsi formées. [4]

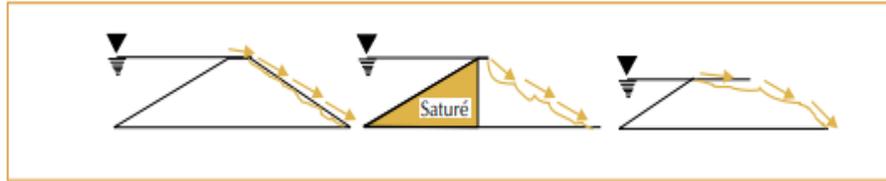


Figure 14 - Évolution type d'une brèche par surverse. Vue en coupe

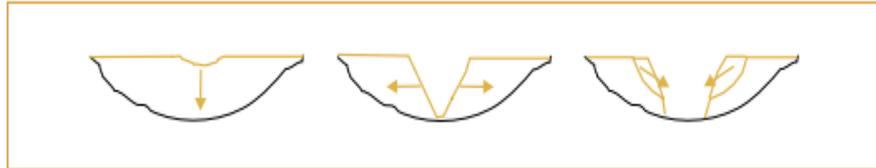


Figure 15 - Évolution type d'une brèche par surverse. Vue en coupe rive/rive

➤ Destruction liée aux phénomènes sismiques

Un séisme peut provoquer la rupture d'un barrage, ou des dégâts importants au barrage et à ses ouvrages annexes. Dans le second cas, des actions immédiates peuvent s'avérer nécessaires pour prévenir un affaiblissement ultérieur de l'ouvrage. Aussi, est-il nécessaire que les exploitants de barrages connaissent parfaitement les procédures à suivre en cas de séisme d'intensité susceptible de causer des dégâts.

Les catégories de ruptures causées par le séisme :

- **Instabilité de la fondation** : due à la Liquéfaction, Glissements, Effondrements Entraînement ou dissolution de matériaux par l'eau ou Mouvements de failles près du barrage.
- **Évacuateurs de crues défectueux** : due aux Obstructions, Revêtements détériorés, Détériorations des vannes ou des treuils, Déplacements des dalles.
- **Ouvrages de vidange défectueux** : due aux Obstructions, Détériorations des vannes ou des treuils, Déplacements des revêtements.
- **Barrages en remblais défectueux** : due aux Déplacements ou déformations différentiels, Surcharges mécaniques notamment au pied aval (mise en évidence par des fissurations ou écrasements du béton), Liquéfaction, Instabilité de talus, Percolation importantes, Entraînement ou dissolution de matériaux, Erosion Fissures ou trous d'effondrement résultant de l'activité sismique.
- **Bords de la retenue défectueux** : due à l'Instabilité de pente, Faiblesses propres aux barrières naturelles, Dolines provoquées par les secousses sismiques. [5]

I.3.2 Auscultation des barrages en remblai :

- La surveillance des barrages est basée sur deux méthodes complémentaires :
 - **L'inspection visuelle** est une méthode qualitative qui est fondamentale car elle intègre la complexité du comportement de l'ouvrage.
 - **L'auscultation** est une méthode quantitative qui met en œuvre une instrumentation et une analyse des mesures spécifiques à chaque ouvrage.
- L'auscultation est indispensable pour le suivi du barrage, de sa conception à sa mise hors service. C'est une composante de son comportement structurel et du contrôle de la sécurité. Elle est également précieuse pour faire progresser la connaissance sur le comportement et le vieillissement du barrage, et permettre d'améliorer les études et expertises dans leurs différents aspects techniques et économiques. De ce point de vue, l'auscultation est une composante essentielle de progrès. Elle permet d'indiquer à l'exploitant avant qu'il ne soit trop tard les travaux de confortement nécessaires et, dans les cas extrêmes, les mesures d'urgence assurant la protection des populations en aval. [6]

I.4 Surveillance de la santé structurale (SHM) :

I.4.1 Définition de la SHM :

Au cours des deux dernières décennies, la technologie SHM a connu un développement énorme.

La surveillance de la santé structurale (SHM) désigne le processus de mise en œuvre d'une stratégie de détection et de caractérisation des dommages pour les structures d'ingénierie. Ici, les dommages sont définis comme des modifications apportées aux propriétés matérielles et/ou géométriques d'un système structurel, y compris des modifications des conditions aux limites et de la connectivité du système, qui affectent les performances du système.

Le processus SHM implique l'observation d'un système au fil du temps en utilisant des mesures de réponses dynamiques échantillonnées périodiquement à partir d'un réseau de capteurs, l'extraction de caractéristiques sensibles aux dommages et l'analyse statistique de ces caractéristiques pour déterminer l'état actuel du système.

Pour la SHM à long terme, le résultat de ce processus est une information périodiquement mise à jour concernant la capacité de la structure à remplir sa fonction à la lumière du vieillissement inévitable et de la dégradation résultant des environnements opérationnels. Après des événements extrêmes, tels que des tremblements de terre ou un chargement par explosion,

Chapitre I : Synthèse bibliographique

la SHM est utilisée pour le dépistage rapide des conditions et vise à fournir, en temps quasi réel, des informations fiables sur l'intégrité de la structure.

L'inspection des infrastructures joue un rôle clé dans la sécurité publique en ce qui concerne à la fois l'accumulation des dommages à long terme et les scénarios d'événements post extrêmes.

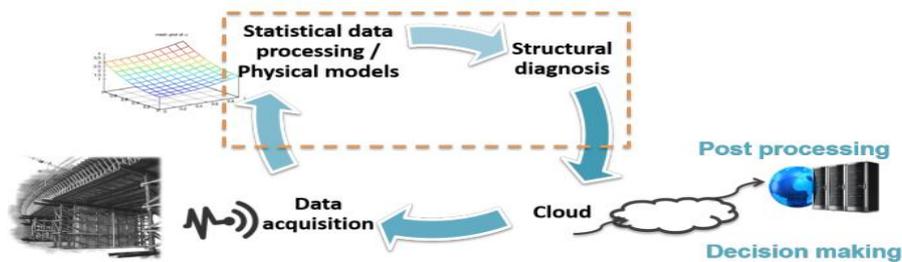


Figure 16 - Contexte de la SHM

I.4.2 Surveillance locale et globale:

I.4.2.1 Surveillance Locale:

Les techniques de détection locales sont soit méthodes expérimentales visuelles ou localisées telles que l'utilisation des rayons X, jauges de contrainte, fibres optiques, ultrasons vibrations, courants de Foucault, émissions acoustiques et infrarouge.

I.4.2.2 Méthode de Surveillance Globale :

Les techniques globales basées sur les vibrations sont des méthodes qui déterminent l'état de santé des structures aux changements dans leurs propriétés dynamiques ou leurs réponses.

Doebling et al. (1996) ont commenté les caractéristiques des techniques idéales d'identification des dommages être utilisé pour atteindre l'objectif de la santé structurelle surveillance [7].

I.4.2.2.1 Méthode du domaine fréquentiel :

Le domaine fréquentiel est une représentation de la façon dont la nature du signal change en fonction de la fréquence. Ce processus est réalisé en prenant un signal dans le domaine temporel et en le transformant ensuite par la technique mathématique appelée transformée de Fourier dans le domaine des fréquences. Le rapport réponse-excitation dans le domaine fréquentiel à chaque fréquence est appelé fonction de réponse en fréquence (FRF).

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Les avantages communément reconnus des méthodes du domaine fréquentiel comprennent la possibilité d'une modélisation partielle (bande de fréquences limitée), une réduction facile du bruit, une simple fusion des données provenant de différentes expériences et l'absence de nécessité de faire des estimations initiales du modèle à identifier [10].

I.4.2.2.2 Méthode du domaine temporel :

Les méthodes du domaine temporel ont longtemps représenté une norme pour l'analyse modale expérimentale en génie civil, en particulier dans les applications de sortie uniquement où classique, les techniques du domaine fréquentiel s'avèrent généralement peu pratiques [10].

I.4.2.2.3 Méthode basée sur l'indicateur MAC :

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

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

$$MAC = \frac{(\phi_S^T \phi_D)^2}{(\phi_S^T \phi_S)(\phi_D^T \phi_D)} \quad (1)$$

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

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

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

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

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

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

Il est utile également pour :

- Mesurer les formes modales à partir des vecteurs déterminés par un modèle analytique.
- Estimations du même vecteur modal de test obtenues à partir de différents emplacements d'excitation.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- Estimations du même vecteur modal obtenues à partir de différents processus d'identification des paramètres modaux en utilisant le même test des données.
- Une forme de mode de test avant et après un changement de structure physique provoqué par une modification souhaitée [11].

I.4.2.2.4 Méthode basée sur le changement de rigidité (matrice de flexibilité) :

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

$$F_0 = \sum_{K=1}^N \frac{1}{w_{0,K}^2} \phi_{0,K} \phi_{0,K}^T \quad (3)$$

$$F_d = \sum_{K=1}^N \frac{1}{w_{d,K}^2} \phi_{d,K} \phi_{d,K}^T \quad (4)$$

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

$$|\Delta F| = |F_0 - F_d| \quad (5)$$

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

I.4.2.2.5 Méthode cross-corrélation basée sur la transmissibilité :

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

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

$$T_{(i,p)}(w) = \frac{X_i(w)}{X_p(w)} \quad (6)$$

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

On peut aussi exprimer la transmissibilité en (FRF)

Chapitre I : Synthèse bibliographique

$$T_{(i,p)}(w) = \frac{X_i(w)/F_b(w)}{X_p(w)/F_b(w)} = \frac{H_{i,b}(w)}{H_{p,b}(w)} \quad (7)$$

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

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

$$cov(Y, Z) = \frac{\rho(Y, Z)}{\sigma_Y \sigma_Z} \quad (8)$$

$$CDI(T^d, T^u) = \left| \frac{\rho(T^d, T^u)}{\sigma_{T^d} \sigma_{T^u}} \right| = \left| \left(\frac{\sum_{t=1}^n (T_t^d - \bar{T}^d)(T_t^u - \bar{T}^u)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (T_t^d - \bar{T}^d)^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (T_t^u - \bar{T}^u)^2}} \right) \right| \quad (9)$$

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

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

$$TAC = \frac{\left((T^d)^T (T^u) \right)^2}{\left((T^d)^T (T^d) \right) \left((T^u)^T (T^u) \right)} \quad (10)$$

I.4.2.2.6 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle :

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

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

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

Propriétés des réseaux de neurones :

- Plein d'unités semblables aux neurones ; commutations basées sur des seuils
- Plein d'interconnexions pondérées entre les unités.
- Processus distribué hautement parallèle.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- L'accent est mis sur le réglage automatique des poids [12].

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

I.5 Conclusion :

Les barrages sont des ouvrages importants. Leur durabilité est essentielle, c'est pourquoi la surveillance de ces structures est primordiale. La SHM permet de suivre l'état de santé de l'ouvrage et permet de prolonger la durée de vie de la structure en permettant de détecter les détériorations et ainsi de faire son entretien.

Chapitre II :

Analyse et modélisation
numérique

Chapitre II : Analyse et modélisation numérique

II.1 Introduction :

Ce présent chapitre concerne l'élaboration d'un modèle numérique en éléments finis du barrage de Douéra en utilisant le logiciel de calcul aux Eléments Finis SAP2000®V22 édité par Computers & Structures Inc.

La première étape est basée sur l'élaboration d'un modèle 2D suivant les deux cas de déformations planes : avec et sans retenue. Ces modèles nous permettent de déduire les paramètres modaux du barrage notamment les fréquences propres et les modes de déformation.

Par la suite, le passage au modèle 3D nous a permis de mettre en évidence l'influence de la géométrie rive-rive sur les fréquences propres et les modes de déformation du barrage.

II.2 Présentation du barrage de Douera :

Le barrage de Douera est situé sur l'Oued Ben Amar à environ 2 km au sud-ouest de Douera et à environ 17 km au sud-ouest d'Alger. Ce barrage réservoir permet le stockage des eaux transférées par les oueds Mazafran (39 hm³) et El-Harrach. Sa capacité est de 87 hm³ destiné principalement à l'irrigation de la plaine de la Mitidja Centre et la réalimentation de la nappe par infiltration. Il renforce en eau potable la région ouest de la capitale.

Le bassin versant du barrage de Douera est situé à l'intérieur de la région des Bassins Côtiers Algérois Ouest (Région 02), où se trouvent beaucoup de stations pluviométriques et de jaugeage. Les coordonnées (Lambert) du site du barrage sont : **X=520,100 m; Y=373,100 m ; Z=70 m.**

Le site du barrage est localisé dans les collines du Sahel, dont la hauteur moyenne est d'environ 200 m. L'Oued Ben Amar et ses affluents, s'écoulant vers la plaine de la Mitidja, ont creusé des vallées encaissées dans le flanc méridional du Sahel. A l'endroit du barrage, la coupe transversale de la vallée est un V asymétrique, avec rive gauche escarpée et rive droite en pente douce. En aval du site, la pente du lit de l'Oued s'accentue, et la vallée se rétrécit. En amont, la vallée se divise en plusieurs affluents pour former un réservoir large.

La géologie de la cuvette et du site reposent presque entièrement sur des argiles calcaires du Pliocène. Des grès calcaires de la formation de l'Astien couronnent la crête de rive gauche latérale au barrage. Cet affleurement se trouve au-dessus du niveau de la retenue [14].



Figure 17 - Vue sur la retenue du barrage de Douera

II.3.1 Caractéristiques géométriques du barrage :

Le barrage de Douéra est un barrage en remblais à noyau argileux et de recharges constituées en matériaux gréseux. Les caractéristiques géométriques sont rappelées dans le tableau ci-après.

Tableau 1 - Caractéristiques géométriques du barrage de Douera

Cote de la crête	142 m NGA
Largeur en crête	12 m
Longueur en crête	810 m
Hauteur maximale au-dessus de la fondation	79 m
Cote de la retenue normal (RN)	138 m NGA

*NGA : le niveau général Algérien

II.3.2 Caractéristiques physiques des matériaux constitutifs :

Les propriétés physiques des matériaux constituant les remblais du barrage comme le module d'élasticité n'ont pas fait l'objet d'essais spécifiques, contrairement à d'autres propriétés nécessaires pour élaborer les calculs de stabilité comme l'angle de frottement interne des matériaux, leurs cohésions et leurs perméabilités.

N'ayant pas accès aux données relatives aux reconnaissances effectuées sur les matériaux constituant le barrage en phases d'études, différentes données bibliographiques ont été analysées pour définir les caractéristiques de ces matériaux. Le paramètre qui a été pris en compte dans l'analyse des propriétés des matériaux est la vitesse de propagation d'ondes.

A cet effet, le recours à la littérature [15] a été nécessaire pour définir les propriétés physiques nécessaires pour renseigner le modèle en éléments finis.

La formule de corrélation ci-après a été utilisée pour déterminer les caractéristiques des matériaux constituant le corps du barrage :

$$E = \rho \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} V_s^2 \quad (11)$$

ρ : Masse volumique [Kg/ m³]

E : Module de Young [MPa]

V_p : Vitesse de propagation des ondes volumique [m/s]

V_s : Vitesse de propagation des ondes surfaciques [m/s]

Tableau 2 - Caractéristiques physiques du barrage de Douéra

	Argile/ Sol	Filtre sable-sec	Drain Grés	Alluvion	Enrochement
$V_{p,min}$ (m/s)	1100	400	2000	1500	2300
$V_{p,max}$ (m/s)	2500	1200	3500	2000	2600
$V_{s,min}$ (m/s)	200	100	100	400	1100
$V_{s,max}$ (m/s)	800	500	1800	600	1300
E_{min} (MPa)	213,54	55,7	3955,8	982,3	6542,3
E_{min} (KN/m²)	213538	55733	3955810	982278	654230
E_{max} (MPa)	3324,6	1325,2	18820,87	2193,2	9013,3
E_{max} (KN/m²)	3324578	1325210	18820768	2193231	9013333
ν_{min}	0,44	0,39	0,32	0,45	0,33
ν_{max}	0,48	0,47	0,40	0,46	0,35
ρ(Kg/m³)	1800	1900	2200	2100	2000

II.4 Evaluation de la fréquence propre par méthode simplifiée :

II.4.1 Rappel des principes de la méthode simplifiée :

La méthode dynamique simplifiée, dite « Tardieu », consiste à estimer de manière simple et rapide la fréquence propre fondamentale d'un barrage en le supposant comme résonateur simple à 2 degrés de liberté sous forme de triangle dont la hauteur « H » est égale à la profondeur de la retenue normale.

L'accélération en tout point du barrage connaît une amplification par rapport à l'accélération spectrale à la fréquence fondamentale du barrage en fonction de l'élévation relative du barrage [16].

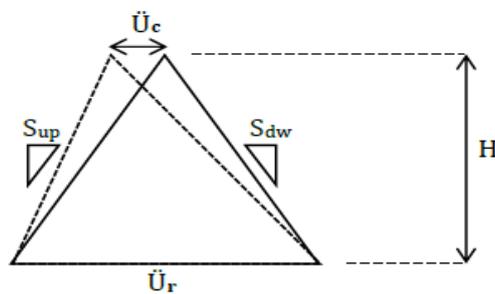


Figure 20 - Modèle pour résonateur simple à 2 degrés de

On suppose que :

- Le barrage est fondé sur du substratum rocheux supposé rigide ;
- Les effets de la composante horizontale rive à rive sont négligeables ;
- Le barrage est assimilé à un triangle dont la hauteur H est égale à la profondeur d'eau amont pour une retenue à la cote de retenue normale ;
- Le mode de déformation du barrage est supposé se réduire à un cisaillement horizontal et une flexion parallèle à l'axe du barrage
- L'accélération maximale atteinte en tout point du barrage est supposée due à sa sollicitation par un signal de fréquence égale à la fréquence fondamentale du barrage.
- L'effet hydrodynamique de la retenue est pris en compte selon l'analyse de ZANGAR

Chapitre II : Analyse et modélisation numérique

II.4.2 Application de la méthode simplifiée sur le barrage de Douera :

La fréquence fondamentale de vibration du barrage considéré comme un résonateur simple est donnée par la formule de Rayleigh :

$$f = \alpha \cdot V_s \quad (12)$$

Où V_s est la vitesse de l'onde de cisaillement :

$$V_s = \sqrt{(G/\rho)} \quad (13)$$

$$\text{Et : } G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (14)$$

Tardieu et al ont montré qu'il est possible de calculer le coefficient α , tel que :

$$f = 0.23 \frac{V_s}{H} \dots (15) \quad \text{Pour un barrage vide}$$

$$f = 0.17 \frac{V_s}{H} \dots (16) \quad \text{Pour un barrage à retenue pleine}$$

H : Hauteur de la retenue normale, égale à 75 m pour le barrage de Douera

A partir du Tableau 2 ci-dessus, les moyennes des valeurs minimales et maximales des propriétés mécaniques ont été calculées, ce qui permet d'encadrer également la fréquence fondamentale du barrage. Ces moyennes ont été calculées comme suit :

$$\rho_{\text{moy}} = \frac{\sum \rho_i A_i}{\sum A_i} \quad (17)$$

$$G = \frac{E_{\text{moy}}}{2(1+\nu)} \quad (18)$$

$$E_{\text{moy}} = \frac{\sum E_i A_i}{\sum A_i} \quad (19)$$

$$\nu_{\text{moy}} = \frac{\sum \nu_i A_i}{\sum A_i} \quad (20)$$

Chapitre II : Analyse et modélisation numérique

Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau ci-après :

Tableau 3 - Valeurs moyennes obtenues des caractéristiques mécaniques

ρ_{moy} Kg/m ³	ν	KN/m ²	KN/m ²
2046.21	$\bar{\nu}_{min} = 0.44$	$\bar{E}_{min} = 932297.8$	$\bar{G}_{min} = 324365.6$
	$\bar{\nu}_{max} = 0.46$	$\bar{E}_{max} = 3290821.5$ KN/m ²	$\bar{G}_{max} = 1130072.4$ KN/m ²

A partir des valeurs obtenues, les vitesses minimales et maximales ont été calculées et les valeurs obtenues sont présentées ci-après.

$$V_{smin} = \sqrt{\frac{324365.6 \times 10^3}{2046.21}} = 398.15 \text{ m/s}$$

$$V_{smax} = \sqrt{\frac{1130072.4 \times 10^3}{2046.21}} = 743.15 \text{ m/s}$$

Le tableau ci-après récapitule les valeurs des fréquences pour les deux configurations de barrage vide et barrage à retenue pleine.

Tableau 4 - Fréquences fondamentales calculées par la méthode simplifiée

Fréquences	Retenue vide	Retenue pleine
f_{min}	1.2 Hz	0.9 Hz
f_{max}	2.3 HZ	1.7 HZ

Chapitre II : Analyse et modélisation numérique

II.5 Modélisation EF et analyse numérique :

Afin de modéliser le barrage, le logiciel aux éléments finis SAP 2000 a été choisi. Ce logiciel est dédié au calcul et à la conception des structures d'ingénierie et plus particulièrement les bâtiments et ouvrages de Génie Civil. Il permet dans un environnement ergonomique interactif la saisie de la géométrie des ouvrages avec une bibliothèque d'éléments variés. Il offre de nombreuses possibilités d'analyse des effets statiques et dynamiques avec des compléments de conception et de vérification des structures en béton armé, charpente métallique. Le post-processeur graphique disponible facilite considérablement l'interprétation et l'exploitation des résultats et la mise en forme des notes de calcul et des rapports.

Le logiciel permet d'effectuer les étapes de modélisation (définition de la géométrie, conditions aux limites, propriétés des matériaux, chargements de la structure, etc.) de façon totalement graphique, numérique ou combinée, en utilisant les innombrables outils disponibles [17].

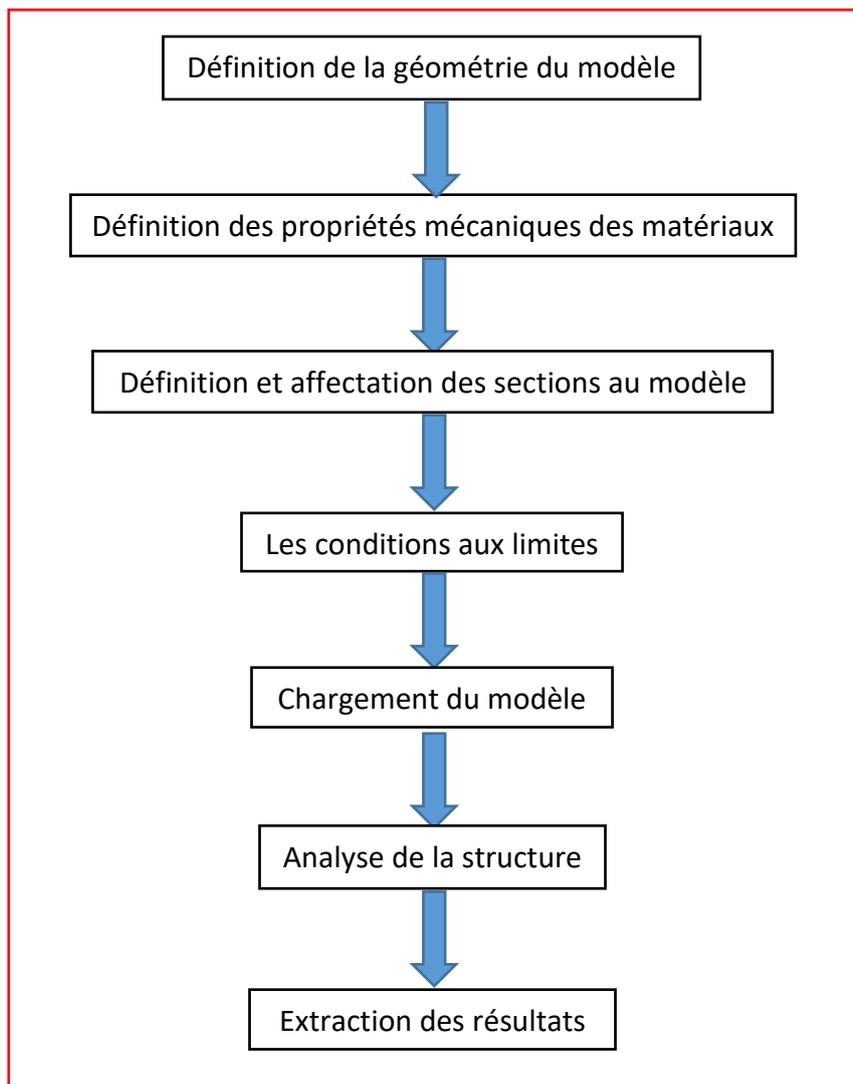
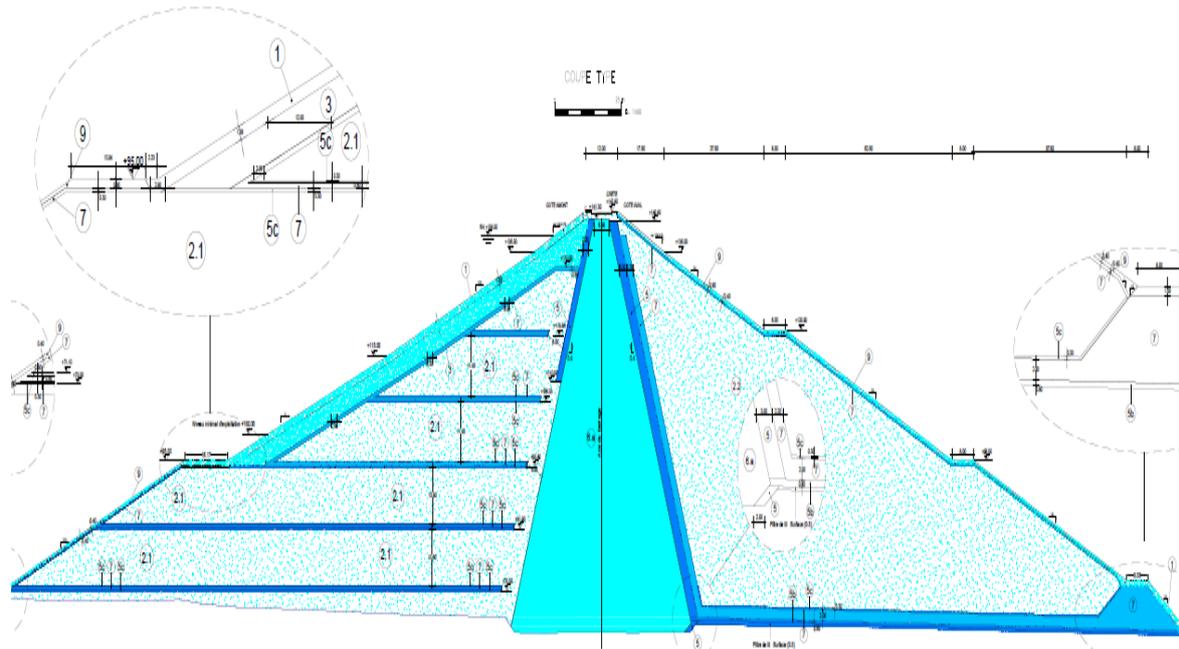


Figure 21 - Organigramme définissant le fonctionnement du logiciel



LEGENDE

- ① RIP-RAP
- ②.1 TOUT-VENANT GRESEUX SELECTIONNE (COMPACTE A 98 % OPM)
- ②.2 TOUT-VENANT GRESEUX (COMPACTE A 95 % OPM)
- ③ ENROCHEMENT SELECTIONNE A GRANULOMETRIE ETALEE
- ⑤ FILTRE FIN
- ⑤.c FILTRE :3-30 mm
- ⑤.b SABLE A BETON
- ⑥.a ARGILE (COMPACTEE AU 95 % PROCTOR NORMAL)
- ⑥.b ARGILE (COMPACTEE AU 98 % PROCTOR MODIFIE)
- ⑦ DRAINS ET TAPIS DRAINANT
- ⑨ RIP - RAP

Figure 22 – La coupe type du barrage

Chapitre II : Analyse et modélisation numérique

II.5.1 Présentation du modèle 2D (sans retenue)

Le modèle en éléments finis a été élaboré en utilisant le logiciel SAP2000.V22 pour déterminer les caractéristiques modales du barrage.

Ce dernier a été généré à partir de la coupe type du barrage. Et présente 833 nœuds et 1505 éléments surfaciques en prenant comme conditions aux limites des appuis doubles à la base.

Dans notre cas nous avons choisi de travailler sur le modèle 2D que nous avons élaboré et nous procédons par la suite à l'étude de la correspondance des modes vibratoires avec ceux du modèle 3D.

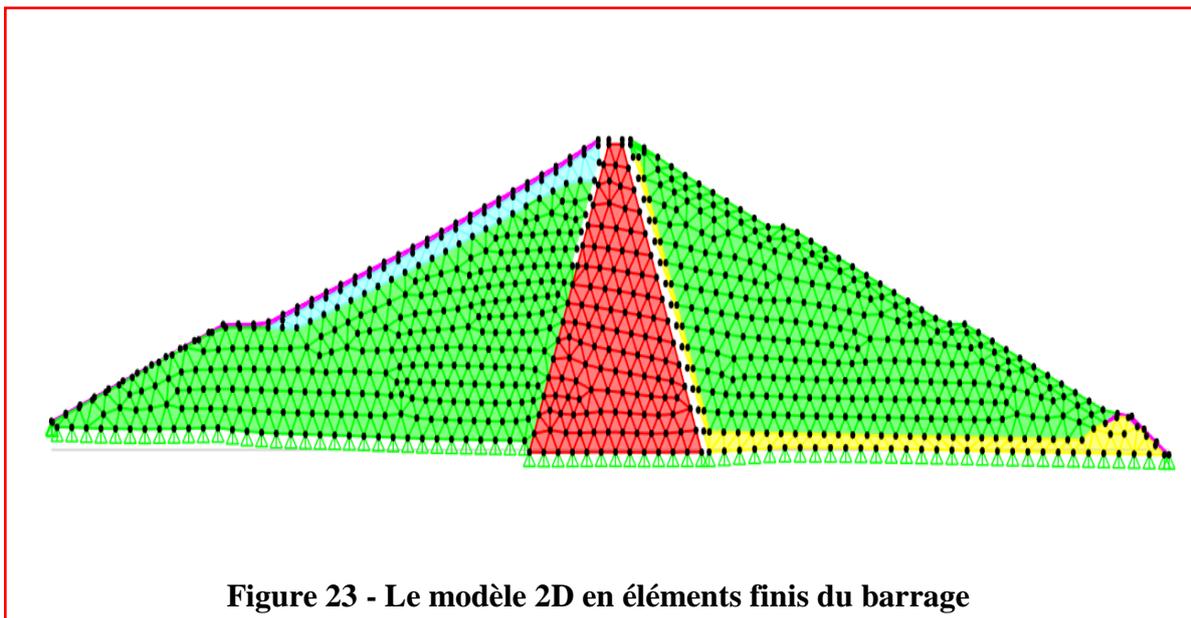


Figure 23 - Le modèle 2D en éléments finis du barrage

II.5.1.1 Analyse modale du modèle numérique bidimensionnel (sans retenue) :

L'analyse modale a été faite sur le modèle 2D en utilisant le logiciel SAP2000 en se basant sur la méthode des éléments finis sans prendre en compte de la retenue d'eau du barrage.

Tableau 5 – Résultats de l'analyse modale en 2D sans retenue

Mode propre	1	2	3	4	5
fmax (Hz)	2.83	4.24	4.78	5.08	5.65
Tmax (S)	0.35	0.24	0.21	0.20	0.18
fmin (Hz)	1.79	2.20	2.85	3.26	3.44
Tmin (S)	0.56	0.45	0.35	0.31	0.29

Chapitre II : Analyse et modélisation numérique

Les déformées modales bidimensionnelles avec les diagrammes des efforts modaux sont représentés ci-dessous :

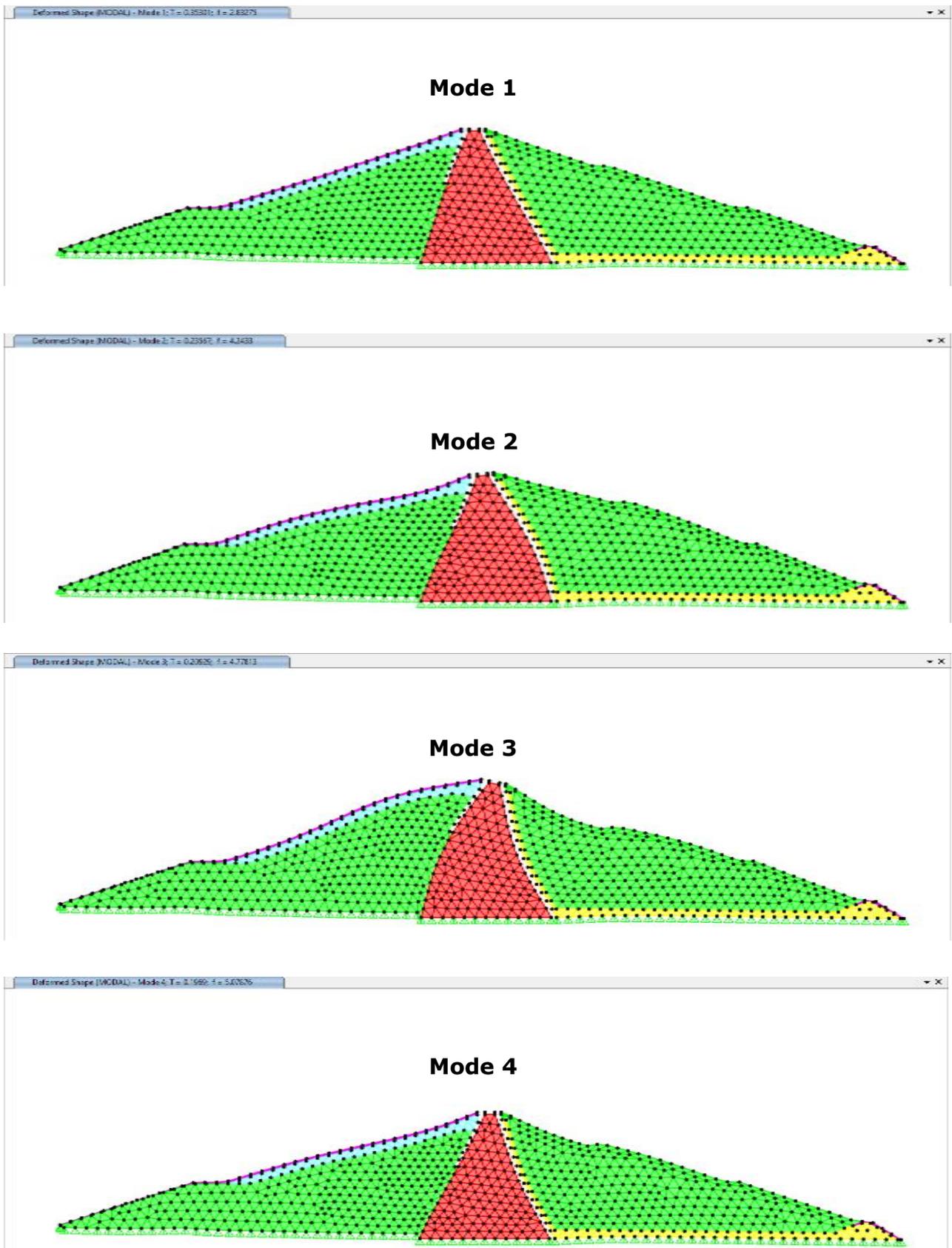


Figure 24 - Les déformées modales en 2D sans retenue

II.5.2 Présentation du modèle numérique 2D (avec retenue) :

II.5.2.1 Approche théorique de la méthode de ZANGAR :

Lors d'un séisme, le barrage ainsi que la masse d'eau présente dans le réservoir sont mis en mouvement et des surpressions hydrodynamiques vont s'exercer sur le parement amont du barrage. Ces surpressions s'ajoutent aux pressions hydrostatiques. Elles doivent être prises en compte comme le cas des charges dynamiques.

Ces Pressions agissant sur les barrages en remblais ont été largement et fréquemment étudiées par de nombreux chercheurs en raison de son application importante et directe dans la conception des barrages.

Il existe des études expérimentales (par ex. Zangar, 1953), des solutions analytiques (par exemple Westergaard, 1933; Chwang, 1978; Liu, 1986), des solutions analytiques approximatives (par ex. Aviles et Sanchez-Sesma, 1989) et de nombreux modèles numériques (par exemple Hall et Chopra, 1982; Liu et Cheng, 1984; Humar et Jablonski, 1988) pour les problèmes à deux dimensions, où l'application est encore rare.

Etant donné que le barrage de Douera présente un parement amont incliné, il a été décidé d'utiliser la formule de Zangar qui présente une distribution quasi-parabolique de la pression donnée par la formule suivante:

$$P_e = C. \alpha. \gamma_w. h \quad (21)$$

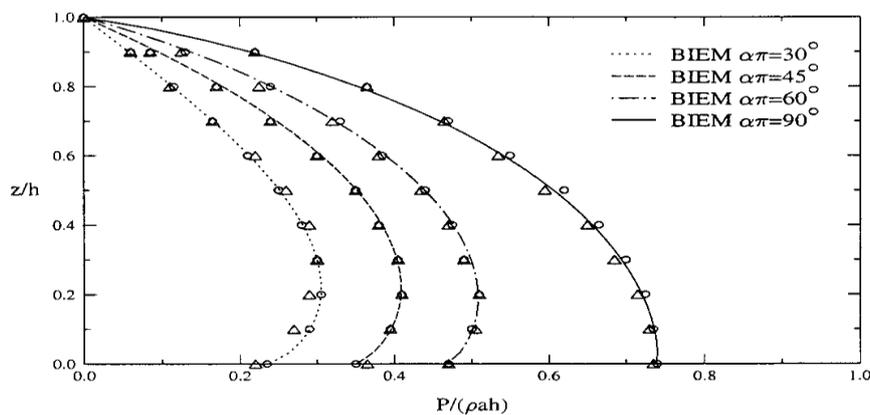


Figure 25 - La distribution des pressions pour différentes pentes inférieures selon ZANGAR

Les calculs ont été faits par la formule suivante :

$$P_e = \frac{1}{2} \alpha \gamma_w h C_m \left[\frac{y}{h} \left(2 - \frac{y}{h} \right) + \sqrt{\frac{y}{h} \left(2 - \frac{y}{h} \right)} \right] \quad (22) \quad \text{Et} \quad C = \frac{C_m}{2} \left[\frac{y}{h} \left(2 - \frac{y}{h} \right) + \right.$$

$$\left. \sqrt{\frac{y}{h} \left(2 - \frac{y}{h} \right)} \right] \quad (23)$$

Chapitre II : Analyse et modélisation numérique

- γ_w : Poids volumique de l'eau.
- h: Hauteur correspondant à la distance entre les centres des deux éléments adjacents
- C_m : Coefficient de pression maximale, qui est une fonction de l'angle du parement amont avec la verticale donnée, et qui est exprimée par la courbe suivante.

❖ Application sur le modèle :

On a choisi différents points sur notre modèle, et on a appliqué des masses suivant les deux axes x et z, pour mettre en évidence les pressions d'eau :

Tableau 6– Masses ajoutées selon ZANGAR

Nœud	Cote	y/H	Surface	Masse (tonnes)	Masse H	Masse V
9	70.789685	0.0533	21.95	69	24	65
8	68.713072	0.07958	21.95	88	30	83
7	64.559847	0.13215	21.95	120	41	113
6	46.543309	0.36021	21.95	220	75	206
5	34.822991	0.50857	21.95	263	90	248
4	30.212326	0.56693	21.95	277	95	260
3	17.708057	0.72521	21.95	305	104	286
2	11.478245	0.80407	21.95	314	107	295
1	9.401642	0.83036	21.95	316	108	297
0	7.325038	0.85665	10.97	159	54	150

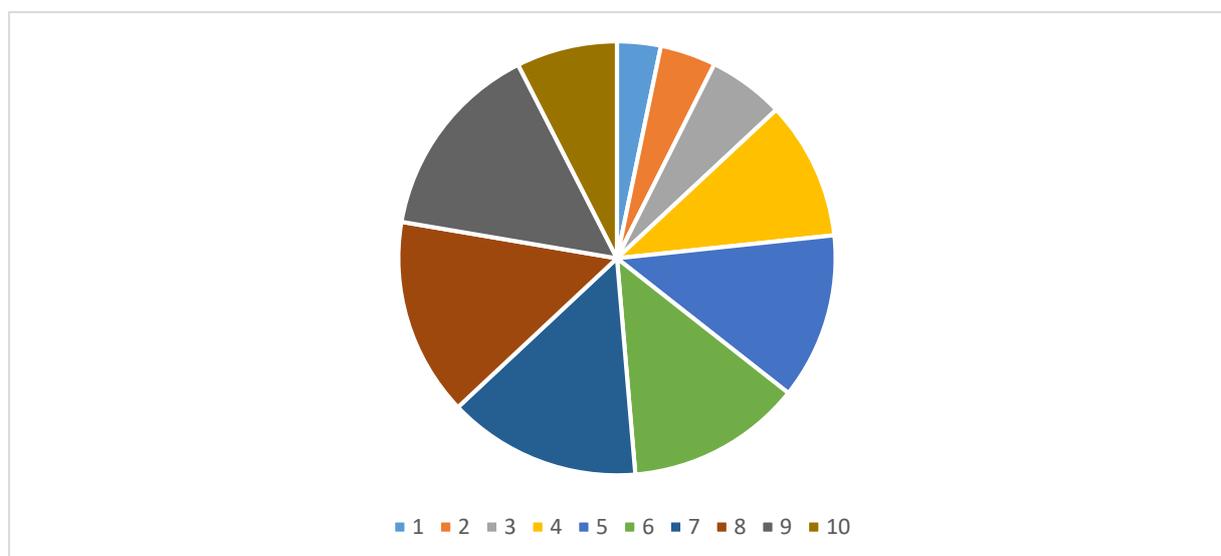


Figure 26 - Distribution de la masse sur les nœuds de 1 à 10

Chapitre II : Analyse et modélisation numérique

Le graphe ci-après présente la distribution des masses (m (tonnes), $Z(m)$) appliquées sur le parement extérieur du barrage (coté amont) :

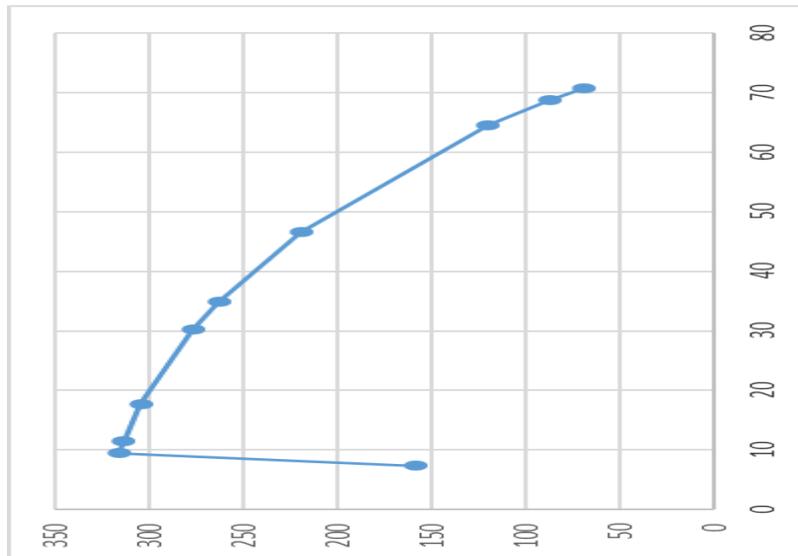


Figure 27 - Le pression d'eau appliquée sur le parement extérieur du barrage (coté amont)

II.5.2.2 Analyse modale du modèle numérique bidimensionnel (Avec retenue)

L'analyse modale a été faite pour le cas de barrage avec retenue (c'est-à-dire en rajoutant les masses ponctuelles calculées sur les points choisis), pour les caractéristiques maximales et minimales des matériaux.

Tableau 7 – Résultats de l'analyse modale en 2D avec retenue

Mode propre	1	2	3	4	5
f_{max} (Hz)	2.76	3.95	4.51	4.92	5.20
T_{max} (s)	0.36	0.25	0.22	0.20	0.19
f_{min} (Hz)	1.33	1.83	2.17	2.34	2.72
T_{min} (s)	0.75	0.54	0.46	0.43	0.37

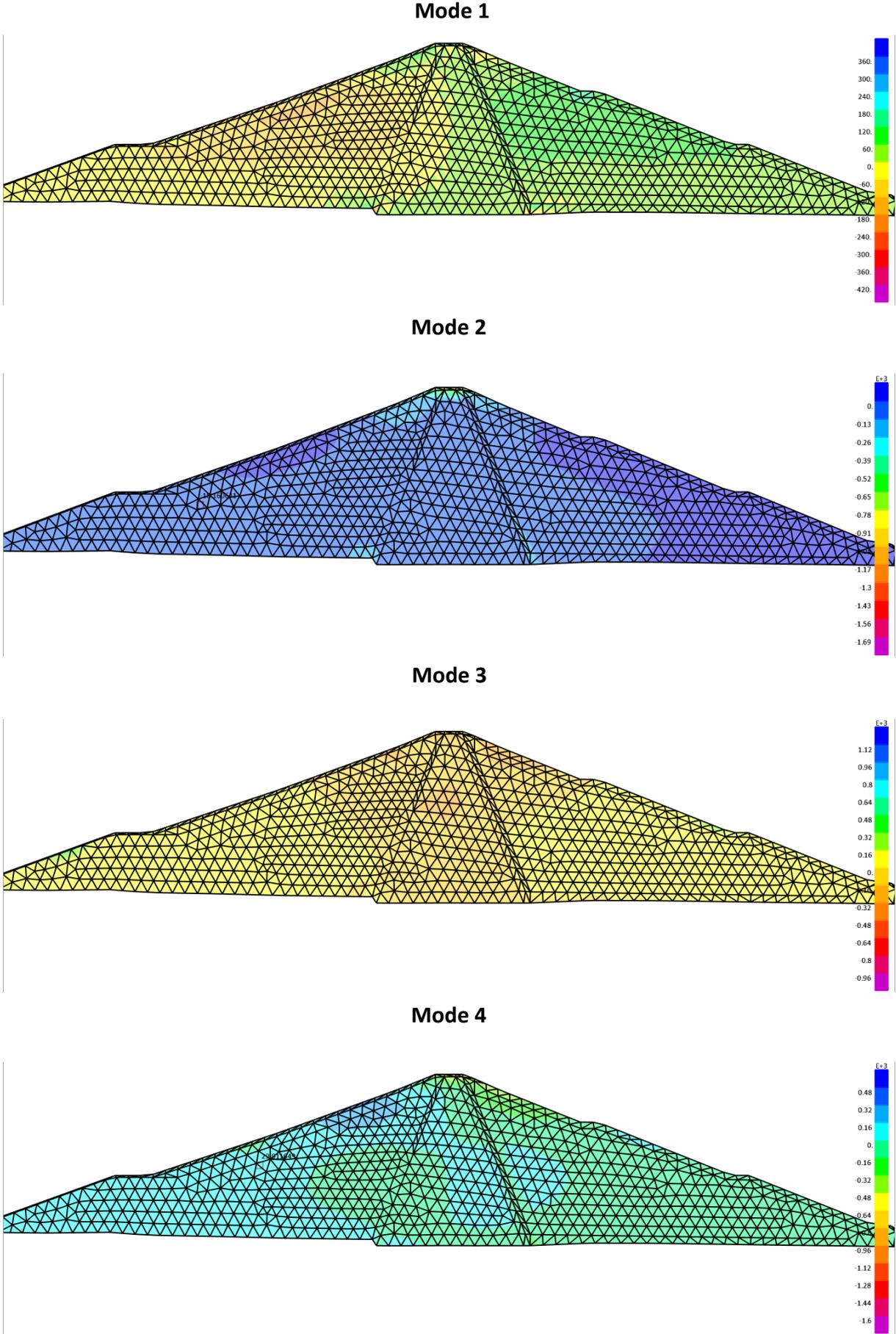


Figure 28 - Les digrammes des efforts modaux

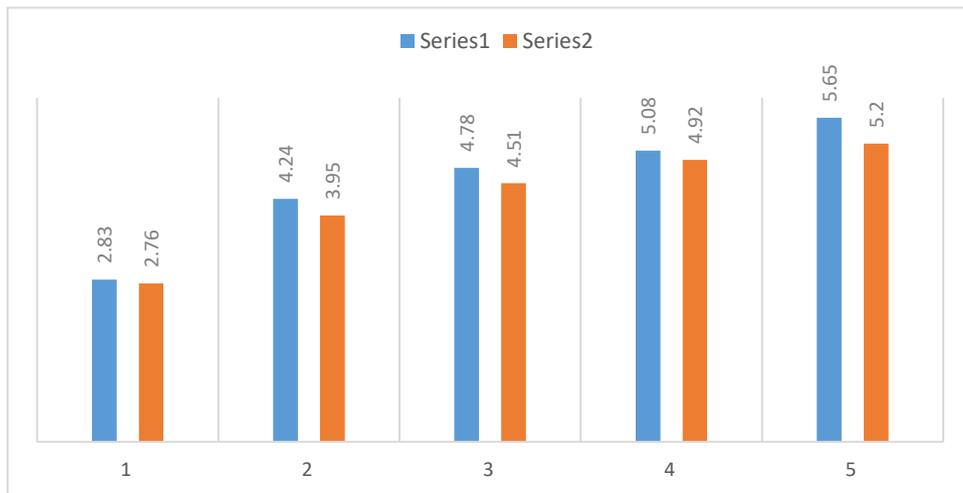
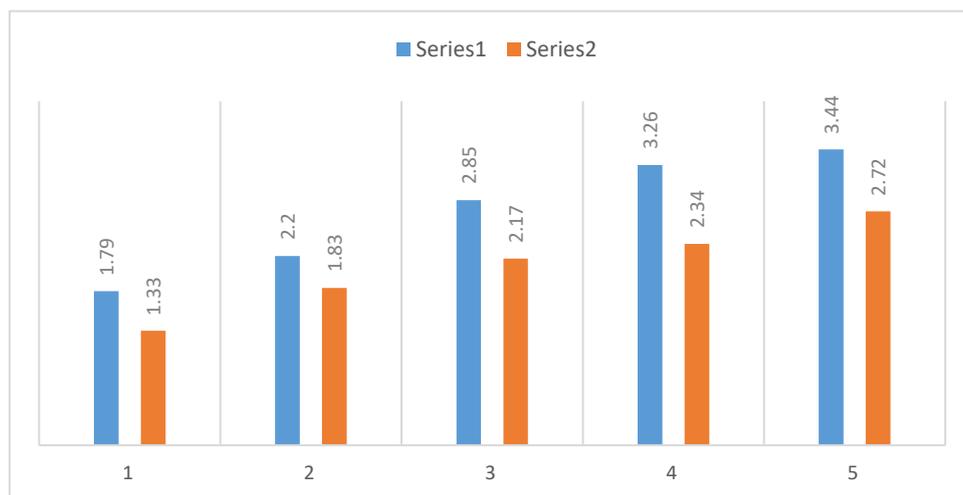


Figure 29 - Comparaison entre les fréquences max sans et avec retenue



Série 1 : Sans retenue

Série 2 : Avec retenue

Figure 30 - Comparaison entre les fréquences min avec et sans retenue

Chapitre II : Analyse et modélisation numérique

❖ Remarques :

Rappelons que les fréquences trouvées avec l'approche simplifiée de Tardieu sont :

Tableau 8 - Fréquences fondamentales calculées par la méthode simplifiée

Fréquences	Sans retenue	Avec retenue
<i>Nmin</i>	1.2 Hz	0.9 Hz
<i>Nmax</i>	2.3 Hz	1.7 Hz

En comparant ces fréquences avec les fréquences du premier mode trouvées par la méthode des éléments finis, la valeur du modèle avec retenue est la plus proche (2.3 et 2.76).

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 fruits amont et aval, et avec un encastrement à la base, ce n'est pas le cas pour barrage de Douera.

Le tableau suivant donne les participations massiques du barrage 2D avec retenue en fonction des modes propres :

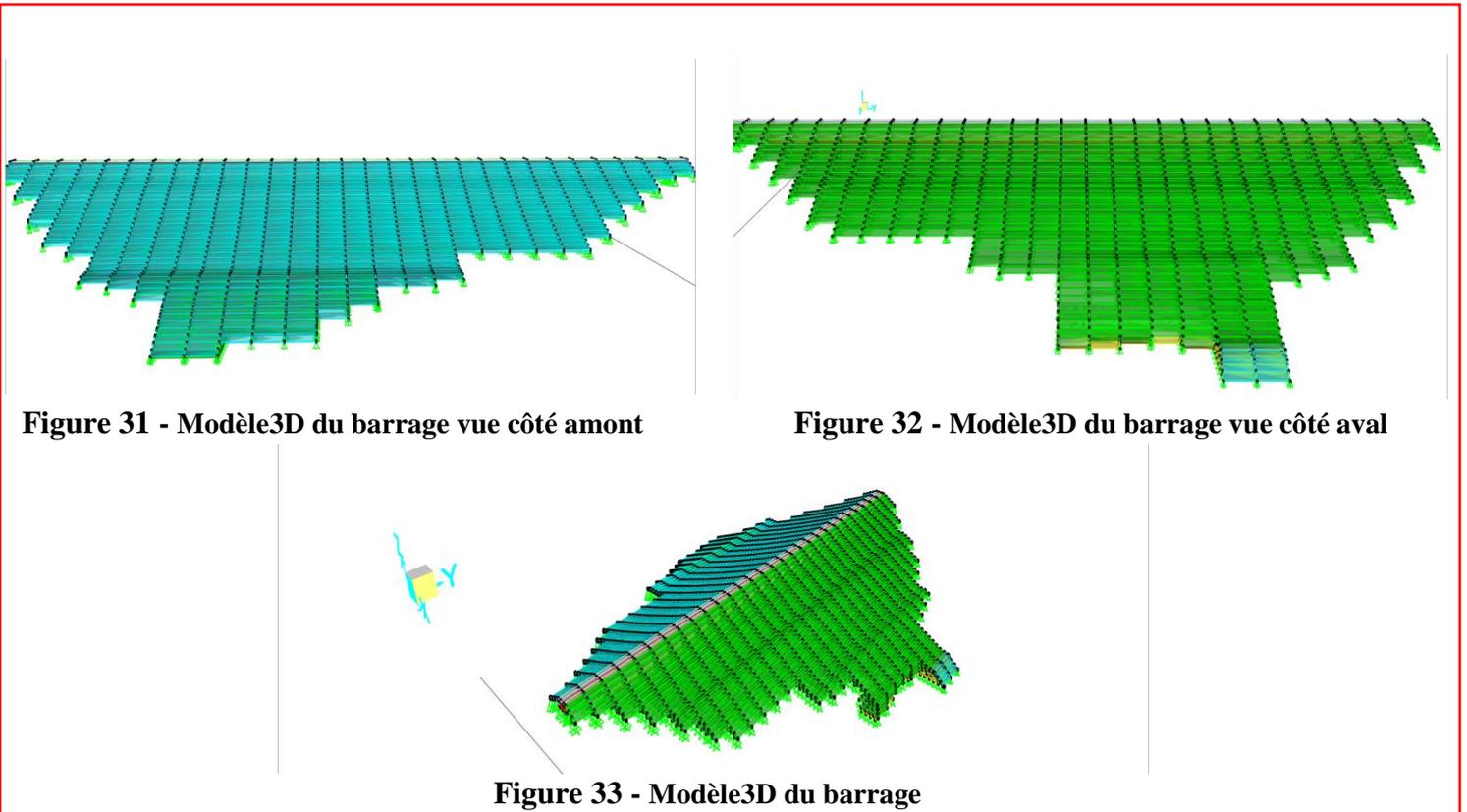
Tableau 9 – Participations massiques du barrage 2D avec retenue

StepType	StepNum	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
Mode	1	0.750402	0.51062	0.50998	0.00225	0.51062	0.50998	0.00225
Mode	2	0.544988	0.01443	0.01439	0.25991	0.52505	0.52436	0.26215
Mode	3	0.461532	0.00006489	0.00006467	0.00022	0.52511	0.52443	0.26237
Mode	4	0.426964	0.01406	0.01388	9.886E-07	0.53918	0.53831	0.26237
Mode	5	0.368293	0.16062	0.16102	0.01173	0.6998	0.69933	0.2741
Mode	6	0.336287	0.00291	0.00296	0.17319	0.7027	0.70229	0.44729
Mode	7	0.326036	0.0089	0.00888	0.00163	0.7116	0.71117	0.44893
Mode	8	0.310514	0.00012	0.00012	0.02326	0.71172	0.71129	0.47218
Mode	9	0.301154	0.03195	0.03201	0.01889	0.74367	0.7433	0.49108
Mode	10	0.280439	0.00036	0.00037	0.01064	0.74403	0.74367	0.50172
Mode	11	0.27088	0.0148	0.01484	0.00087	0.75884	0.75851	0.50259
Mode	12	0.267942	0.00116	0.00116	0.04528	0.76	0.75967	0.54787

II.6 Présentation du Modèle 3D (sans retenue) :

Même si la modélisation en 2D est simple et permet une analyse efficace sur le plan informatique, elle offre une précision réduite. Des résultats plus précis peuvent être obtenus grâce à la modélisation tridimensionnelle. De plus, l'analyse par éléments finis peut être formulée de manière à ce que le système soit linéaire ou non linéaire.

Ce présent modèle comprend 10665 degrés de liberté, et 16714 éléments volumiques. L'élément solide pris est à 6 nœuds (Prisme)



II.6.1 L'Analyse modale du Modèle 3D :

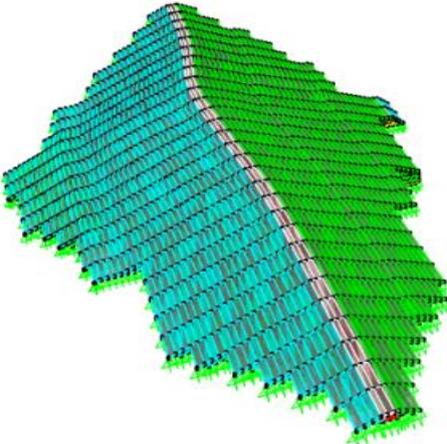
L'étude des propriétés dynamiques de La structures, basée sur la simulation et l'analyse par éléments finis par SAP2000 v22, nous a donné les résultats ci-dessous.

Tableau 10 – Résultats de l'analyse modale en 3D sans retenue

Mode propre	1	2	3	4	5
<i>f</i>max (Hz)	3.94	4.72	5.28	5.61	5.99
<i>T</i>max (Hz)	0.25	0.21	0.19	0.18	0.17
<i>f</i>min (Hz)	1.86	2.23	2.51	2.57	2.74
<i>T</i>min (Hz)	0.54	0.45	0.40	0.39	0.37

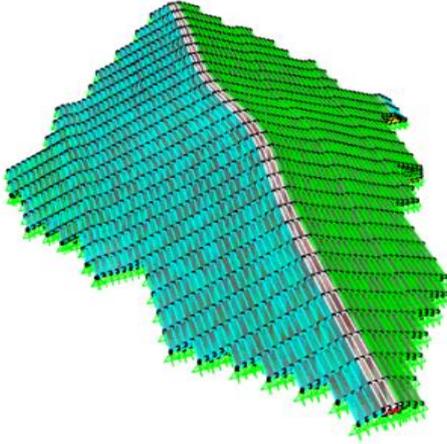
Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 0.25337; f = 3.94664

Mode 1



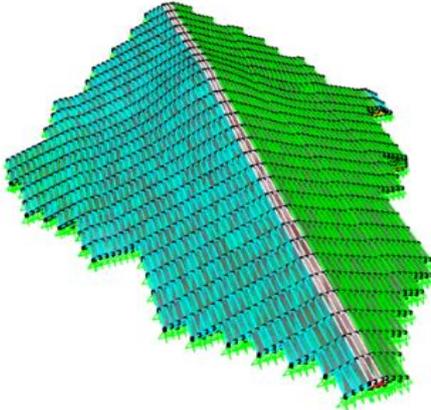
Deformed Shape (MODAL) - Mode 2; T = 0.221175; f = 4.72245

Mode 2



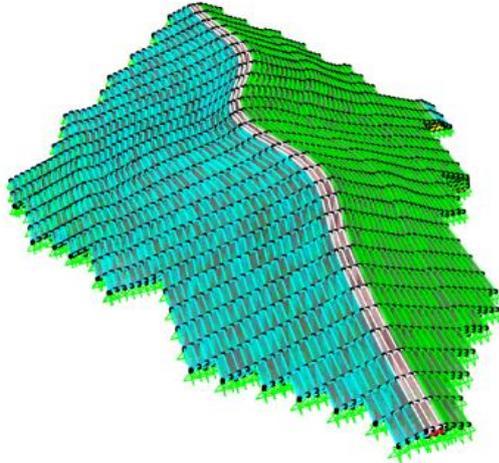
Deformed Shape (MODAL) - Mode 3; T = 0.18922; f = 5.28473

Mode 3



Deformed Shape (MODAL) - Mode 4; T = 0.17794; f = 5.61994

Mode 4



Deformed Shape (MODAL) - Mode 5; T = 0.16692; f = 5.9909

Mode 5

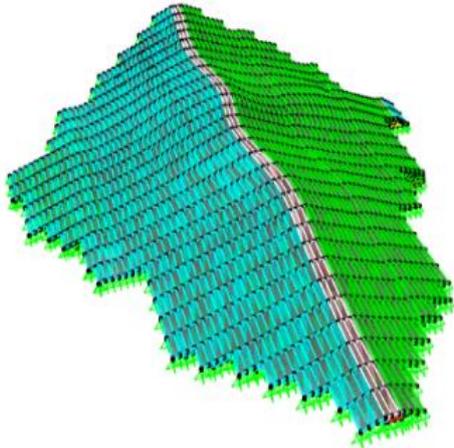


Figure 34 – Déformées modales en 3D sans retenue

II.7 Analyse modale du modèle 3D (Avec retenue) :

L'analyse modale du modèle 3D avec retenue nous a donné les résultats ci-dessous :

Tableau 11 – Résultats de l'analyse modale en 3D avec retenue

<i>mode</i>	<i>fmax (Hz)</i>
1	3.945250
2	4.720674
3	5.281533
4	5.617405
5	5.988071

❖ Remarque :

Pour les deux modèles 3D avec et sans retenue, on remarque une différence légère sur les valeurs de fréquences après le rajout des masses, ce qui peut être expliqué par la dimension élancée dans le sens y, ce n'est pas le cas pour le modèle 2D où on peut observer la différence.

II.8 Correspondance des modes des modèle 2D et 3D (sans retenue)

Ce présent tableau donne la correspondance entre les fréquences des deux modèles, bidimensionnel et tridimensionnel :

Tableau 12 – Comparaison entre les fréquences en 2D et 3D sans retenue

Modèle 2D (sans retenue)		Modèle 3D (sans retenue)	
<i>Mode</i>	<i>f_{max}</i>	<i>Mode</i>	<i>f_{max}</i>
1	2.832752	1	3.946841
2	4.243298	2	4.722451
3	4.778135	3	5.284728
4	5.078756	4	5.619940
5	5.649698	5	5.990898
6	5.728973	6	6.069943
7	6.304077	7	6.180876
8	6.823098	8	6.527239
9	7.201863	9	6.799521
10	7.490661	10	6.897300
11	7.939267	11	7.047432
12	8.277691	12	7.164528

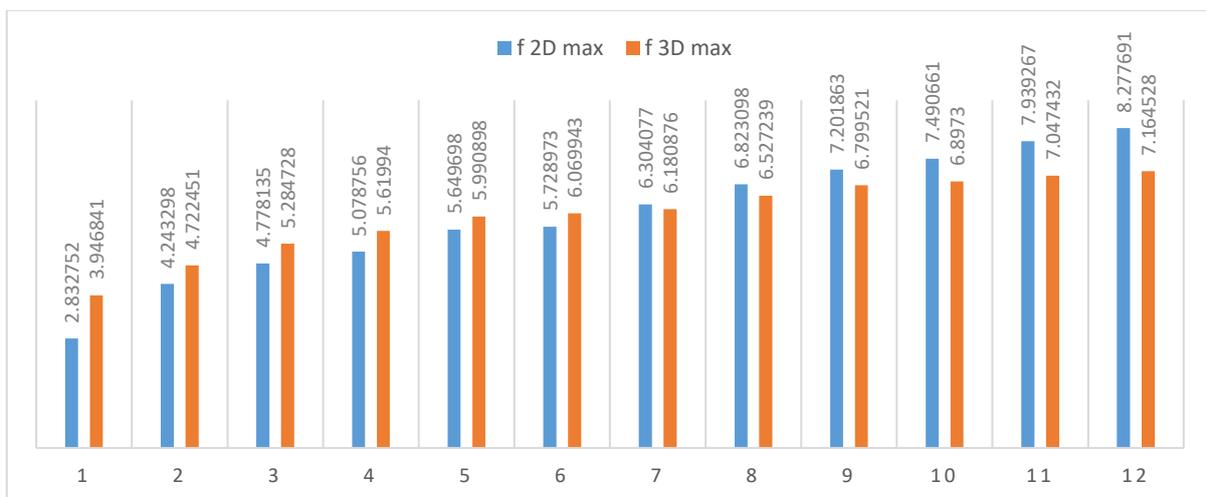


Figure 35 – Comparaison entre les fréquences en 2D et 3D sans retenue

II.9 Conclusion :

Le barrage de Douéra étant un ouvrage révélant un aspect complexe pour la surveillance vibratoire, Pour des raisons de disponibilité de moyens de calcul, nous avons opté pour un modèle 2D relativement simple en termes de calcul tout en simulant avec une bonne précision le comportement dynamique transversal du barrage.

Par la suite, la réalisation du modèle tridimensionnel nous a servi pour la validation du modèle numérique bidimensionnel pris en compte en comparant les fréquences propres de chacun de ses derniers. Cela a été prouvé par la correspondance présente entre les modes propres du modèle 2D et ceux du 3D.

Chapitre III :

Optimisation des emplacements de capteurs par l'algorithme génétique

Chapitre III : Optimisation des emplacements de capteurs par l'algorithme génétique

III.1 Introduction :

Le présent chapitre met en évidence les notions élémentaires relatives aux algorithmes bio-inspirés et les aspects fondamentaux des algorithmes génétiques et présente un problème d'optimisation.

L'optimisation se définit selon Wikipédia : « L'optimisation cherche à modéliser, à analyser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à minimiser ou maximiser une fonction sur un ensemble ».

III.1.1 Objectif de ce chapitre :

Ce chapitre porte sur une méthodologie pour la conception optimale de la disposition des réseaux de capteurs et de systèmes de surveillance de la santé des structures (SHM).

Aujourd'hui, La surveillance de la santé des structures joue un rôle de plus en plus important dans la détection des dommages pour les structures grandes et complexes, afin d'assurer leur entretien et leur durabilité. Le placement optimal des capteurs est essentiel dans la surveillance de la santé structurelle du système car la configuration du capteur a un impact direct sur la qualité des données collectées utilisées pour le diagnostic de la santé structurelle [18].

Par conséquent, ce chapitre présente un examen d'une méthodologie de calcul pour le placement optimal des capteurs.

III.1.2 La formulation du problème :

Après l'élaboration du modèle 3D en élément finis du barrage par le SAP2000 v22, on cherche à placer des capteurs SHM sur ce modèle, ces capteurs SHM doivent être placés de manière optimale afin de détecter avec une grande fiabilité tout dommages structurels avant qu'ils ne deviennent critiques [19].

Ce modèle 3D peut avoir des milliers de Degré de liberté (10655 degrés de liberté pour notre cas), compte tenu de la complexité du barrage, et en ayant un nombre limité de capteurs, on cherche les emplacements qui donnent le maximum d'information.

III.2 Description du problème OSP (Optimal Sensor Placement) :

Étant donné que l'OSP vise principalement à déterminer les degrés de liberté et l'installation des capteurs, l'optimisation du placement des capteurs peut être résumée comme « étant donné un ensemble de n positions candidates, trouver m positions, où $m < n$, qui pourrait maximiser ou minimiser la valeur du critère d'évaluation de la configuration du capteur » [20].

Chapitre III : Optimisation des emplacements de capteurs par l'algorithme génétique

Le problème OSP est ensuite converti en une sorte de problème de combinaison d'optimisation. Le nombre total de toutes les configurations potentielles des capteurs contenant m capteurs peut être obtenu en utilisant la relation (23) :

$$C = \frac{n!}{m!(n-m)!} \quad (23)$$

n : représente le nombre de postes candidats.

m : est le nombre total de capteurs à placer.

Pour la plupart des structures étudiées, C peut être un grand nombre. Par conséquent, une recherche exhaustive sur les configurations potentielles de capteurs pour obtenir l'optimum, la configuration est très coûteuse en calcul même pour les modèles en élément finis avec un nombre relativement faible de degrés de liberté.

III.2.1 Critère d'évaluation :

Comme mentionné dans la section « Description du problème OSP » la plupart des études OSP visent principalement à placer les capteurs sur les positions candidates. Pendant le placement du capteur ou l'optimisation de la position du capteur, un critère d'évaluation est requis.

Cette étude résume certains critères utilisés, y compris le critère d'assurance modale (MAC) [21] matrice d'informations de Fisher (FIM) [22], informations entropie (IE) [23], ASCE effective résidu de point de conduite de l'indépendance (EFI-DPR) [24]. et les critères énergétiques.

III.2.1.1 Le critère d'assurance modale (MAC) :

MAC: Carne Et Dohrmann [25] ont tenté de déterminer les emplacements des capteurs pour garantir que tous les produits intérieurs entre les vecteurs de forme ont des cosinus relativement petits, où les vecteurs de forme sont facilement reconnaissables.

Par conséquent, ils ont utilisé le MAC [26] [27] couramment utilisé pour évaluer le cosinus carré entre les vecteurs de forme comme suit :

$$MAC = \frac{(\Phi_i^T \Phi_j)^2}{\Phi_i^T \Phi_j \Phi_j^T \Phi_i} \quad (24)$$

où Φ_i et Φ_j représentent les i ème et j ème vecteurs colonne dans la matrice Φ , respectivement, et l'exposant T désigne la transposition du vecteur.

Dans l'équation (3), les valeurs des éléments dans le MAC sont entre 0 et 1, où 0 indique que peu ou pas de corrélation existe entre l'élément diagonal $MAC_{i,j}$ ($i \neq j$) (c'est-à-dire le vecteur

Chapitre III : Optimisation des emplacements de capteurs par l'algorithme génétique

modal facilement reconnaissable) et les autres éléments de la ligne, et 1 indique un degré élevé de similitude entre les vecteurs modaux (c'est-à-dire le vecteur modal assez indiscernable).

En conséquence, la fonction objective peut être formulée comme suit :

$$fitness = \sqrt{\sum MAC_{i,j}} \text{ avec } i \neq j \quad (25)$$

III.2.1.2 La matrice d'informations de Fisher (FIM) :

Liée aux informations stockées dans la réponse mesurée, résulte de la minimisation de la matrice de covariance de l'erreur estimée pour un estimateur sans biais efficace du point de vue statistique. [28]

La FIM peut être obtenue en utilisant les équations (5)

$$FIM_i = \varphi^{iT} \varphi^i = \sum_{j=1}^s Q_j^2 \dots (26)$$

où φ^i désigne le vecteur de déplacement associé au i ème degré de liberté.

Q_j Représente le déplacement du j ème mode.

La procédure d'utilisation de FIM pour optimiser le placement du capteur consiste à désélectionner les emplacements pour maximiser FIM [29] [30].

III.2.1.3 L'Entropie des Informations :

Afin d'estimer avec précision les paramètres du modèle pour la détection des dommages structurels, la qualité des informations collectées des capteurs installés doit être garantie. Comme IE [31] est efficace pour quantifier les incertitudes des paramètres, Papa Dimitriou et al [32] ont utilisé IE comme mesure de minimisation de l'incertitude dans l'estimation des paramètres du modèle lors de l'optimisation le placement des capteurs [33].

*Fonction exprimant le principe de la dégradation de l'énergie ; processus exprimé par cette fonction.

III.2.1.4 Driving-point residue EFI-DPR:

L'entropie des informations fournit une estimation linéaire de l'indépendance des modes cibles et est efficace en termes de calcul. Cependant, les positions de capteur qui ont une faible énergie peut être choisie, ce qui entraîne une réduction, qui pondère les indices EI.

III.2.1.5 Les critères énergétiques :

Il existe également d'autres évaluation des critères basés sur l'énergie pour la configuration du capteur. Un critère couramment utilisé est l'énergie modale de déformation (MSE), qui aide

Chapitre III : Optimisation des emplacements de capteurs par l'algorithme génétique

à sélectionner les positions des capteurs avec de grandes amplitudes possibles. Ça peut être utilisé pour augmenter le rapport signal / bruit qui est important dans des situations réelles.

III.3 Méthodologies d'optimisation :

Plusieurs méthodologies d'optimisation sont disponibles pour la détermination de la configuration du capteur.

III.3.1 Méthodologies d'optimisation évolutives :

Des algorithmes évolutifs, basés sur un principe puissant d'évolution (c'est-à-dire la survie du plus apte), constituent une catégorie critique de la recherche heuristique [34].

Des algorithmes évolutionnaires ont été couramment utilisés en science et en ingénierie pour aborder des problèmes complexes, tels que le problème de placement des capteurs.

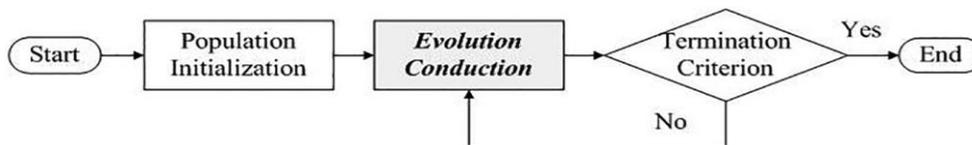


Figure 36 – Illustration des procédures dans les algorithmes

III.3.1.1 Algorithme génétique :

Parmi les algorithmes évolutionnaires, l'algorithme génétique (AG) est le plus largement appliqué dans les problèmes de l'ingénierie [35]. Le GA a été introduit pour la première fois en 1975 [36] [37], et a été inspiré par le mécanisme de l'évolution naturelle [38].

L'algorithme commence généralement par l'initialisation d'une population avec un certain nombre de solutions (c'est-à-dire les chromosomes codés), puis l'évolution du comportement basés sur des opérateurs génétiques, y compris la sélection, le croisement et la mutation.

III.3.1.1.1 Aspects de l'algorithme génétique :

Les trois aspects les plus importants de l'utilisation d'un algorithme génétique sont [39] :

1-La mise en œuvre de la représentation génétique :

Les algorithmes génétiques emploient un vocabulaire emprunté à la génétique naturelle. Ils travaillent sur un ensemble d'individus appelé population « i ».

Chapitre III : Optimisation des emplacements de capteurs par l'algorithme génétique

- Un individu : est représenté par des chromosomes (génome), et chaque chromosome est représenté par une chaîne de gènes.
- Un chromosome : Il est formé de gènes disposés en une succession linéaire et chaque gène peut prendre plusieurs valeurs appelées allèles.

Par exemple, un chromosome se compose d'une succession de 0 et de 1 (c.-à-d. une chaîne binaire), et la valeur pour une certaine position correspond à « on » (la valeur = 1) ou à « off » (la valeur = 0) d'un certain dispositif.

- Population : Un ensemble des individus ;
- Environnement : L'espace de recherche ;

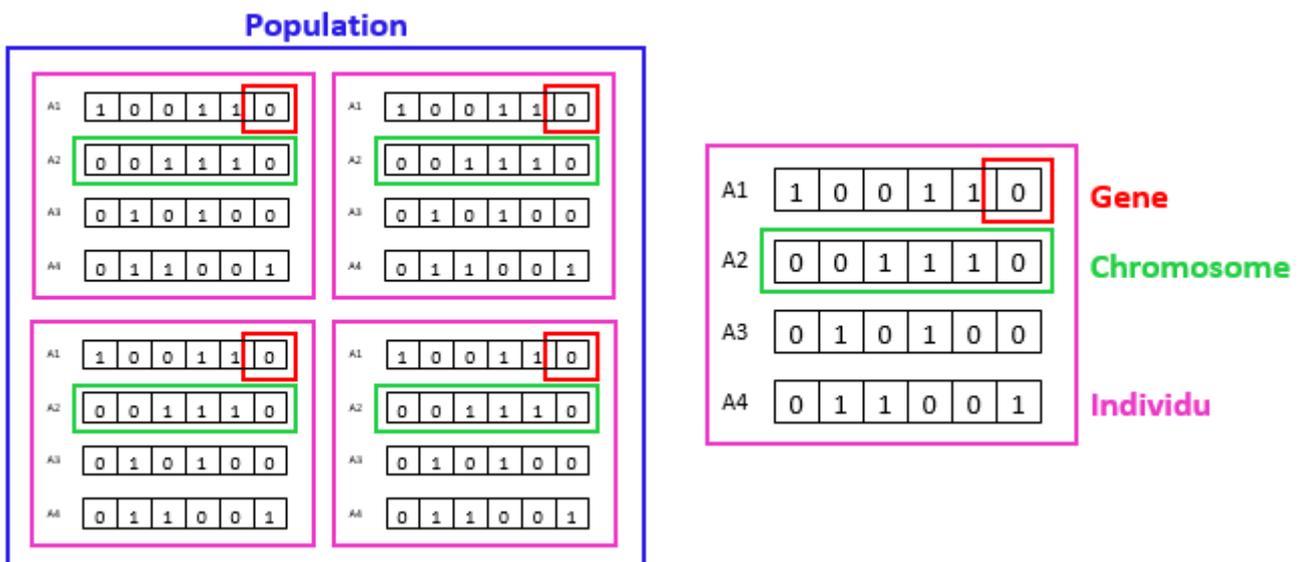


Figure 37 – Représentation d'une population génétique

2-La définition de la fonction « Objectif » :

Chaque individu a une fonction Objectif « f » dite fonction fitness, qui mesure l'adaptation de l'individu à son environnement local. C'est la fonction que nous cherchons à minimiser.

3- La mise en œuvre des opérateurs génétiques :

Un algorithme génétique simple utilise les trois opérateurs suivants :

• La sélection :

C'est un processus dans lequel des individus d'une population sont choisis selon les valeurs de leur fonction coût ou « fitness » pour former une nouvelle population. Les individus évoluent

Chapitre III : Optimisation des emplacements de capteurs par l'algorithme génétique

par des itérations successives de la sélection, appelées *générations*. Chaque individu est sélectionné proportionnellement à sa fonction « fitness », donc, un individu avec une fonction « fitness » plus basse aura plus de chance d'être sélectionné qu'un autre avec une valeur de « fitness » supérieure.

- **Le croisement :**

Le croisement est un opérateur de recombinaison. Les individus d'une population sont couplés au hasard par paires représentant les parents. Chaque paire d'individus subit le croisement décrit comme suit :

Le croisement opère sur les génotypes (c.-à-d. les chromosomes) de deux individus appelés parents.

Il produit de nouveaux individus (généralement deux) appelés enfants dont les gènes sont hérités de l'un ou/et de l'autre parent.

Ceci peut être fait en dédoublant chacun des deux chromosomes dans des fragments et en les recombinant pour former de nouveaux chromosomes.

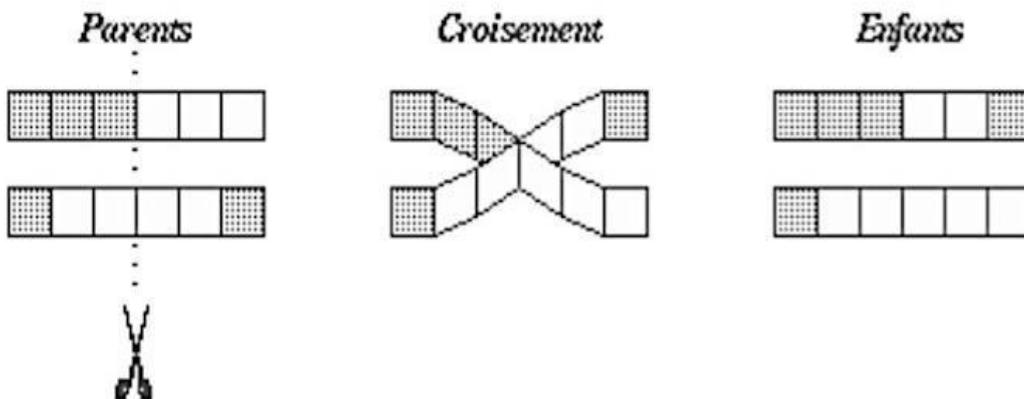


Figure 38 – L'opération de croisement

- **La mutation :**

La mutation opère sur le génotype d'un seul individu. Son rôle est de modifier aléatoirement, avec une certaine probabilité, la valeur d'un composant de l'individu.

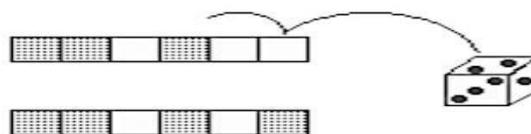


Figure 39 – Opérateur de mutation

Chapitre III : Optimisation des emplacements de capteurs par l'algorithme génétique

La mutation est traditionnellement considérée comme un opérateur marginal bien qu'elle confère en quelque sorte aux algorithmes génétiques la propriété d'ergodicité (i.e. tous les points de l'espace de recherche peuvent être atteints). Cet opérateur est donc d'une grande importance. Il a de fait un double rôle : celui d'effectuer une recherche locale et/ou de sortir d'une trappe (recherche éloignée).

III.4 Les capteurs :

Les systèmes d'acquisition modernes en dynamique des structures n'ont réellement commencé qu'avec l'apparition des accéléromètres dans les années 50. Ces derniers sont aujourd'hui majoritairement employés dans les mesures de vibrations [40].

L'objectif des capteurs est de transformer une vibration mécanique en un signal électrique.

Les capteurs de vibration utilisés peuvent être actifs, ne nécessitant aucune alimentation et ne pouvant fonctionner qu'avec une source d'énergie auxiliaire.

1-Les capteurs piézoélectriques:

Ces capteurs peuvent être intégrés dans les vis, afin de vérifier le serrage des structures.

2-Les capteurs à fibre optique:

Les capteurs à fibre optique, que l'on peut également appeler capteurs de type réseaux de Bragg sont un petit segment de fibre optique dont le cœur est fait de silice dopé au germanium.

3-Les capteurs électromagnétiques:

Les capteurs électromagnétiques sont utilisés pour surveiller le stress, le magnétisme des câbles de pont.

III.5 L'application sur le modèle :

III.5.1 La conception de l'algorithme génétique :

Le problème posé consiste à optimiser les emplacements de capteurs, pour ce faire et en se basant sur les approches théoriques données ci-dessus, on a construit un algorithme pour le modèle du barrage.

Cet algorithme comprend un certain nombre de paramètres définis ci-dessous :

Le chromosome : c'est l'emplacement d'un capteur associé à une des trois directions de l'espace (1DDL)

L'individu : Un individu est composé de N nombre de points (chaque point est l'emplacement d'un capteur) chaque point constitue un chromosome. Et le nombre de chromosome par individu peut varier d'un individu a un autre.

La population : C'est un l'ensemble des individus d'une génération.

Le croisement des individus : pour croiser un individu i avec un individu j on prend l'ensemble de tous les points constituant les deux individus et on prend aléatoirement en évitant toute répétitions, un sous ensemble dont la taille est comprise entre celle des deux individus.

Exemple :

$A = [901, 332, 279, 562]$

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

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

Ou bien :

$(A \times B) = [332, 901, 436, 279, 947], \dots \text{ etc}$

La Mutation génétique : On distingue trois types de mutation :

- Mutation en changeant un chromosome aléatoirement a un individu:

Exemple :

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

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

- Mutation en enlevant un chromosome aléatoirement a un individu :

Exemple :

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

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

Chapitre III : Optimisation des emplacements de capteurs par l'algorithme génétique

- Mutation en rajoutant un chromosome aléatoirement a un individu :

Exemple :

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

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

La Fonction objective:

Le terme « fonction objectif » désigne une fonction qui sert de critère pour déterminer la meilleure solution à un problème d'optimisation. Concrètement, elle associe une valeur à un problème d'optimisation. Le but du problème d'optimisation est alors de minimiser ou de maximiser cette fonction jusqu'à l'optimum [41].

Par conséquent, la fonction objective peut être formulée en utilisant la racine carrée de la somme des carrés des éléments non diagonaux de la matrice MAC (3). Qui est représenté comme suit :

$$fitness = \sqrt{\sum_{i \neq j} MAC_{i,j}^2} \text{ avec } i \neq j \dots (27)$$

Cette fonction a été minimisée c'est-à-dire que plus cette fonction objective d'un individu est faible plus on le considère de meilleure qualité, on considérants la contrainte de maximiser l'information avec un minimum de capteur

❖ La première réduction (le choix des points candidats) :

Compte tenu des contraintes d'accessibilité, on sélectionne sur ce modèle des points en surface les plus accessibles. (Comme montré ci-dessous)

La figure ci-dessous représente les points candidats qu'on a pris en compte. Au départ nous avons 210 (en noir) points surfaciques sélectionnés pour une première réduction, il est préférable de prendre des points de l'ouvrage qui sont facilement accessibles comme montré ci-dessous :

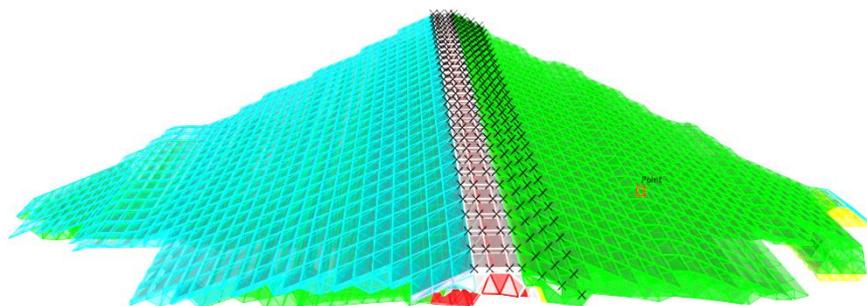


Figure 40 – Les points candidats choisis dur le modèle

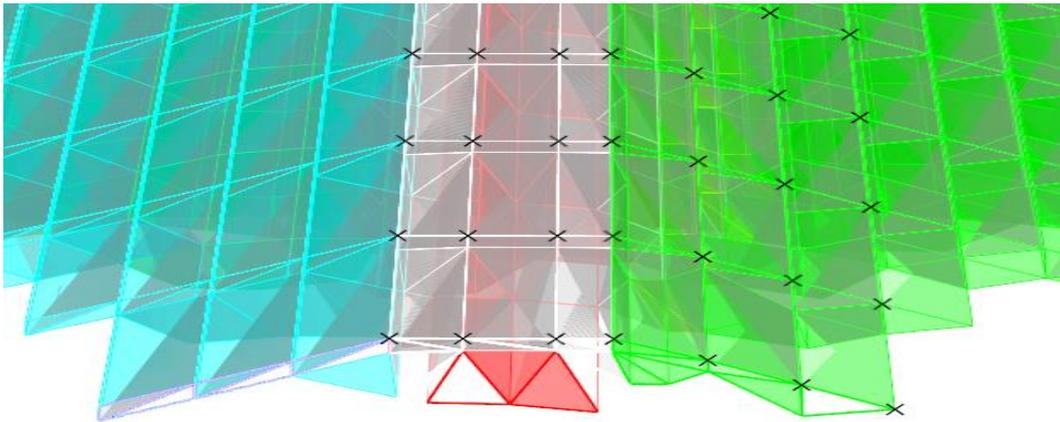


Figure 41 – L'emplacement des points candidats choisis

❖ **La deuxième réduction :**

Cette étape consiste à réduire le nombre de degrés de liberté en calculant l'information de Fisher (FIM) [42] associée à chacun des degrés de libertés pris individuellement dont l'expression est donnée par l'équation [43]

$$\varphi^i = \varphi^{iT} \varphi^i \dots (28)$$

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

❖ **Résultats et évaluations :**

• **Cas 1 :**

Pour un premier cas de figure, on a opté pour 30 milles générations (c.-à-d. 30 milles boucles), tout en traçant une courbe d'évolution du nombre de capteurs en fonction de cette dernière, le nombre de capteur trouvé est de 50 capteurs à placer (27 selon x, 23 selon z et 0 selon y).

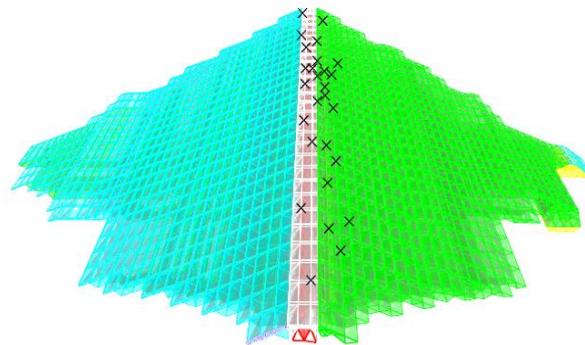
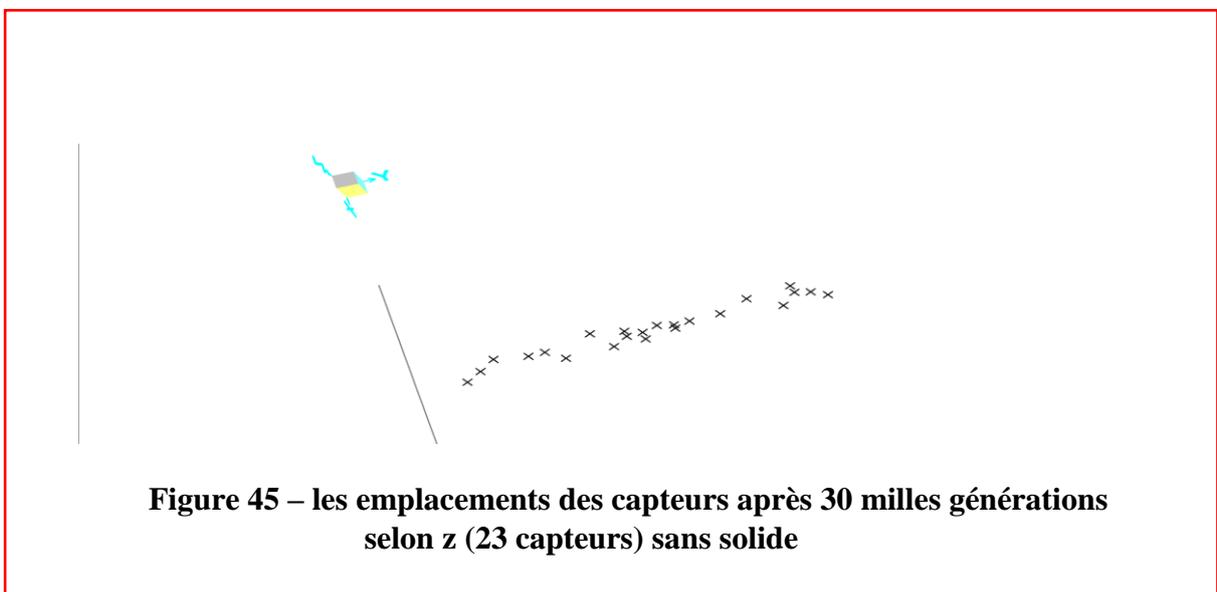
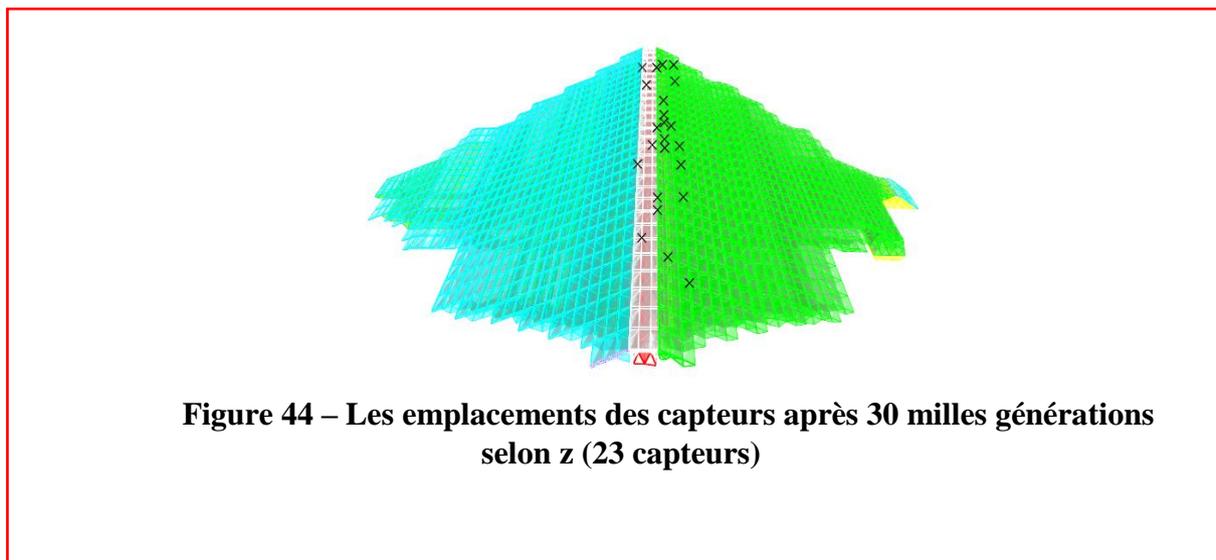
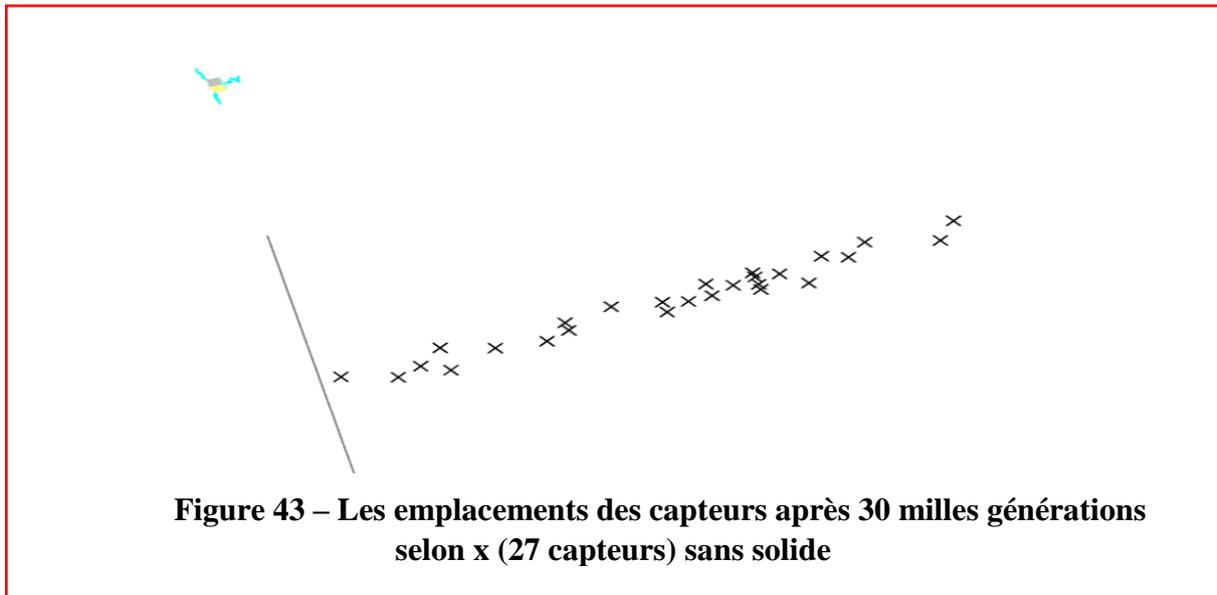


Figure 42 – Les emplacements des capteurs après 30 milles générations selon x (27 capteurs)



Chapitre III : Optimisation des emplacements de capteurs par l'algorithme génétique

Remarques :

- Après 30 milles générations, le programme a donné 50 capteurs à placer comme montré ci-dessus.
- La courbe présentée n'est pas stable ce qui signifie qu'on a besoin d'encore plus de générations pour la convergence, le nombre de capteurs n'est pas encore optimale.
- On constate que les capteurs sont en général entreposés en groupes.

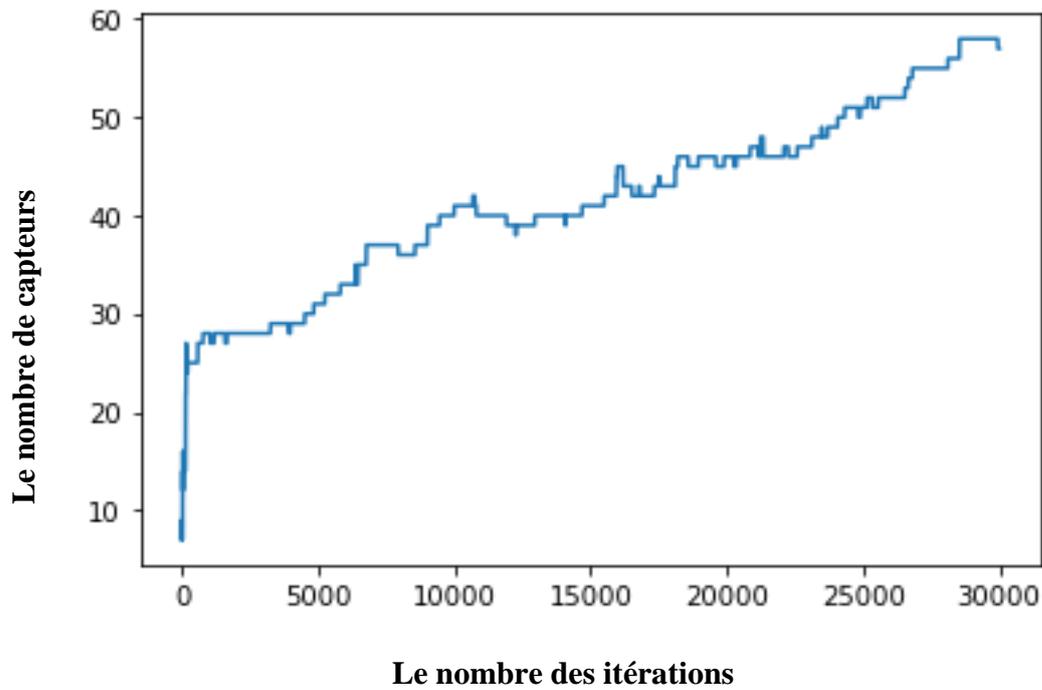


Figure 46 – La courbe donnant le nombre de capteur en fonction des générations (1^{er} cas)

Chapitre III : Optimisation des emplacements de capteurs par l'algorithme génétique

- **Cas 2 :**

Pour un deuxième cas de figure, comme le premier test n'a pas convergé, on a augmenté le nombre de générations tout en gardant la même sélection des points candidats, en prenant 90 milles générations le meilleur individu donne 59 capteurs :

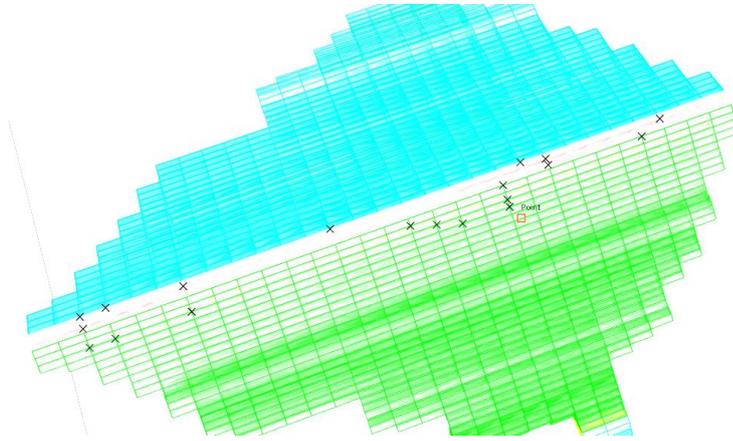


Figure 47 – les emplacements des capteurs après 90 milles générations selon x (19 capteurs)

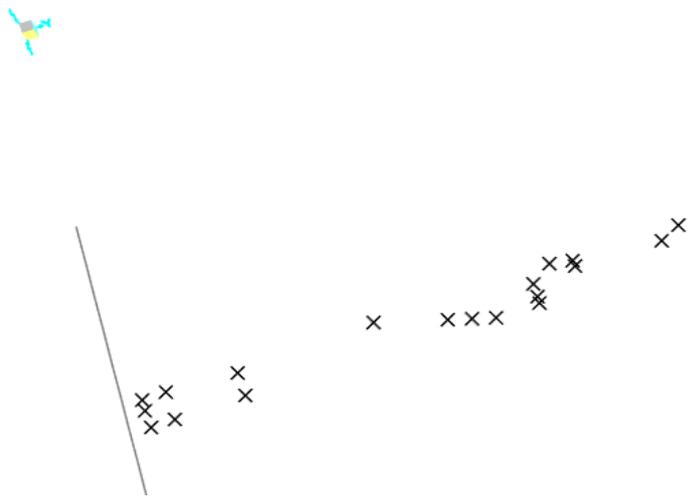
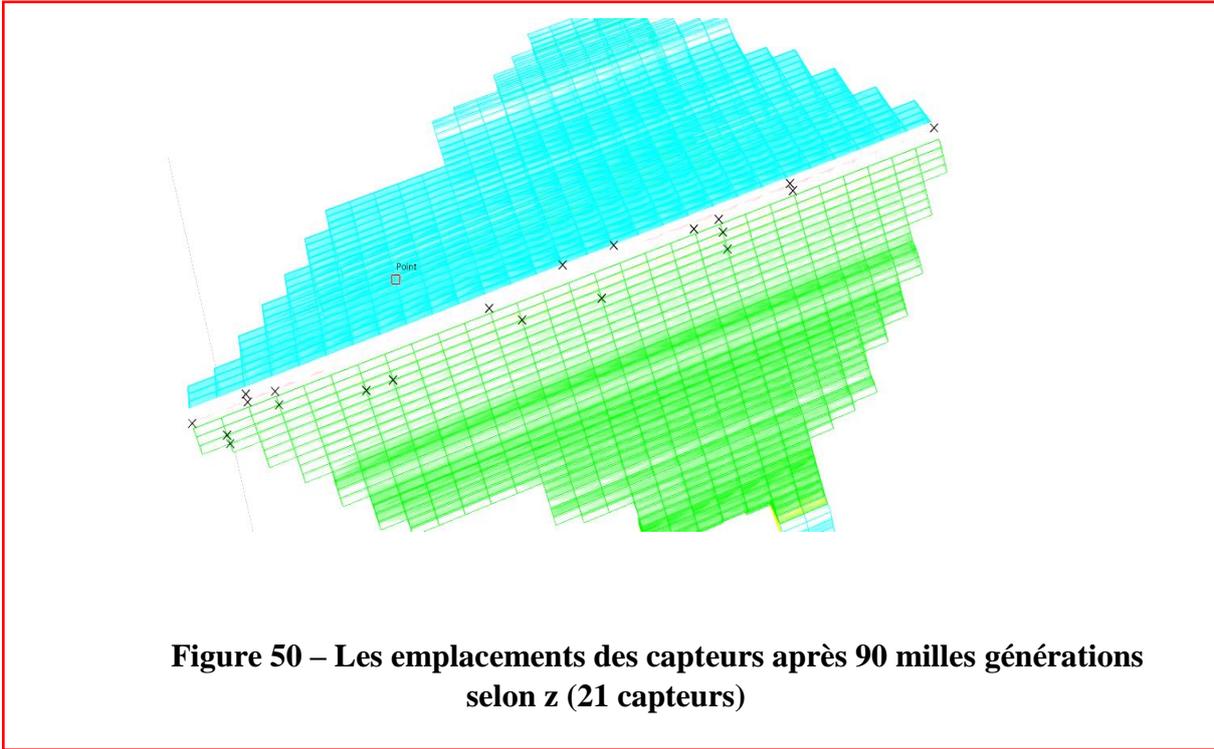
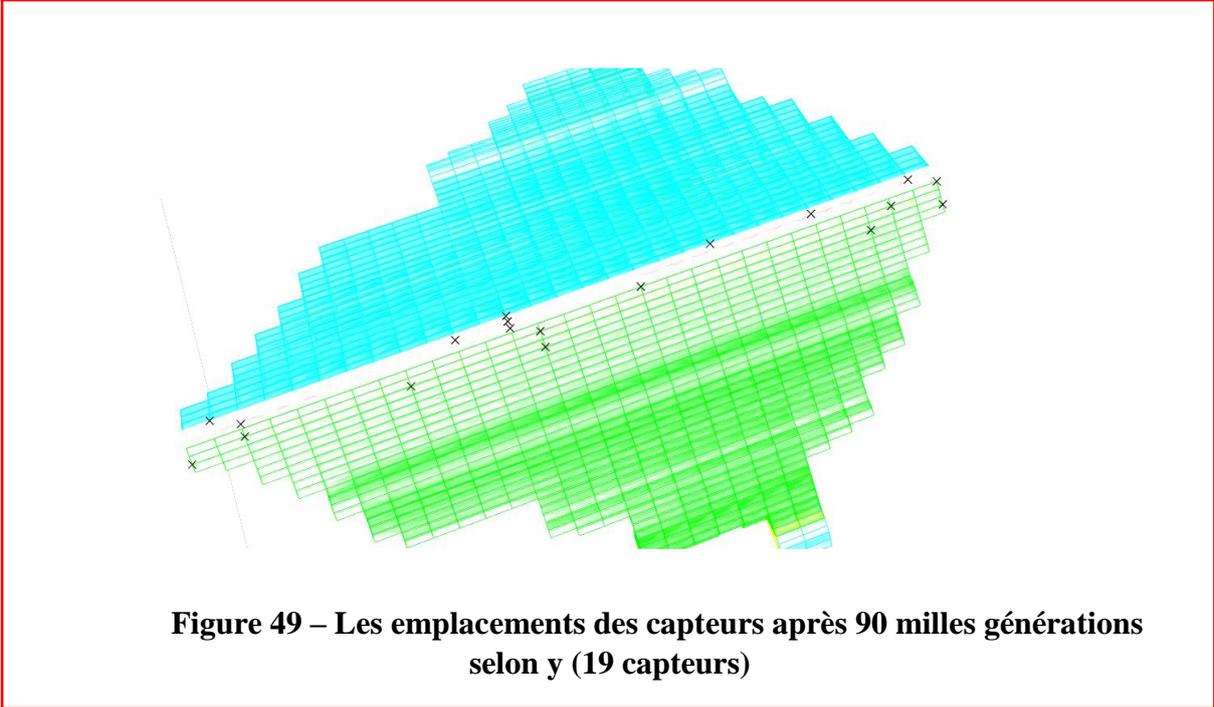


Figure 48 – Les emplacements des capteurs après 90 milles générations selon x (19 capteurs) sans solide



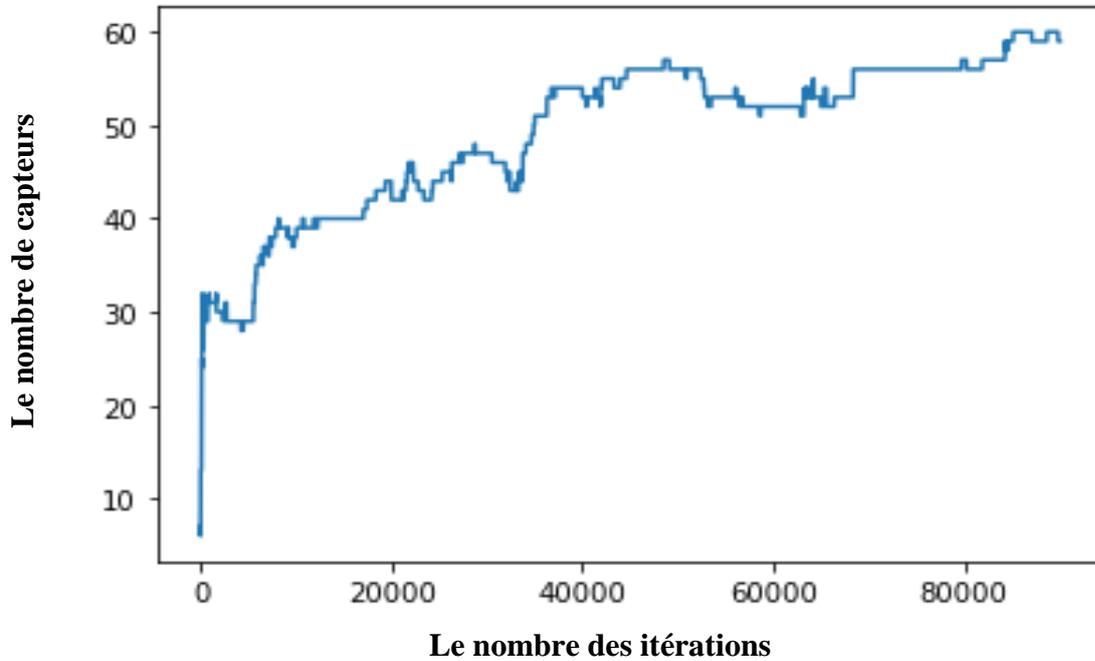


Figure 51 – La courbe donnant le nombre de capteur en fonction des générations (2^{eme} cas)

Remarques :

- Après 90 milles générations, le programme a donné 59 capteurs à placer de façon optimal, comme montré ci-dessus.
- La courbe présentée tend à devenir stable, mais ça nécessite toujours une optimisation.

• **Cas 3 :**

Le troisième cas, comme les deux premiers cas n'a pas atteint la convergence, meme processus de génération a été adapté, en prenant 150 milles générations le meilleur individu donne 99 capteurs :

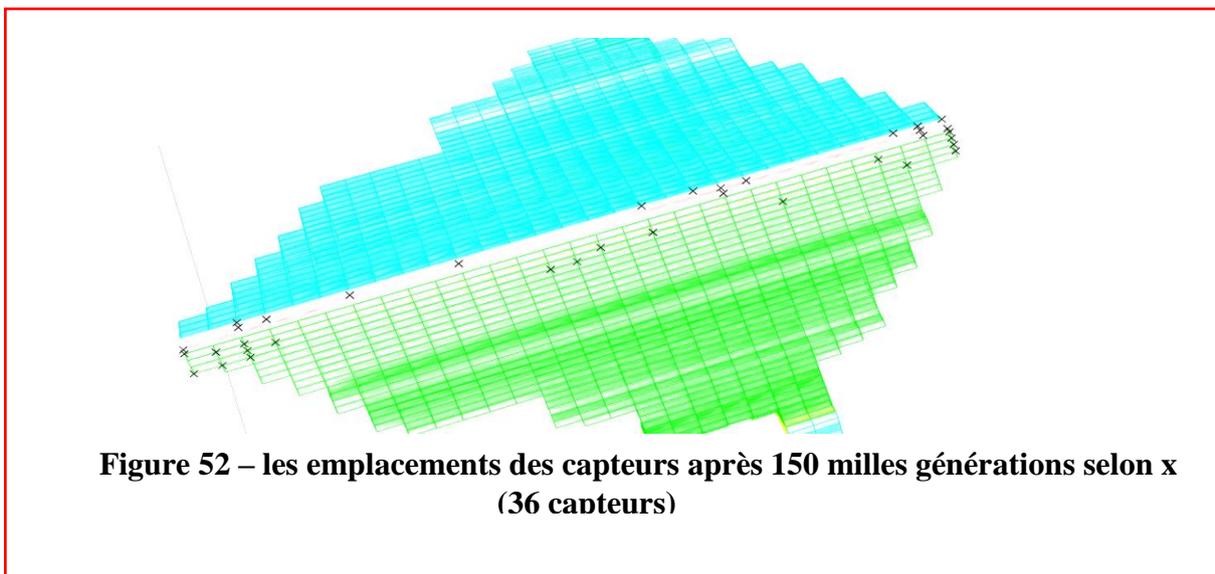
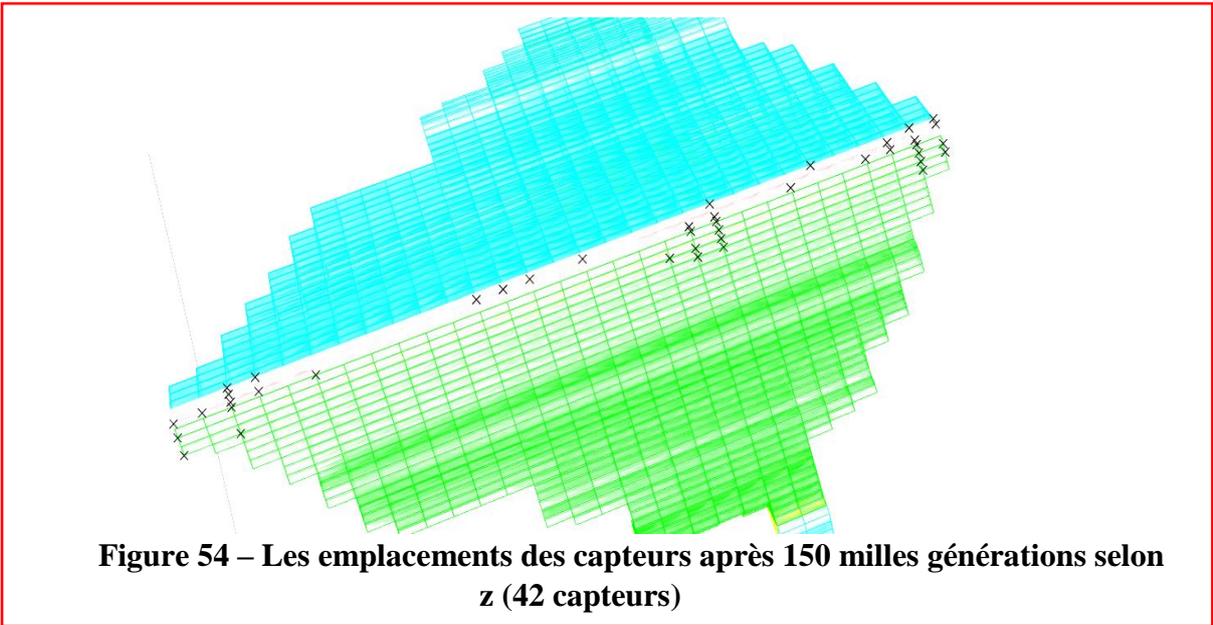
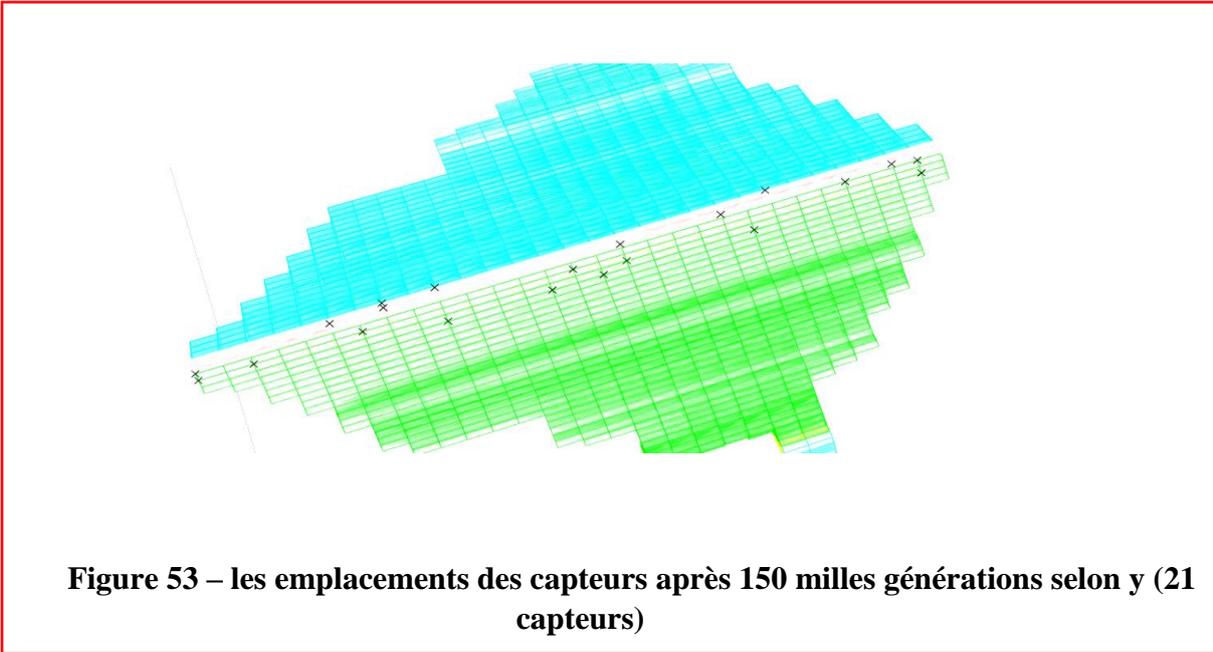


Figure 52 – les emplacements des capteurs après 150 milles générations selon x (36 capteurs)



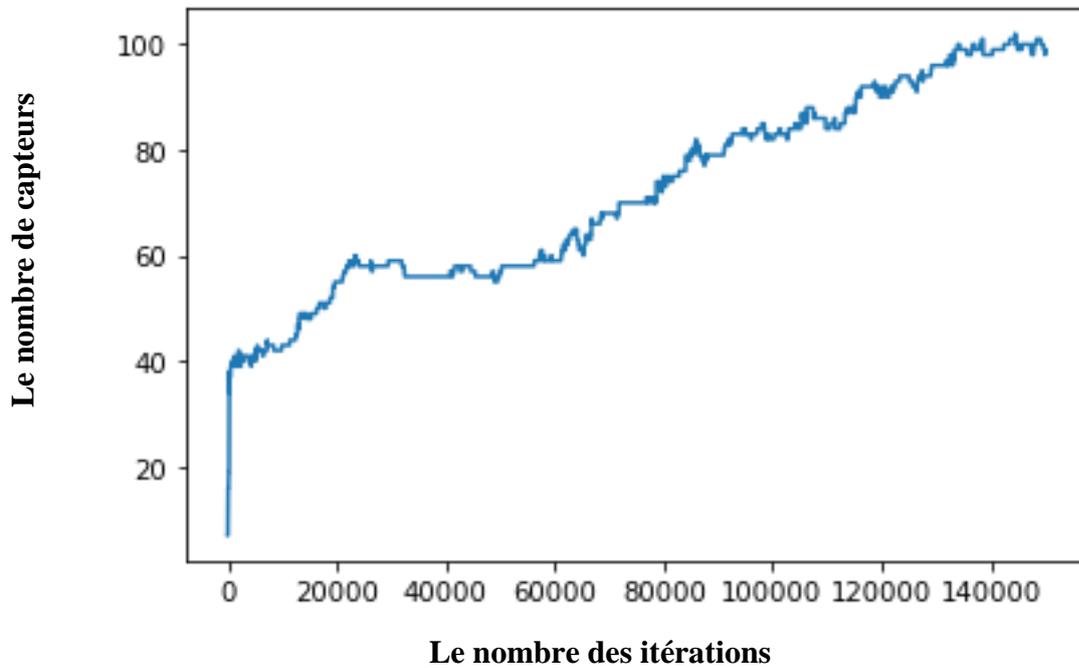


Figure 55 – La courbe donnant le nombre de capteur en fonction des générations (3^{eme} cas)

Remarques :

- Après 150 milles générations, le programme a donné 99 capteurs à placer, comme montré ci-dessus.
- Le processus peut toujours être plus optimale, puisque la courbe n'est pas encore stable

• **Cas 4:**

Les points candidats sont pris de telle sorte à ne pas prendre uniquement les points situés sur la crête.

Ces points sont présentés ci-dessus :

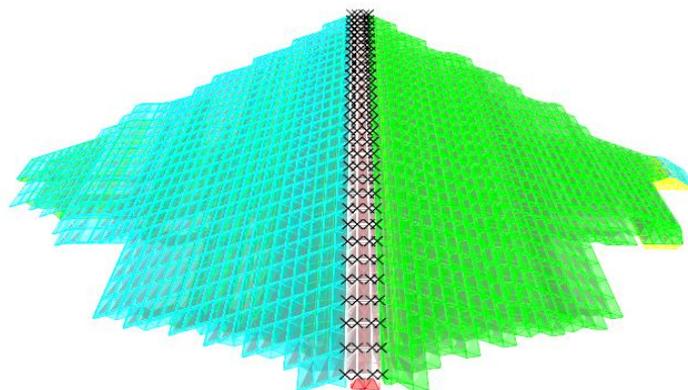


Figure 56 – Les points candidats sur la crête

Chapitre III : Optimisation des emplacements de capteurs par l'algorithme génétique

Après 80 000 générations, le processus n'a pas convergé à un nombre limité de capteurs.

Ce graphe présente l'évolution du nombre de capteur en fonction du nombre de génération.

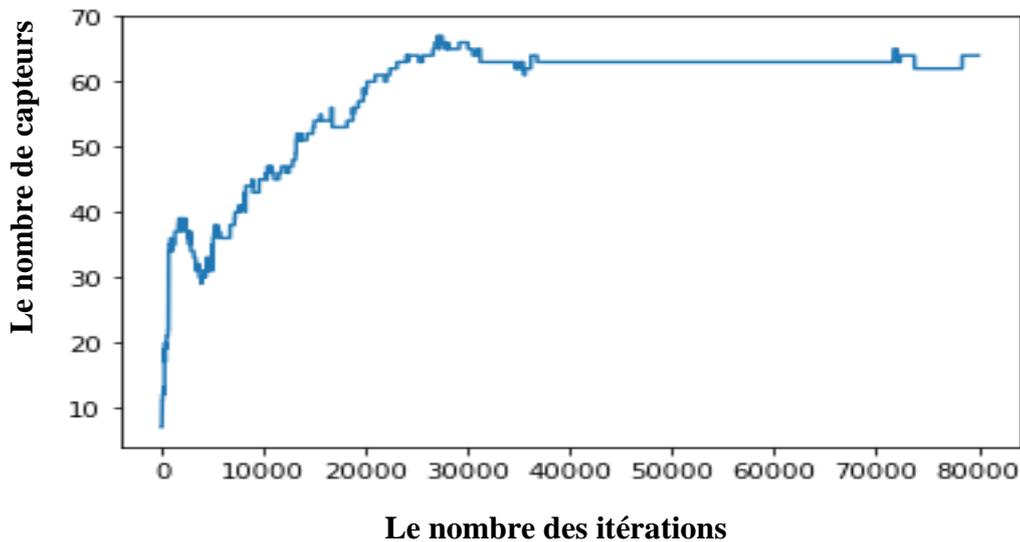


Figure 57 – La courbe donnant le nombre de capteur en fonction des générations (4^{ème} cas)

Remarques :

- Cet algorithme génétique ne converge pas à un nombre limité de capteurs, car il n'est pas adapté à ce type de structures.
- Il est préférable d'adopter une autre méthode d'application, pour avoir de meilleurs résultats.
- On a décidé de changer sur la structure de l'algorithme et fixer un nombre de capteur à mettre en place, voire la non convergence du processus.

Le nombre est de capteur à 30 capteurs.

• Cas 1 :

Les points candidats :

On a opté pour le premier cas de ne pas prendre l'intégralité des points.

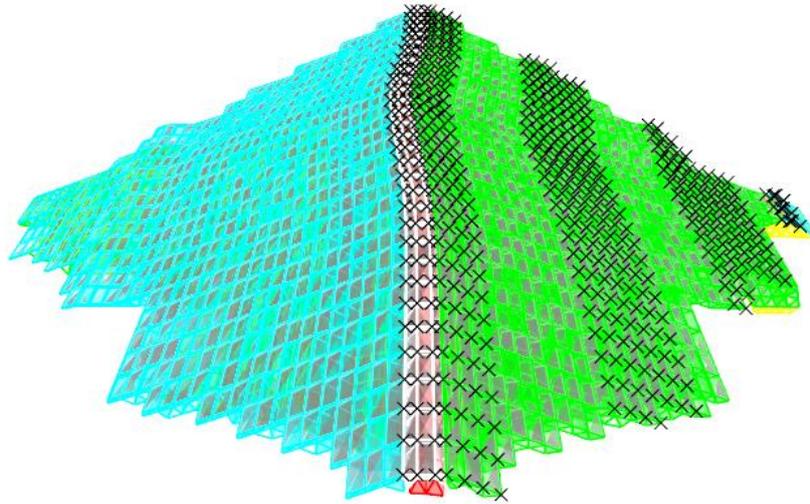


Figure 58 – Les points candidats sur la crête et quelques parties du côté aval

Résultats :

Sens x : 12 capteurs

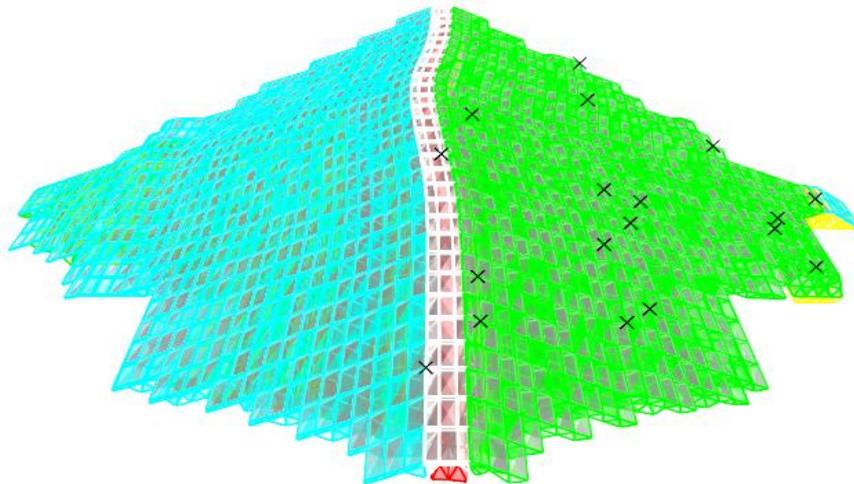
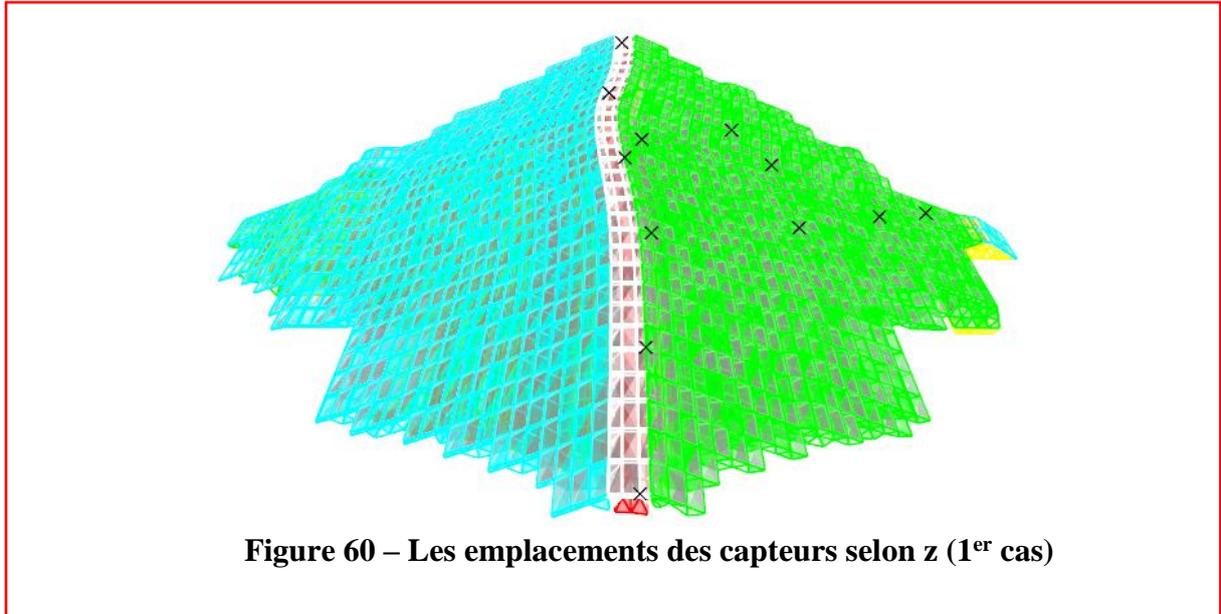


Figure 59 – Les emplacements des capteurs selon x (1^{er} cas)

Sens y : 0 capteurs

Sens z : 18 capteurs



Courbe d'évolution de la qualité de la population en fonction des générations :

Cette courbe nous permet de juger la qualité des populations générées, elle détermine à partir de quelle génération notre processus pourrait être arrêté.

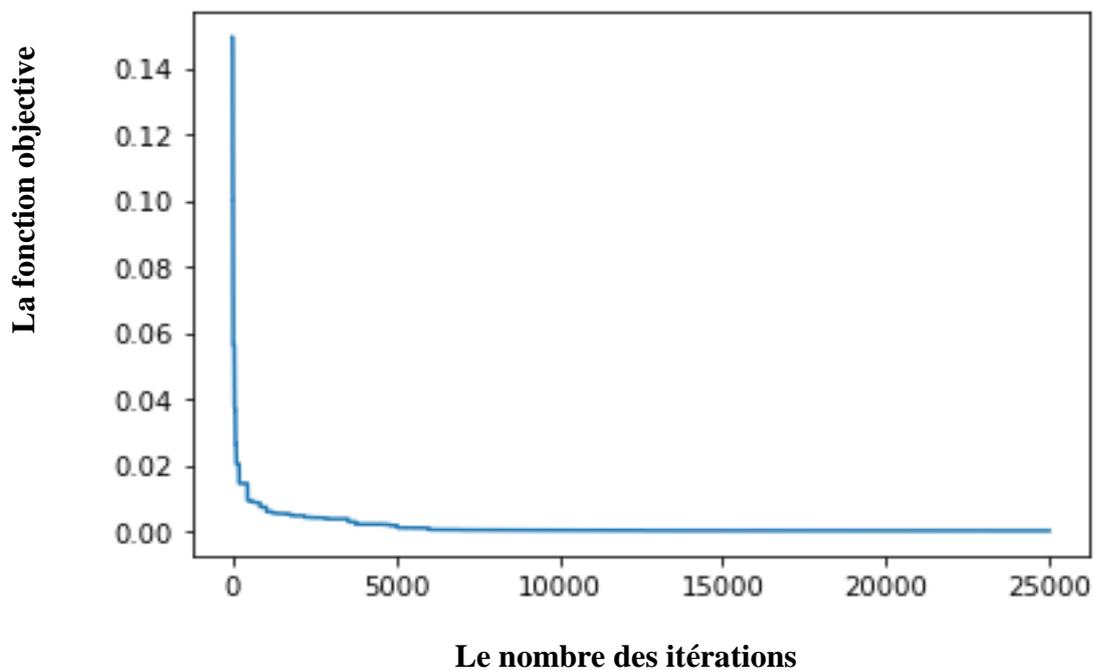


Figure 61 – Courbe d'évolution (1^{er} cas)

- **Cas 2 :**

Les points candidats :

Contrairement au premier cas, on a pris la totalité des points situés sur le côté aval.

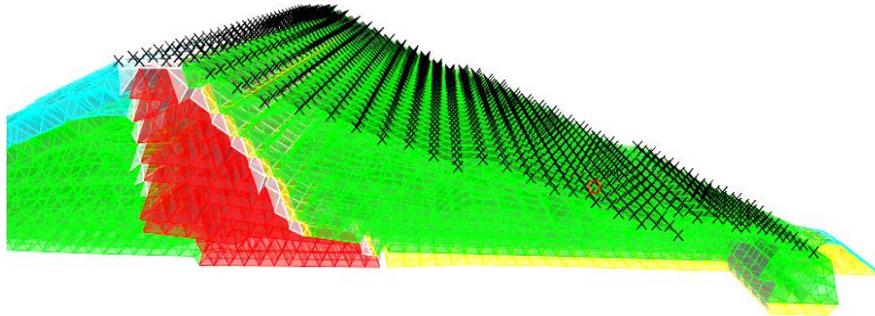


Figure 62 – Les points candidats sur la crête et le côté aval

Résultats :

Sens x : 17 capteurs

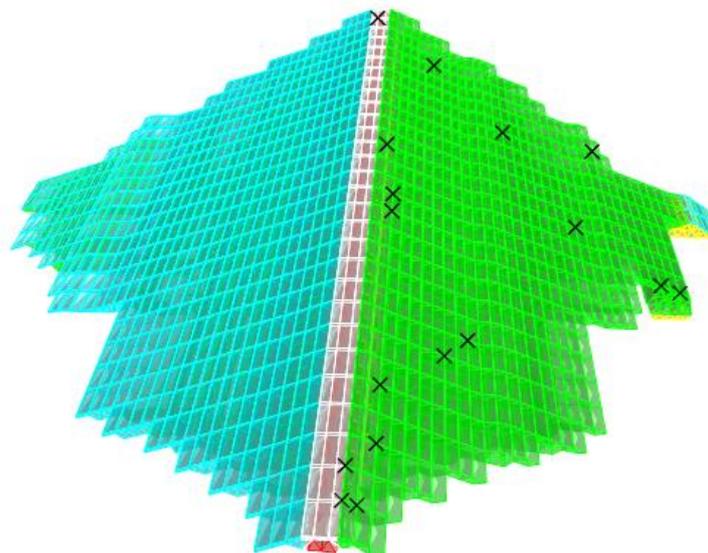


Figure 63 – Les emplacements des capteurs selon x (2^{ème} cas)

Sens y : 0 capteurs

Sens z : 13 capteurs

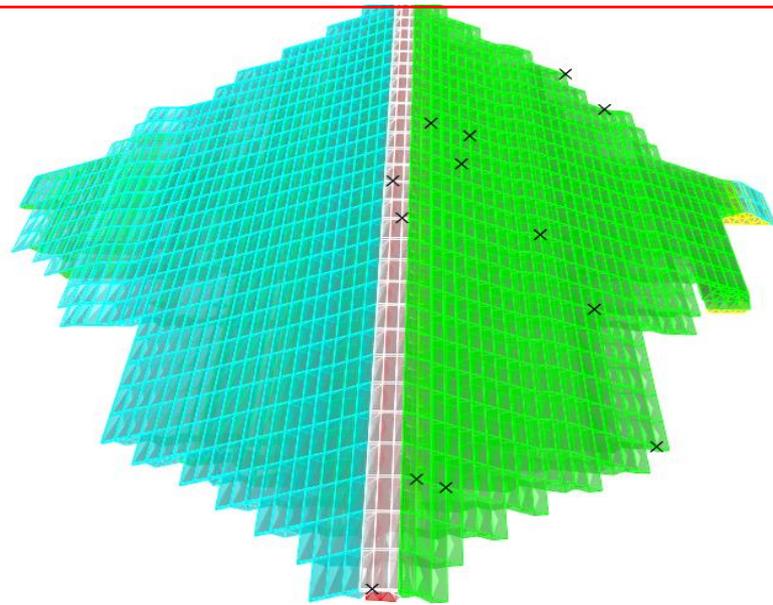


Figure 64 – Les emplacements des capteurs selon z (2^{ème} cas)

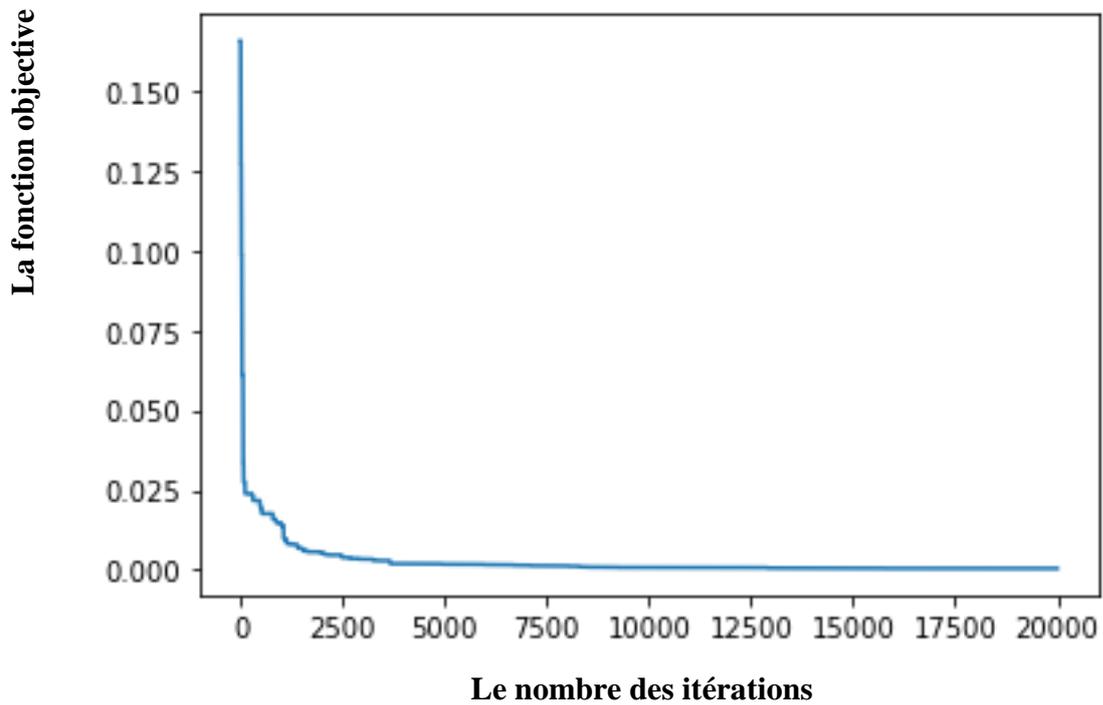


Figure 65 – Courbe d'évolution (2^{ème} cas)

Chapitre III : Optimisation des emplacements de capteurs par l'algorithme génétique

Remarques :

Pour ce dernier cas les résultats sont satisfaisants, la fixation du nombre de capteurs à 30, permet à l'algorithme de travailler que sur les emplacements optimaux.

III.6 Conclusion :

Grace à cette méthode basée sur l'algorithme génétique, on a pu optimiser les emplacements des capteurs. Cette étape s'avère d'une grande importance pour la détection des endommagements.

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

Chapitre IV : Identification des dommages par la méthode des neurones artificiels

IV.1 Introduction :

Les barrages sont des structures très complexes, ils peuvent subir pendant leurs exploitations plusieurs chargements, ce qui sollicite les ingénieurs de nos jours à trouver un alternatif de prédiction des dommages pour arriver à intervenir à temps.

Ce chapitre consiste à appliquer l'apprentissage profond (Deep-Learning) des réseaux de neurones pour avoir un modèle valide qui permet une prédiction efficace des dommages en terme d'emplacement et de degré d'endommagement.

La librairie **Keras** écrite en Python nous a fourni l'outil nécessaire pour la construction d'un réseau de neurones.

IV.2 Simulation des dommages dans la structure :

Le barrage de notre étude comprend plusieurs éléments principaux, au cours de leurs vies, ces éléments présentent de différentes détériorations dus aux infiltrations, écoulements séisme etc.

Ces détériorations peuvent être traduites par le phénomène de fatigue sur ce modèle du barrage, par une baisse de rigidité des zones les plus concernées, d'où la simulation des dommages.

Pour ce qui suit, on suppose que ces dommages vont toucher la partie du noyau (zone jaune). Et ceci en se basant sur les diagrammes des contraintes générés par SAP2000, ce choix des zones va permettre non seulement d'obtenir des résultats plus représentatifs, mais aussi d'optimiser les opérations sur le plan informatique.

Le phénomène de Fatigue est caractérisé par une baisse de rigidité de l'Argile (noyau).

IV.3 Choix des zones d'endommagement :

A partir des diagrammes des efforts maximaux sur SAP2000, On peut tirer les zones les plus sollicitées en compression, comme montré ci-dessous, on peut se limiter à la zone inférieure (z de -0.30 m à 15m) du noyau voir qu'elle présente des contraintes plus importantes.

Les zones choisies sont celles où les baisses de rigidité causées par le phénomène de fatigue sont plus probables (en rouge).

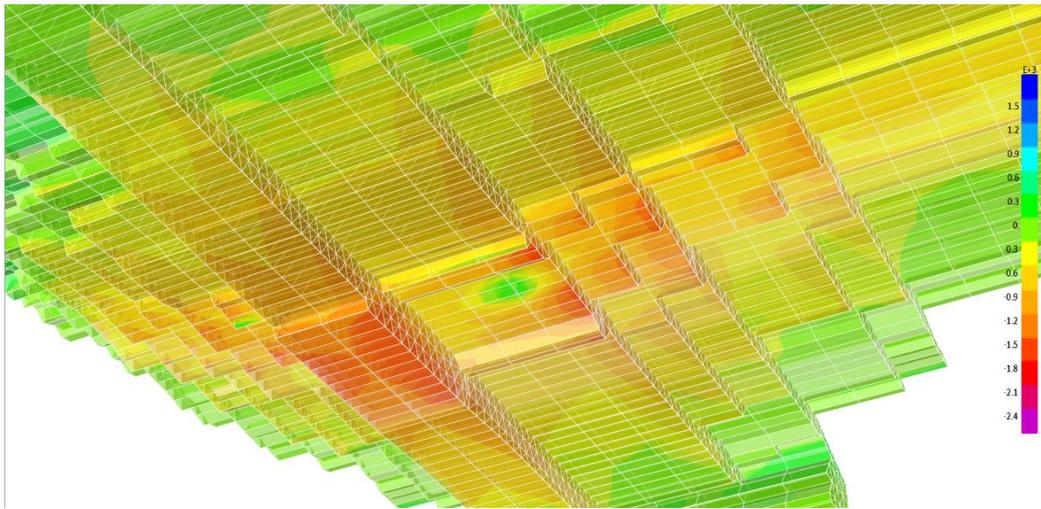


Figure 66 - représentations des contraintes maximales sur le barrage

On peut interpréter ces diagrammes pour prendre 3 zones principales d'endommagement.

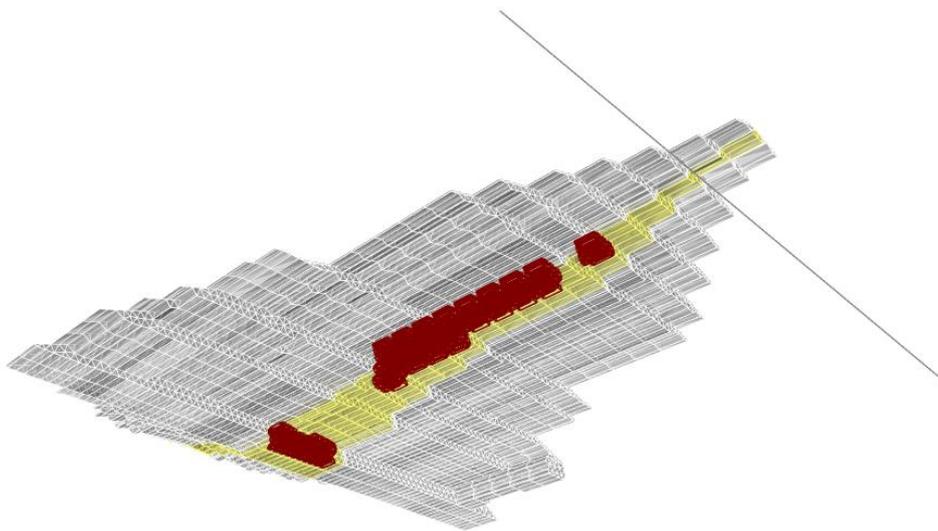


Figure 67 - Les zones en rouge représentent les zones choisies

Chapitre IV : Identification des dommages par la méthode des neurones artificiels

IV.3.1 Choix des degrés d'endommagement :

Pour la création de la base de données qui sert éventuellement par la suite à l'apprentissage du réseau de neurones.

On considère une baisse de rigidité variant de 2.5 % 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 jusqu'à (97.5% à 40%) E_0 , avec un pas de 2.5 % pour chaque zone de dommages.

Le tableau suivant présente les degrés de dommage :

Tableau 12- Degré de sévérité des dommages adoptés

Sévérité du dommage	Rigidité
1	0,975 E_0
2	0,95 E_0
3	0,925 E_0
4	0,9 E_0
5	0,875 E_0
6	0,85 E_0
7	0,825 E_0
8	0,8 E_0
9	0,775 E_0
10	0,75 E_0
11	0,725 E_0
12	0,7 E_0
13	0,675 E_0
14	0,65 E_0
15	0,625 E_0
16	0,6 E_0
17	0,575 E_0
18	0,5 E_0
19	0,525 E_0
20	0,50 E_0
21	0,475 E_0
22	0,45 E_0
23	0,425 E_0
24	0,40 E_0

IV.4 Simulation d'une excitation ambiante :

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

Chapitre IV : Identification des dommages par la méthode des neurones artificiels

Pour produire ces accélérogrammes nous avons donné comme entrée au logiciel les paramètres suivants:

- Un spectre ciblé plat (figure 68)
- Une forme d'enveloppe stationnaire (figure 69)
- Un pas de temps égal à 0,01 secondes
- Une durée de l'accélération égale à 1000 secondes
- Un amortissement égal à 5 %

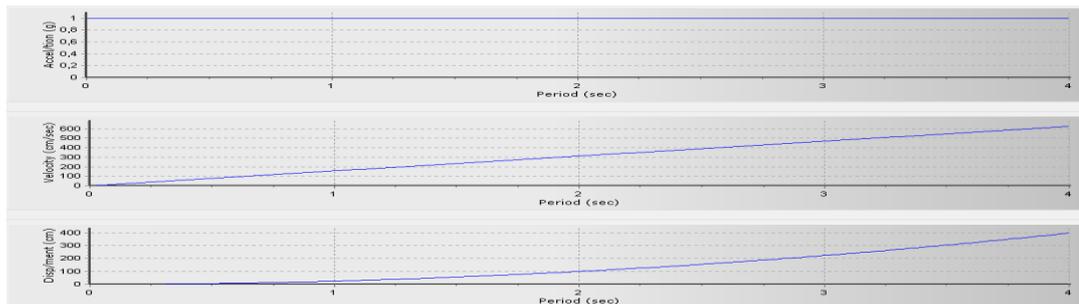


Figure 68– Les spectres ciblés

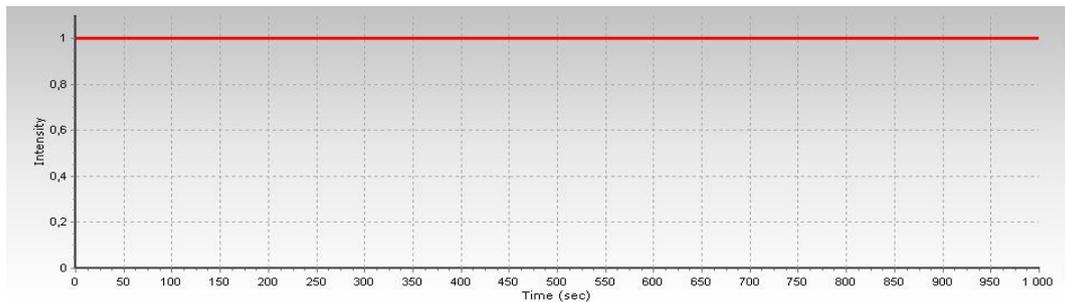


Figure 69-La forme de l'enveloppe

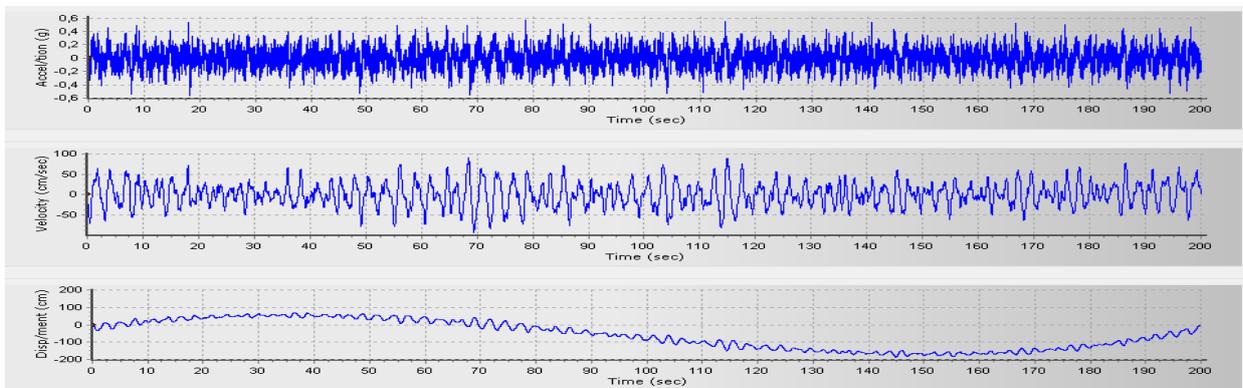


Figure-70 Les 200 premières secondes des accélérogrammes générées

IV.5 Analyse en composantes principales :

L'analyse en composantes principales, ou selon le domaine d'application la transformation de Karhunen–Loève (KLT), est une méthode de la famille de l'analyse des données et plus généralement de la statistique multivariée, qui consiste à transformer des variables liées entre elles (dites « corrélées » en statistique) en nouvelles variables décorrélées les unes des autres.

Ces nouvelles variables sont nommées « composantes principales », ou axes principaux. Elles permettent au praticien de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante [44].

IV.5.1 Application de l'ACP:

On applique l'ACP comme suit:

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

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

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

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

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

$$e = \frac{\sum_1^n \lambda_i}{\sum \lambda_i} \quad (29)$$

Le nombre d'axes principaux à considérer dépend d'un compromis, on doit à la fois minimiser le nombre d'axes et minimiser l'erreur relative [45].

Chapitre IV : Identification des dommages par la méthode des neurones artificiels

IV.6 La méthode des réseaux de neurones artificiels :

IV.6.1 Généralité sur les réseaux de neurones :

L'intelligence artificielle (IA) consiste à mettre en œuvre un certain nombre de techniques visant à permettre aux machines d'imiter une forme d'intelligence humaine.

IV.6.1.1 Machine Learning and Deep Learning:

Machine Learning - ML (ou apprentissage automatique) : sous-branche de l'Intelligence Artificielle, est un ensemble de méthodes statistiques appliquées à l'IA. Elles permettent d'apprendre à partir des données d'exemple (apprentissage supervisé).

IV.6.1.2 Deep Learning – DL (ou apprentissage profond):

Sous-branche du ML, il repose principalement sur l'utilisation de réseaux de neurones (on se rapproche donc de la neuroscience plutôt que des statistiques) pour résoudre les problèmes. Le principe reste identique, avoir des données d'exemples et adapter son modèle interne pour qu'il prédise correctement ses sorties.

IV.6.2 Réseaux de neurones:

Un réseau de neurones est un système d'opérateurs non linéaires interconnectés, recevant des signaux de l'extérieur par ses entrées, et délivrant des signaux de sortie. Ces réseaux sont une métaphore des structures cérébrales comportant plusieurs éléments de traitement appelés neurones.

Chaque neurone fonctionne indépendamment des autres de telle sorte que l'ensemble est un système parallèle fortement interconnecté. L'information détenue par le réseau de neurone est distribuée à travers l'ensemble des constituants et non localisée dans une partie de mémoire.

Le réseau de neurone est entraîné sur des données acquises, grâce à un mécanisme d'apprentissage qui agit sur les constituants du réseau afin de réaliser au mieux la tâche souhaitée [46].

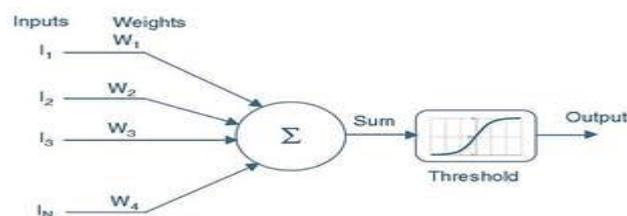


Figure-71 Schéma représentant un neurone artificiel

Chapitre IV : Identification des dommages par la méthode des neurones artificiels

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

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

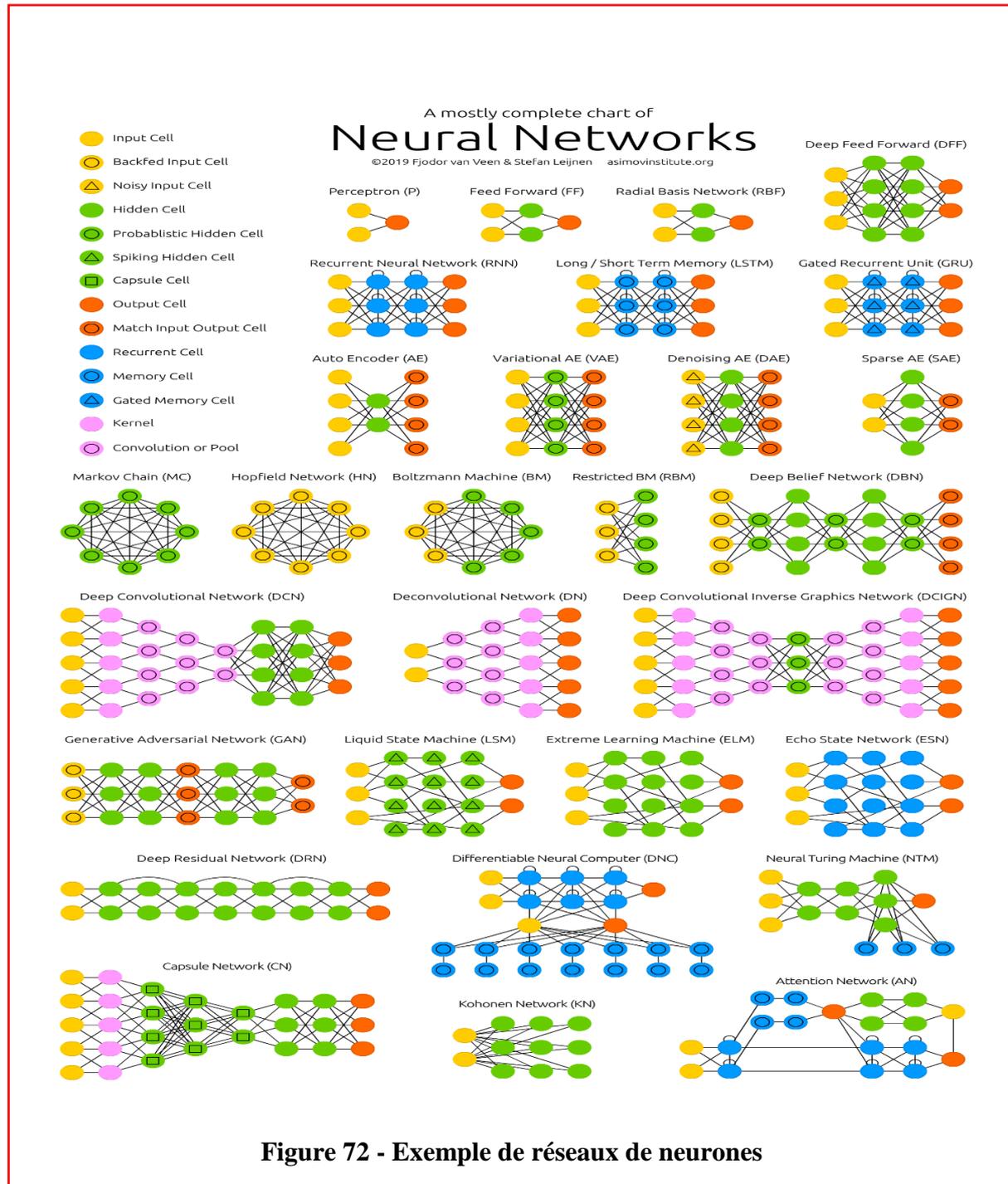


Figure 72 - Exemple de réseaux de neurones

Chapitre IV : Identification des dommages par la méthode des neurones artificiels

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

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

On pourra se demander l'utilité de ces fonctions d'activations non linéaires. C'est précisément cette non linéarité qui donne toute sa puissance au réseau de neurone, et le rend capable d'approximer n'importe quelle fonction continue.

En fait, un réseau de neurone sans ces non linéarités, avec uniquement des combinaisons linéaires, n'est d'aucune utilité, car il peut être simplifié lui-même en une combinaison linéaire [47].

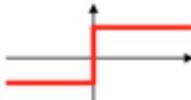
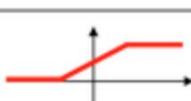
Activation function	Equation	Example	1D Graph
Unit step (Heaviside)	$\phi(z) = \begin{cases} 0, & z < 0, \\ 0.5, & z = 0, \\ 1, & z > 0, \end{cases}$	Perceptron variant	
Sign (Signum)	$\phi(z) = \begin{cases} -1, & z < 0, \\ 0, & z = 0, \\ 1, & z > 0, \end{cases}$	Perceptron variant	
Linear	$\phi(z) = z$	Adaline, linear regression	
Piece-wise linear	$\phi(z) = \begin{cases} 1, & z \geq \frac{1}{2}, \\ z + \frac{1}{2}, & -\frac{1}{2} < z < \frac{1}{2}, \\ 0, & z \leq -\frac{1}{2}, \end{cases}$	Support vector machine	
Logistic (sigmoid)	$\phi(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$	Logistic regression, Multi-layer NN	
Hyperbolic tangent	$\phi(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}}$	Multi-layer NN	

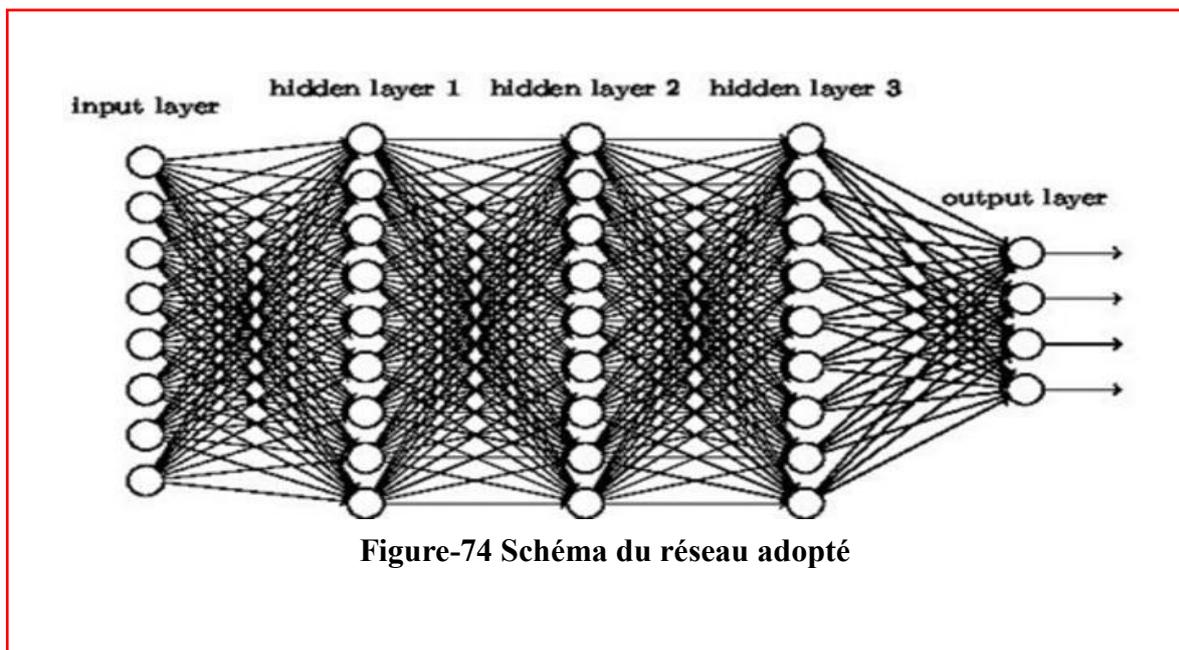
Figure 73- les fonctions d'activation

IV.6.3 Conception du réseau :

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

Le réseau que nous avons choisi est de type « Feed-forward fully connected ». Nous l'avons adopté pour sa simplicité, sa fiabilité et son utilisation dans le domaine de la détection et prédiction des dommages, notamment Kudva qui a utilisé un réseau de neurones similaire pour identifier un dommage dans une plaque raidie, les auteurs ont trouvé que le réseau de neurones était capable de prédire la localisation exacte du dommage mais le degré d'endommagement était plus problématique. Wu, et al. (1992) ont utilisé un réseau Feed-forward à un bâtiment de trois étages ayant subi une excitation sismique. Spillman et al. ont utilisés un fully connected réseau pour identifier les dommages dans un pont métallique. Dans une étude similaire, Rhim and Lee (1994) ont utilisé un réseau Feed-forward dans le but d'identifier une délamination dans un pont en treillis à éléments composites. De très bons résultats ont été obtenus dans la détection d'endommagement dans les modèles numériques des structures [48].

Pour mettre en œuvre notre réseau de neurones, on a utilisé la bibliothèque **keras** de python, c'est une bibliothèque open source qui permet un deep learning, elle vise à être convivial, modulaire et extensible. Elle a été développée dans le cadre de l'effort de recherche du projet ONEIROS (système d'exploitation de robot intelligent neuro-électronique à composition non limitée), et son principal auteur et mainteneur est François Chollet, ingénieur Google. [45].



Chapitre IV : Identification des dommages par la méthode des neurones artificiels

Avec :

- Couche d'entrée (input layer) 40 neurones
- 1^{ère} Couche d'entrée (hidden layer 1) 80 neurones
- 2^{ème} Couche d'entrée (hidden layer 2) 80 neurones
- 3^{ème} Couche d'entrée (hidden layer 3) 80 neurones
- Couche de sortie (output layer) 3 neurones

Entrées du réseau (Input) : L'entrée du RNA est un vecteur contenant les FRF pour les 30 modes réduits dans les capteurs.

Le réseau prend comme entrée 40 paramètres réels issus de l'analyse en composantes principales (ACP).

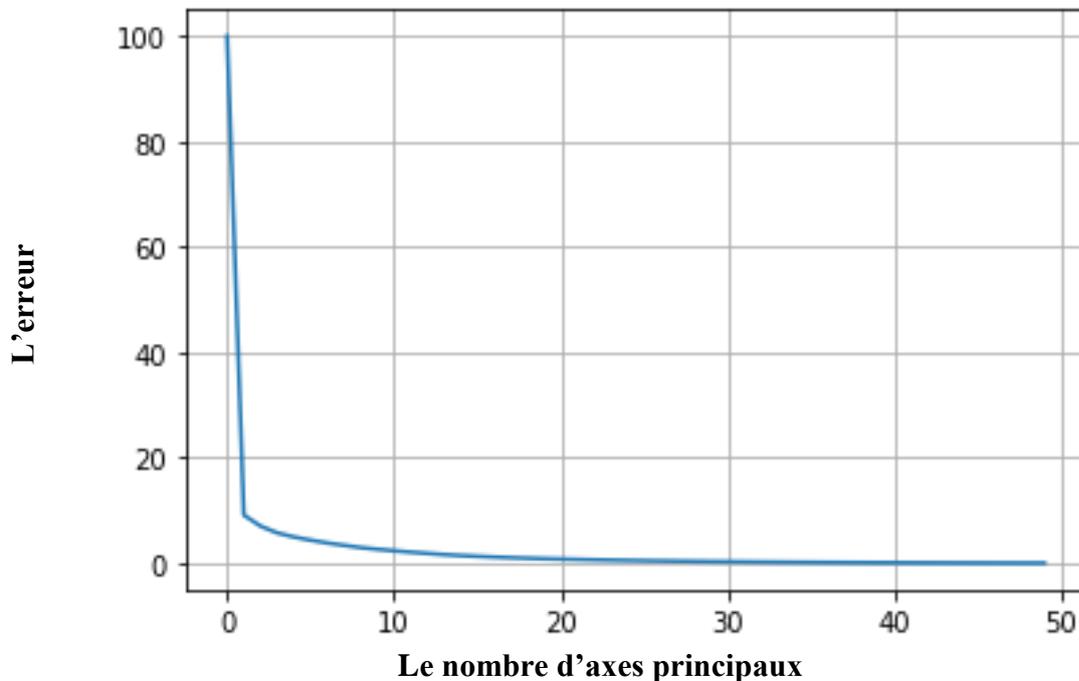


Figure-75 Erreur relative en fonction du nombre d'axes principaux considérés (input)

Sorties du réseau (Output) : pour la sortie le réseau donne 3 paramètres (neurones) réels compris entre 0 et 1.

La sortie est un vecteur contenant la gravité des dommages des emplacements de dommages potentiels.

Nous avons la base du barrage en 3 zones et on suppose que chaque zone est l'emplacement d'un dommage potentiel, le vecteur de sortie contiendra 3 valeurs variant de 0 à 1, où 0 correspond à aucun dommage et 1 correspond aux dommages complets.

Chapitre IV : Identification des dommages par la méthode des neurones artificiels

[0. 0. 0.]

Aucun endommagement sur toute la structure

[0.975 0. 0.]

Endommagement dans la zone 1 avec le degré de 2.5%

Pour construire la base de données, on attribue des rigidités différentes à chaque zone, on a choisi 24 degrés d'endommagement pour notre cas.

Apprentissage du réseau:

On divise par la suite les données en trois sous ensemble définit comme suit :

Données d'apprentissages : elles symbolisent la majorité des donnée (83%) et c'est sur ces données que l'apprentissage est fait pour estimer les gradients et optimiser les pondérations.

Données de validation : elles représentent environ 8,5 % des données globales et on les sélectionne en prenant un cas d'endommagement pour chaque zone de dommage.

Données de test : elles évoquent environ 8,5 % des données globales et sont sélectionnées de la même manière que les données de validation, Elles sont utilisées à la fin de l'apprentissage pour évaluer la performance du réseau sur de nouvelles données. [45]

Résultats :

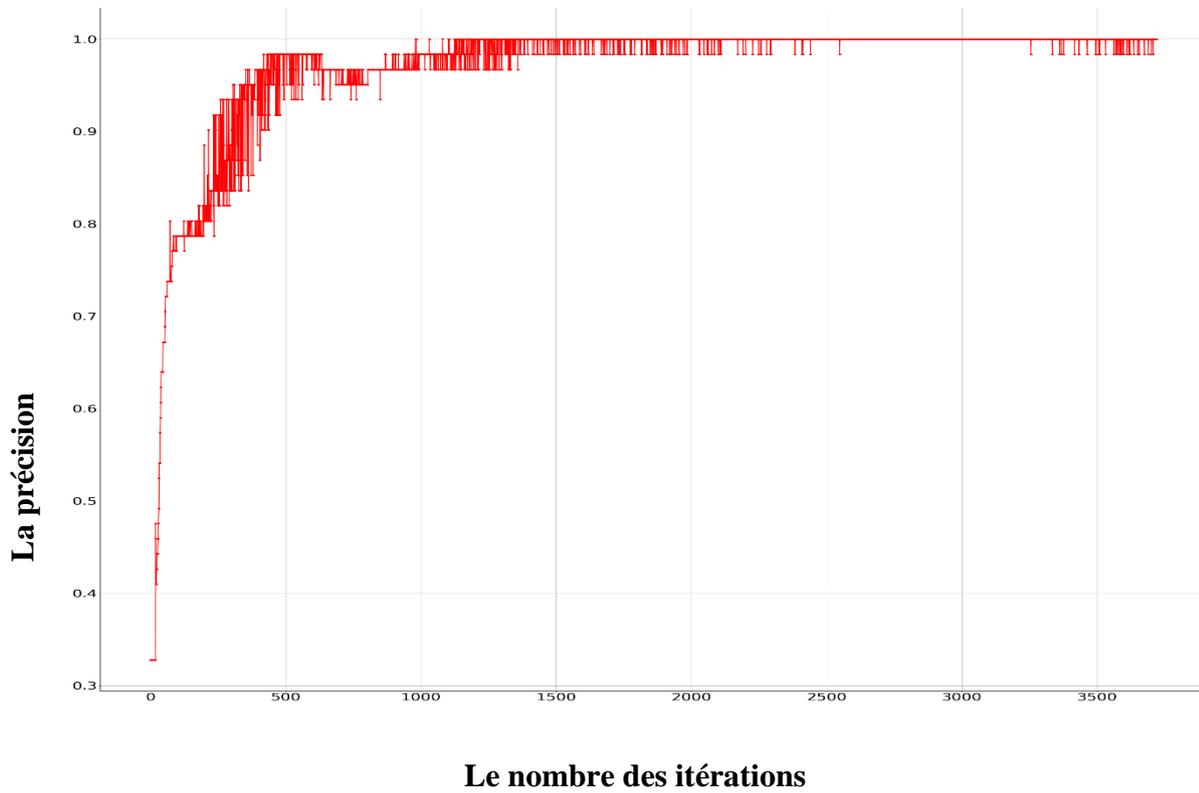


Figure 76 - Courbe montrant l'évolution de la précision sur les données d'apprentissage en fonction des itérations

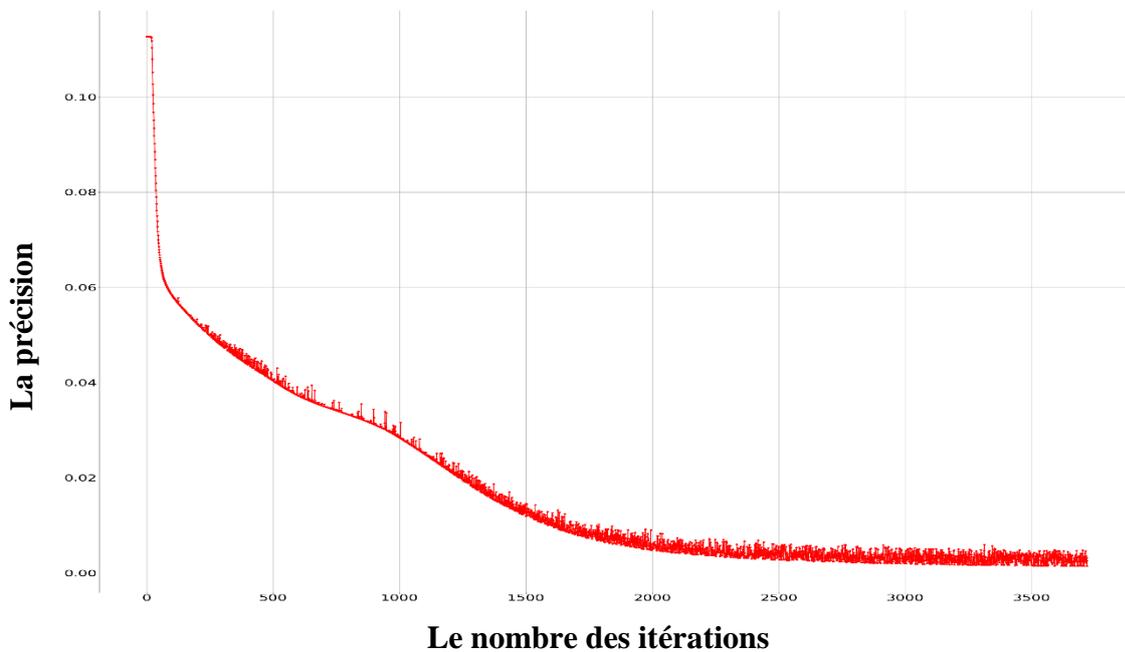


Figure 77 - Courbe montrant l'évolution de la perte de précision de l'apprentissage en fonction des itérations

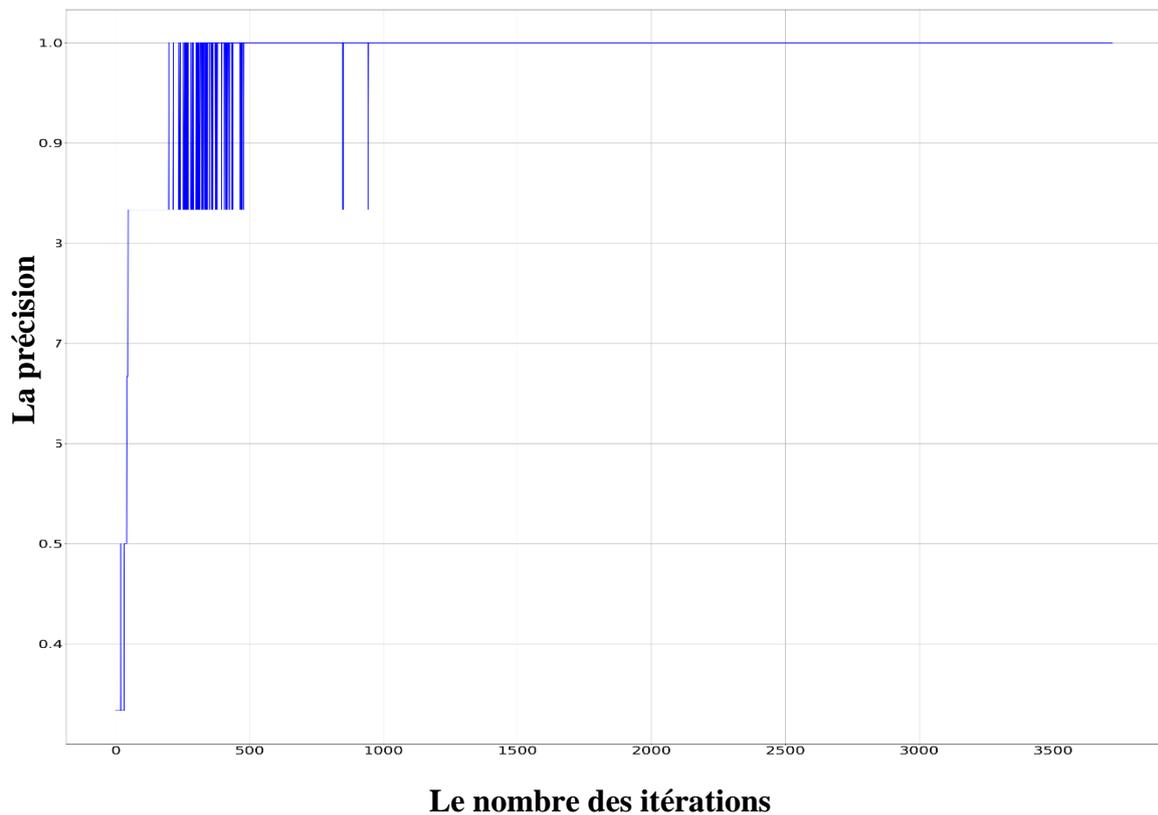


Figure 78 - Courbe montrant l'évolution de la précision sur les données de validation en fonction des itérations

Observations :

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

- **Données d'apprentissage** : précision égale à **100 %**
- **Donné de validations** : précision égale à **100%**

Il semble logique que la fonction de perte diminue, du fait que la précision du modèle augmente. L'apprentissage de ce modèle pour la localisation et la détection sont atteints. On constate également que ce réseau a abouti à une performance satisfaisante rapide après seulement quelques centaines d'itération. Cependant l'apprentissage peut encore être optimisé.

IV.7 Conclusion :

En général les réseaux de neurones de types « fully connected layers » sont fiables pour les problèmes de prédiction et d'identification.

L'étude nous a permis d'avoir un aperçu sur les performances que peut avoir ce genre de méthodes appliquées sur les barrages et sur quelle variable on pourra se focaliser.

Les réseaux de neurones sont capables de remplacer les méthodes classiques pour la détections des dommages, tout en exploitant les données obtenues expérimentalement.

Conclusion et perspectives

La surveillance des barrages est d'une importance capitale sur plusieurs plans : économique, technique, stratégique et autres, afin d'assurer leur sécurité et longévité.

Toute surveillance de santé d'une structure doit être précédée par une étude numérique et une modélisation, cette étude définit les différentes caractéristiques du barrage : modales, physiques, géométriques ... etc. Ce qui est primordiale dans les étapes de la surveillance qui nécessite un modèle de travail.

De plus, toute SHM nécessite un placement optimal de capteurs, et pour ce faire, nous avons précédé par une étude visant à optimiser le nombre de capteurs utilisés en raison de l'infinité des degrés de liberté d'une structure, et de l'impossibilité pratique et économique de placer une infinité de capteurs.

A l'aide d'une méthode hybride basée sur les algorithmes génétiques et le critère d'identification MAC, on a effectué une optimisation des emplacements des capteurs.

L'approche adoptée dans cette étude consiste à simuler numériquement des endommagements potentiels, Puis traiter les réponses modales obtenus lors de la simulation, en premier lieu en passant du domaine temporel au domaine fréquentiel puis en appliquant une analyse en composantes principales afin de réduire le volume des inputs.

Dans le dernier chapitre on a utilisé le RNA, pour lequel on a effectué un apprentissage, et qui a présenté de bons résultats.

Cette étude offre des perspectives comme:

- On pourrait aller vers une meilleure optimisation des capteurs en améliorant la fonction objective de l'algorithme génétique.
- On pourrait élargir la base de données de l'apprentissage en y rajoutant des bruits, ce qui donnerait des résultats plus fiables et plus représentatifs.

Références :

- [1] Anton j. Schleiss, Henri Pougatsch, « Les barrages : du projet à la mise en service, », PPUR Presses polytechniques, 2011
- [2] « Barrages en remblai, » publié le 26 septembre 2007, [En ligne]. Disponible sur : <<http://www.planete-tp.com/barrages-en-remblai-a122.html>> [Accès le avril 2020]
- [3] Claude BESSIERE, « Les ouvrages annexes, », [En ligne]. Disponible sur : <<https://www.universalis.fr/encyclopedie/barrages/7-les-ouvrages-annexes/>> [Accès le avril 2020]
- [4] S. BONELLI, « Ouvrages hydrauliques en remblai : un regard transversal sur l'action de l'eau, », [En ligne]. Disponible sur : <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00464550/document>> [Accès le avril 2020]
- [5] Manuel G. DE MEMBRILLERA ORTUNO, « Contrôles sismiques dans le cadre de la sécurité des barrages, », 2016.
- [6] S.Bonelli, K.Radzicki, J.Szczesny , « L'auscultation des barrages en terre : une nécessité, », [En ligne]. Disponible sur : <https://www.researchgate.net/publication/43253117_l'auscultation_des_barrages_en_terre_une_necessite> [Accès le avril 2020]
- [7] Yi Tan and Limao Zhang, « Computational methodologies for optimal sensor placement in structural health monitoring: A review, Structural Health Monitoring, », pp. 1-22, 2019.
- [10] Ghanem et Shinozuka, « Structural system identification, », pp. 1 1995.
- [11] Miroslav pastora, michal bindaa, tomáš hararika, «Modal assurance criterion» procedia engineering, vol. 48, p. 543–548 , 2012.
- [12] S. f.ashby, « Computational science and engineering, » center for applied scientific computing, 1997.
- [13] M. Nobahari and S. M. Seyedpoor, « An efficient method for structural damage localization based on the concepts of flexibility matrix and strain energy of a structure, » Structural Engineering and Mechanics, pp. 231-244, 11 Mai 2014.
- [14] ANBT, « Barrage de DOUERA et digue a et b, monographie », pp. 103.

- [15] Solin P, Segeth K, Dolezel I (2004) « Higher-Order Finite Element Methods, ». Boca Raton : Chapman & Hall / CRC Press.
- [16] Bernard TARDIEU, « Méthode simplifiée de pré-dimensionnement des barrages poids en zone sismique, » Saint Rémy lès Chevreuse (France), 1993.
- [17] M. Abdelwahab ELAICHI et M. Walid MZAIDI, « Surveillance vibratoire des structures de Génie Civil : application des vibrations ambiantes sur le barrage de Taksebt, » Blida 2015.
- [18] Yi Tan, Limao Zhang, « Computational methodologies for optimal sensor placement in structural health monitoring, » 2019.
- [19] Robert F. Guratzsch¹ and Sankaran Mahadevan² Vanderbilt University, Nashville, TN, 37235.
- [20] Padula SL and Kincaid RK. « Optimization strategies for sensor and actuator placement, » 1999.
- [21] Jin H, Xia J and Wang YQ. « Optimal sensor placement for space modal identification of crane structures based on an improved harmony search algorithm, ». J Zhejiang Univ: Sc A 2015; 16(6): 464–477
- [22] Li B, Li D, Zhao X, et al. « Optimal sensor placement in health monitoring of suspension bridge, ». Sci China Technol Sc 2012; 55(7): 2039–2047.
- [23] Papadimitriou C, Beck JL and Au SK. « Entropy-based optimal sensor location for structural model updating, ». J Vib Control 2000; 6(5): 781-800. indépendance effective (EI), Jin H and Song Y.
- [24] Meo M and Zumpano G. « On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure, » Eng Struct 2005; 27(10): 1488–1497.
- [25] Carne TG and Dohrmann CR. « A modal test design strategy for model correlation, ». Albuquerque, NM: Sandia National Labs, 1994.
- [26] Allemang RJ and Brown DL. « A correlation coefficient for modal vector analysis, ». In: Proceedings of the 1st international modal analysis conference, » vol. 1, Orlando, FL, 8–10 November 1982, pp. 110–116. Orlando, FL: SEM.
- [27] Pastor M, Binda M and Hrnčíř T, « Modal assurance criterion, » Procedia Engineer 2012; 48: 543–548.

- [28] Kammer DC, « Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures, » 1991; 14(2): 251–259)
- [29] Basseville M, Benveniste A, Moustakides G, et al, «Optimal sensor location for detecting changes in dynamical behavior, ». IEEE T Automat Contr 1987; 32(12):1067–1075.
- [30] Pan CT, «On the existence and computation of rankrevealing LU factorizations. Linear Algebra Appl, » 2000; 316(1–3): 199 222.
- [31] Michalewicz Z, Dasgupta D, Le Riche RG, et al, « Evolutionary algorithms for constrained engineering problems, ». Comput Ind Eng 1996; 30(4): 851–870.
- [32] Goldberg DE and Samtani MP. «Engineering optimization via genetic algorithm. In: ASCE electronic computation, », 1986, pp. 471–482.
- [33] Goldberg DE and Samtani MP. «Engineering optimization via genetic algorithm. In: ASCE electronic computation, », 1986, pp. 471–482.
- [34] Holland JH. «Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence, ». Cambridge, MA: The MIT Press, 1992.
- [35] Whitley D. «A genetic algorithm tutorial». Stat Comput 1994; 4(2): 65–85.
- [36] M. Pawar and Ranjan Ganguli, «Structural Health Monitoring Using Genetic Fuzzy Systems, », 2011
- [37] Zhao RQ and Tang WS. «Monkey algorithm for global numerical optimization, ». J Uncertain Syst 2008; pp 165–176.
- [38] A. Belisario Briceno, « Contribution à la détection de fragilité de structures en béton armé: Méthodologies d'instrumentation à l'aide de capteurs piézoélectriques, », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2016
- [39] Dasgupta D and Michalewicz Z. « Evolutionary algorithms in engineering applications, ». Berlin: Springer, 2013.
- [40] Structural health monitoring [En ligne] Disponible sur:
https://air.imag.fr/index.php/Structural_health_monitoring [Accès Aout 2020]
- [41] Structural health monitoring [En ligne] Disponible sur :
https://air.imag.fr/index.php/Structural_health_monitoring [Accès Aout 2020]
- [42] M. Mohamed Said LAGHOUB et Mme. Hanifa KRIDI, « Méthode hybride pour la détection des dommages : application sur un pont existant, » Alger, 2020.

[43] Yi Tan and Limao Zhang, «Computational methodologies for optimal sensor placement in structural health monitoring: A review,» Structural Health Monitoring, pp. 1-22, 2019.

[44] Analyse en composante principale, wikipédia [En Ligne] Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_en_composantes_principales [Accès Aout 2020]

[45] M. Mohamed Said LAGHOUB et Mme. Hanifa KRIDI, « Méthode hybride pour la détection des dommages : application sur un pont existant, » Alger, 2020.

[46] Mme. Deliah KHEMISSA, « Application des réseaux de neurones à la détection des dommages dans un barrage en BCR, », Alger, 2019.

[47] Corentin Dancette - Blog , « Fonctionnement d'un réseau de neurones artificiel, » 8 Octobre 2017. [En ligne]. Disponible sur : <https://cdancette.fr/2017/10/08/neural-nets/>. [Accès le 26 Mai 2020].

[48] M. Khaled HAMZAOUI et M. Ryad Mahmoud ZYAT, « Monitoring de l'état structural des ponts par l'analyse vibratoire : application sur un pont existant, » Alger, 2019.