



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



**Département de 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**

**Thème**

**Identification et recalage d'un modèle de  
barrage par vibrations ambiantes et  
algorithme génétique**

**Réalisé par :**

Yacine BASTA  
Fatima Zohra SAHRAOUI

**Sous la direction de :**

M. N. BOURAHLA & M. A. SI-CHAIB

**Présenté et soutenu publiquement le 06/07/2019**

**Composition du Jury :**

Présidente	Mme. D. CHERID	MCB	ENP
Promoteurs	M. N. BOURAHLA	Pr.	ENP
	M. A. SI-CHAIB	Dr.	COYNE & BELLIER
Examineurs	Mme H. MOHABEDDINE	MCB	ENP
	M. LEKHAL	MAA	ENP

**ENP 2019**





المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



Département de 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

Thème

**Identification et recalage d'un modèle de  
barrage par vibrations ambiantes et  
algorithme génétique**

Réalisé par :

Yacine BASTA  
Fatima Zohra SAHRAOUI

Sous la direction de :

M. N. BOURAHLA & M. A. SI-CHAIB

Présenté et soutenu publiquement le 06/07/2019

Composition du Jury :

Présidente	Mme. D. CHERID	MCB	ENP
Promoteurs	M. N. BOURAHLA	Pr.	ENP
	M. A. SI-CHAIB	Dr.	COYNE & BELLIER
Examineurs	Mme H. MOHABEDDINE	MCB	ENP
	M. LEKHAL	MAA	ENP

ENP 2019

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes très chers parents qui ont tout mis en œuvre*

*Pour ma réussite et mon éducation*

*À celle qui m'a toujours aidé durant les moments les plus importants de ma vie  
ma sœur Amira*

*À ma sœur Yasmine pour son soutien et ces encouragements*

*À ma très chère binôme*

*À mes amis Mehdi, Ryad, Anouar, et sans oublier Khaled avec lesquels j'ai  
partagé des moments inoubliables tout au long de mon cursus*

*À tous ceux que j'ai oubliés de citer*

*Je vous dis merci*

*Yacine*

*Je dédie ce mémoire*

*À mes très chers parents qui ont cru en moi et qui m'ont soutenue tout au long  
de mon parcours éducatif.*

*À mon unique petite sœur m'ayant épaulé et apporté son aide  
inconditionnellement.*

*À mes frères qui m'ont toujours encouragée durant mon cursus.*

*À mes « GC Ladies » Deliah, Hala, Razika, Sihem et Samia*

*À Khaled et Ryad*

*À Yacine mon enthousiaste binôme*

*À toute personne qui a été à mes côtés durant mes années d'études.*

*Un grand merci à vous.*

*Fatima Zohra*

# *Remerciements*

Nous exprimons notre reconnaissance à nos promoteurs Mr N. BOURAHLA et Mr A.SI-CHAIB, pour leur consécration, leur disponibilité et leur dévouement quant au bon déroulement du projet de fin d'étude.

Nous tenons à remercier également Mme H.DJABALI MOHABEDDINE et Mme D.CHERID qui ont permis l'élaboration de ce travail dans de meilleures conditions.

Nous exprimons également notre reconnaissance à Mr. Mohammed Khayreddine ABIDI, ingénieur du Bureau d'Études Tractebel Engineering (France).

Nous remercions également Mr SI-CHAIB, Mr HAMRI et Mme BENMAMAR de nous avoir permis de travailler dans leurs locaux respectifs

Nous tenons à remercier notamment nos enseignants ayant contribué à notre formation.

Nous sommes ravis de leur faire part du rendu et de l'aboutissement de cette recherche à laquelle leur contribution a été notable, en espérant que ce soit à la hauteur de leurs attentes.

Nos remerciements s'adressent particulièrement à nos familles respectives, pour nous avoir apporté leur soutien continuent afin de remettre un contenu intelligible et enrichissant.

## ملخص

يتمثل أحد التحديات في رصد الصحة الهيكلية للمنشآت الكبيرة في تقديم نموذج مرجعي رقمي دقيق وموثوق للتنبؤ بدقة بسلوك الهيكل الفعلي طوال فتراته الخدمائية.

تم اختيار سد المهوان الذي يمثل بنية كبيرة كمعيار لوضع نموذج مرجعي تم التحقق منه. يتكون هذا السد من عدة طبقات تحتوي على مواد مختلفة بخصائص غير مؤكدة. لهذا السبب، تم اعتماد طريقة تعتمد على الذكاء الاصطناعي لإجراء المعايرة و المتمثلة في الخوارزمية الجينية التي تعتبر هي الأكثر ملاءمة لمثل هذه المشاكل العكسية مع وظائف متعددة الأهداف.

يتم تطوير النماذج العددية للسد مع مستويات مختلفة من التفاصيل والتحقق من صليب ودقة كل من النماذج. نظرًا لأهمية الوقت اللازم لإجراء عدة تكرارات للخوارزمية الجينية، يتم اختيار النموذج ثنائي الأبعاد للمعايرة لأنه يمثل بشكل كامل سلوك السد على طول المقطع العرضي دون أن يشكل عقبات من حيث صحة التنبؤات بسلوكيات الهيكل على مرور فتراته الخدمائية.

لتكوين البيانات التجريبية للمعايرة، تُجرى سلسلة من اختبارات الاهتزازات المحيطة في الموقع لتحديد خصائص للهيكل الفعلي (الترددات الطبيعية) المستخدمة كقاعدة بيانات للنموذج العددي المرجعي الذي يمثل حالته الأولية.

للبنية ستة معامل مرونة من خصائص المواد المختلفة التي يتعين تحديدها. ينشئ الإجراء أولاً مجموعة أولية باستخدام اختيارات عشوائية من فواصل زمنية لها خمس قيم منفصلة لكل من المعامل الست المرنة. ثم يتم تطبيق الخوارزمية الجينية على مختلف الأجيال بإجراء تحويلات وتغييرات على خصائص الأفراد المكونة لكل جيل ثم يتم اختيار الأفضل في كل تكرار للأجيال التالية حتى التكرار الأخير الذي يتقارب مع الخصائص الأنسب والمنتظرة من عملية المعايرة. الدالة المعرفة لهدف الخوارزمية تتمثل في تقييم الفرق أو درجة التقارب بين أدنى ثلاثة ترددات أساسية للسد وترددات النموذج الرقمي.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الخوارزمية الجينية فعالة للغاية في تحسين المعلمات غير المؤكدة وتتقارب في عدد قليل من تكرارات الأجيال إلى النتيجة المثالية المنتظرة.

## الكلمات المفتاحية

السد، المراقبة، النموذج العددي، العناصر المحدودة، مراقبة الوسائط، الاهتزازات المحيطة، المعايرة، الخوارزمية الجينية.

## **Abstract**

A challenge in Structural Health Monitoring of large structures is to provide a precise and reliable numerical reference model to accurately predict the behaviour of the actual structure over its lifetime.

The Mahouane embankment dam representing a large structure is chosen as a benchmark to elaborate a validated reference model. This dam is constituted of several layers having different materials with uncertain characteristics. For this reason, a method based on artificial intelligence is adopted for the calibration procedure. Among others, the genetic algorithm is most suitable for such inverse problems with multi-objective functions.

Numerical models of the dam with different levels of details are elaborated and cross checked. Because of the large amount of time calculation needed to perform several iterations for the genetic algorithm, the 2D model is chosen for calibration as it portrays accurately the overall behavior of the dam along the transverse direction without being cumbersome in terms of calculation.

To constitute the experimental data for calibration, series of in-situ ambient vibration tests are carried out to identify the modal properties of the actual structure (natural frequencies) used as a database for the reference numerical model representing its initial state.

The structure has six elastic modulus of different material properties to be defined. The procedure generates first an initial population using random selections from intervals having five discrete values of each of the six elastic modulus. Then the genetic algorithm is applied to cross-over and mutate the population individuals for several iteration and choosing in each iteration the best individuals for the next parents until the last iteration which converges to a best fit. The objective functions of the algorithm is a combination of errors in evaluating the three lowest fundamental frequencies.

The obtained results show that the genetic algorithm is very efficient in optimizing the uncertain parameters and converges in few iterations to an optimal solution.

## **Key words**

Dam, Monitoring, Numerical Model, Finite Elements, Modal Identification, Ambient Vibrations, Updating, Genetic Algorithm.

## **Résumé**

L'un des défis de la surveillance de la santé structurale des grands ouvrages, consiste à fournir un modèle numérique de référence précis et fiable pour prédire le comportement de la structure réelle pendant sa durée de vie.

Le barrage de Mahouane a été choisi pour mener la présente étude. Un modèle en éléments finis a été élaboré puis recalé pour servir de référence. Comme ce barrage est constitué de plusieurs couches de matériaux avec des caractéristiques différentes, il est relativement compliqué de recaler le comportement de l'ensemble de ces matériaux. A cet effet, une méthode basée sur l'intelligence artificielle a été adoptée dans la procédure de recalage, utilisant un algorithme génétique approprié pour de tels problèmes inverses avec des fonctions multi-objectifs.

Des modèles numériques du barrage avec différents niveaux de détails ont été élaborés et contre-vérifiés. Le modèle bidimensionnel (2D) a été choisi pour le calage, car il représente avec précision relativement correcte le comportement global du barrage dans le sens transversal et il est moins coûteux en termes de calcul.

Pour constituer les données expérimentales de calage, des séries d'essais de vibrations ambiantes in-situ ont été effectuées pour identifier les propriétés modales de la structure réelle (fréquences naturelles) utilisées comme base de données pour le modèle numérique de référence représentant l'état initial.

La structure comporte six modules élastiques correspondant aux différents matériaux constituant le barrage. Dans la procédure suivie, l'algorithme génétique génère d'abord une population initiale en utilisant des sélections aléatoires à partir d'intervalles ayant cinq valeurs discrètes de chacun des six modules élastiques. Ensuite, l'algorithme génétique est appliqué pour croiser et muter les individus de la population après plusieurs itérations. Par la suite choisir dans chacune des itérations, les meilleurs individus pour les prochains parents jusqu'à la dernière itération qui converge vers une meilleure corrélation. Les fonctions « Objectif » de l'algorithme sont une combinaison d'erreurs dans l'évaluation des s fréquences fondamentales cibles.

Les résultats obtenus montrent que l'algorithme génétique est très efficace pour optimiser les paramètres et converge en quelques itérations vers une solution optimale.

## **Mots clés**

Barrage, Surveillance, Modèle Numérique, Eléments Finis, Identification Modale, Vibrations Ambiantes, Calage, Algorithme Génétique

# Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

INTRODUCTION GENERALE .....	14
CHAPITRE I SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE .....	17
I.1 Introduction : .....	18
I.2 Généralités sur les barrages : .....	18
I.3 Choix du site : .....	19
I.4 Type des barrages : .....	19
I.4.1 Barrages en béton : .....	20
I.4.2 Barrages en remblai : .....	21
I.4.2.1 Avantages des barrages en remblai .....	22
I.4.2.2 Stabilité des barrages en remblais : .....	24
I.4.2.2.1 Mécanismes de rupture : .....	24
I.4.2.2.2 Analyse des paramètres de stabilité : .....	25
I.4.3 Auscultation des barrages en remblai : .....	26
I.5 Surveillance de la santé structurale (SHM) : .....	28
I.5.1 Définition de la SHM : .....	28
I.5.2 Les approches SHM : .....	29
I.5.2.1 Non-Destructive Testing (NDT) .....	29
I.5.2.2 Problème direct : .....	29
I.5.2.3 Problème inverse : .....	30
I.5.2.4 Surveillance locale et globale : .....	31
I.5.2.4.1 Les techniques de détection locale : .....	31
I.5.2.4.2 Les techniques globales basées sur les vibrations : .....	31
I.5.2.5 Essais d'identification des caractéristiques structurelles : .....	31
I.5.2.5.1 Les essais de vibrations ambiantes : .....	32
I.5.2.5.2 Les essais de vibration forcée : .....	32
I.5.2.6 Techniques d'identification modale : .....	32
I.5.2.6.1 Introduction : .....	32
I.5.2.6.2 Domaine temporel : .....	33
I.5.2.6.3 Domaine Fréquentiel : .....	33
I.5.2.6.4 Domaine temps-fréquence : .....	34

## Table des matières

---

I.6	Le calage des modèles EF : .....	34
I.6.1	Le calage pour la détection des dommages : .....	35
I.6.1.1	Techniques de détection des dommages : .....	35
I.6.1.2	Procédure de calage d'un modèle numérique: .....	35
I.6.1.3	Méthodes intelligentes : .....	36
I.6.1.3.1	Réseaux de neurones (NN) : .....	36
I.6.1.3.2	Algorithme génétique (GA) : .....	37
I.7	Les issues de l'étude bibliographique : .....	38
CHAPITRE II	MODÉLISATION NUMERIQUE .....	39
II.1	Introduction .....	40
II.2	Présentation du barrage Mahouane : .....	40
II.2.1	Caractéristiques géométriques du barrage .....	41
II.2.2	Caractéristiques physiques des matériaux constitutifs .....	41
II.3	Modélisation numérique .....	42
II.3.1	Comportement des matériaux .....	42
II.3.2	Modèle en déformations planes et effet tridimensionnel .....	43
II.4	Calcul de la fréquence fondamentale par la formule simplifiée .....	44
II.4.1	Introduction .....	44
II.4.2	Evaluation de la fréquence fondamentale du barrage : .....	44
II.5	Modélisation EF et analyse numérique .....	46
II.5.1	Présentation du modèle 2D .....	46
II.5.1.1	Analyse modale du modèle numérique bidimensionnel .....	47
II.5.1.1.1	Modèle 2D avec fondation .....	48
II.5.1.1.2	Modèle 2D sans fondation .....	50
II.5.2	Présentation du Modèle 3D .....	52
II.5.2.1	Analyse modale .....	54
II.6	Interprétation des résultats finaux : .....	56
II.7	Conclusion : .....	57
CHAPITRE III	Essais de vibrations ambiantes .....	58
III.1	Introduction : .....	59
III.2	Particularité des essais de vibrations ambiantes : .....	59
III.3	Source d'excitation .....	59
III.4	Identification modale .....	60
III.4.1	Hypothèses et principe de la méthode .....	60

## Table des matières

---

III.4.2	Technique d'identification.....	60
III.4.2.1	Domaine fréquentiel.....	60
III.4.2.2	Fonction de Réponse en Fréquence.....	60
III.4.2.2.1	Identification modale par la FRF :.....	61
III.4.2.3	Identification des pics (Peak Picking).....	61
III.5	Procédure des mesures des vibrations ambiantes.....	62
III.5.1	Emplacement des mesures :.....	62
III.5.2	Instrumentation.....	64
	Station d'acquisition des données.....	66
III.5.3	Traitement de signal :.....	67
III.5.3.1	Logiciel Géopsy.....	67
III.5.3.2	Traitement dans le domaine fréquentiel.....	68
III.5.4	Paramètres d'enregistrement des vibrations ambiantes.....	68
III.6	Résultats des mesures expérimentales.....	69
III.7	Conclusion :.....	72
CHAPITRE IV	Calage du modèle numérique.....	73
IV.1	Introduction :.....	74
IV.2	Justesse des modèles numériques :.....	74
IV.3	Principe du calage :.....	74
IV.4	Corrélation des résultats numériques et expérimentaux :.....	74
IV.4.1	Direct Natural Frequency Correlation.....	75
IV.4.2	Frequency Response Function Correlation :.....	75
IV.5	Méthode bio-inspirée :.....	76
IV.5.1	Historique :.....	76
IV.5.2	Particularité :.....	77
IV.5.3	Dérivées des AE :.....	77
IV.6	Algorithme génétique :.....	77
IV.6.1	Optimisation par les AGs :.....	78
IV.6.2	Domaine d'application :.....	78
IV.6.3	Aspect de l'algorithme génétique :.....	78
	☒ La mise en œuvre de la représentation génétique.....	78
IV.6.4	Procédés des AGs.....	81
IV.7	Approches adoptées pour le calage du modèle numérique.....	81
IV.7.1	Sélection des fréquences cibles :.....	81

## Table des matières

---

IV.7.1.1	Corrélation entre fréquences numériques et fréquences expérimentales :	82
IV.7.2	Approche algorithmique .....	83
IV.7.2.1	Principe de l'approche .....	83
IV.7.2.2	Méthode « Tank » : .....	83
IV.7.2.3	Algorithme génétique : .....	83
IV.7.2.3.1	Discussion des résultats : .....	88
IV.8	Conclusion .....	88
CONCLUSIONS .....		89
ET PERSPECTIVES.....		89
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....		92
ANNEXE	Code Matlab de l'algorithme génétique .....	95

## Liste des tableaux

Tableau I-1 Coefficient de sécurité .....	26
Tableau I-2 Présentation de la SHM .....	28
Tableau II-1 Caractéristiques du barrage .....	41
Tableau II-2 Caractéristiques des matériaux.....	42
Tableau II-3 Fréquence fondamentale du barrage.....	45
Tableau II-4 Résultats du calcul des fréquences propres.....	48
Tableau II-5 Fréquences propres du modèles (2D) avec fondation .....	49
Tableau II-6 Fréquences propres du modèles (2D) sans fondation .....	51
Tableau II-7 Modes propres du modèle 3D.....	54
Tableau II-8 Correspondance des modes des modèle 2D et 3D.....	55
Tableau III-1 Avantages et les Inconvénients des FRF .....	61
Tableau III-2 Paramètres d'enregistrement de l'essai de vibrations ambiantes.....	68
Tableau III-3 Fréquences expérimentales issues du « Peak Picking ».....	71
Tableau IV-1 Taux de participation massique du modèle 2D pour un module élastique minimal.....	82
Tableau IV-2 Taux de participation massique du modèle 2D pour un module élastique maximal.....	82
Tableau IV-3 Paramètres obtenus pour un parent de la dernière génération .....	87
Tableau IV-4 fréquences modales sont pour les 13 premiers modes.....	87

## Liste des figures

Figure I-1 Disposition d'un barrage déversant.....	18
Figure I-2 schéma type d'un barrage sur site.....	19
Figure I-3 Les types de barrage en béton.....	20
Figure I-4 Coupe type des barrages en béton.....	21
Figure I-5 Illustration des différents types de barrages en remblai.....	22
Figure I-6 les différents types de barrage en remblai.....	23
Figure I-7 Coupes schématiques des différents types de barrages en remblai.....	24
Figure I-8 Dispositifs d'auscultation pour un barrage en remblai.....	26
Figure I-9 les paramètres d'un problème direct.....	30
Figure I-10 Distinction entre problème direct et inverse.....	30
Figure I-11 processus de calage.....	36
Figure I-12 Représentation d'un neurone.....	36
Figure I-13 Représentation de Multi-layer Perceptron.....	37
Figure I-14 Organigramme des algorithmes génétiques.....	38
Figure II-1 Procédure de l'analyse du modèle numérique en EF.....	40
Figure II-2 Présentation du barrage de Mahouane.....	41
Figure II-3 Comparaison de la réponse tridimensionnelle et en déformation plane d'un barrage dans un canyon triangulaire ou rectangulaire.....	43
Figure II-4 Modèle pour résonateur simple à un seul degré de liberté.....	44
Figure II-5 Coupe type du barrage Mahouane.....	46
Figure II-6 Les différentes Variantes du modèle 2D.....	47
Figure II-7 Comparatif des fréquences fondamentales.....	48
Figure II-8 Modèle (2D) de mailles raffinées avec fondation.....	48
Figure II-9 Déformées modales du modèle 2D avec fondation.....	50
Figure II-10 Modèle (2D) de mailles raffinées sans fondation.....	50
Figure II-11 Déformées modales du modèle 2D sans fondation.....	52
Figure II-12 Modèle 3D.....	53
Figure II-13 Vue en perspective du modèle 3D.....	53
Figure II-14 Déformées modales du modèle 3D.....	54
Figure II-15 Comparaison entre fréquences du modèle 2D et 3D.....	55
Figure II-16 exemple de correspondance modale entre 2D et 3D.....	56
Figure II-17 Fréquences fondamentales issues de la modélisation numérique.....	56
Figure III-1 Dualité domaine temporel-fréquentiel.....	60
Figure III-2 Procédure de l'essai de vibrations ambiantes.....	62
Figure III-3 Vue en plan représentant l'ensemble des points de mesures.....	63
Figure III-4 Coupe transversale du barrage représentant les points de mesures.....	63
Figure III-5 Points mesure sens « Rive-Rive ».....	63
Figure III-6 réalisation de l'essai.....	64
Figure III-7 Sismomètre et station demesures.....	64
Figure III-8 Sismomètre LE-3Dlite.....	65
Figure III-9 Sismomètre LE-3D/5s.....	65

## Liste des figures

---

Figure III-10 Station City Shark II .....	66
Figure III-11 Interface du logiciel d'acquisition « Geopsy ».....	67
Figure III-12 Traitement du signal brut .....	69
Figure III-13 Les FRF du point de mesure «1».....	69
Figure III-14 FRF du Point de mesure (1) sur la crête suivant Z .....	70
Figure III-15 FRF du point de mesure (1) suivant X.....	70
Figure III-16 Représentation des FRF expérimentales.....	71
Figure IV-1 Formulation des AGs .....	76
Figure IV-2 Organigramme des AEs .....	77
IV-3 Représentation d'une population génétique.....	79
Figure IV-4 Opérateur de croisement.....	80
Figure IV-5 Opérateur de mutation.....	80
Figure IV-6 Démarche d'un AG.....	81
Figure IV-7 Représentation graphique d'un intervalle de E discrétisé .....	83
Figure IV-8 Processus de génération de population.....	85
Figure IV-9 Organigramme de l'AG.....	86
IV-10 Convergence de l'erreur cumulée.....	86

# **INTRODUCTION GENERALE**

### **Introduction :**

Les modèles numériques occupent une place importante dans le domaine de l'ingénierie puisqu'ils permettent de projeter le comportement futur des nouvelles structures avant leur construction, et d'assurer également la surveillance structurelle des ouvrages existants. Pour ce faire, ces modèles doivent être les plus représentatifs possible de la structure étudiée. Hormis les caractéristiques géométriques, les propriétés statiques et dynamiques sont d'une importance capitale pour reproduire fidèlement le comportement des structures. Pour cela différentes méthodes de calage numérique ont été mises au point par de nombreux ingénieurs et chercheurs, dont celles basées sur les algorithmes génétiques, une approche qui sera adoptée dans le présent travail.

Le projet s'intitule : Identification et recalage du barrage de Mahouane par vibrations ambiantes et algorithme génétique. Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de fin d'étude proposé conjointement par l'Ecole Nationale Polytechnique et le Bureau d'Études TRACTEBEL Engineering France.

### **Problématique :**

La surveillance et le suivi de l'état de santé des structures au cours de leur durée de service sont primordiaux en termes de procédure d'investigation et d'auscultation de la tenue (comportement) et la fonctionnalité de la structure. La dualité structure-environnement, repose sur un état de « santé » de référence supposé sain. Les caractéristiques dynamiques initiales de cet état de référence constituent une base de données adoptée dans le modèle numérique représentatif de la structure réelle.

La réponse des ouvrages à réelles soumises à des charges dynamiques telles que : tremblement de terre, vent fort et explosion, est simulée par des modèles numériques aux éléments finis variant en complexité, et représentant une certaine idéalisation de la structure réelle. L'appréciation des résultats de la simulation numérique dépend de la disponibilité des résultats des essais in-situ tels que les vibrations ambiantes. L'obtention de ces résultats, passe essentiellement par deux étapes à savoir l'acquisition et l'analyse de données pour l'extraction de paramètres modaux tels que les fréquences naturelles et les formes modales.

Les enjeux économiques ou sociaux actuels exigent de considérer des objets de plus en plus complexes. Les modèles deviennent donc de plus en plus complexes et globaux, ce qui est rendu possible d'une part par les avancées théoriques et algorithmiques, et d'autre part par la montée en puissance exponentielle des ordinateurs.

Le développement d'algorithmes d'optimisation complexes (algorithmes génétiques,...) permet d'aller encore plus loin dans l'utilisation de la modélisation.

La problématique posée dans cette étude consiste à étudier la possibilité d'utiliser des algorithmes génétiques pour répondre à un problème inverse : voulant obtenir telle ou telle propriété (ex. : fréquences, déformations modales) quelles valeurs donner aux paramètres (ex. : modulé d'élasticité) du problème en question ?

### **Objectif :**

La procédure de calage d'un modèle numérique en éléments finis (EF) est nécessaire dans le but d'établissement d'un état initial d'une structure de telle manière à ce qu'il soit prédictif, c'est-à-dire qu'il permette de prévoir dans une certaine mesure le résultat d'une expérience. Cette prédictibilité peut avoir un caractère qualitatif ou quantitatif selon que le modèle se contente de prévoir un certain comportement ou qu'il permet de prédire la valeur de telle ou telle grandeur mesurable. A cet effet, nous nous sommes intéressés dans cette étude, essentiellement aux différentes approches adoptées pour l'identification modale et le calage d'un modèle numérique de barrage.

### **Approche :**

Etant donné que la validité des résultats de calage dépend fortement du choix des valeurs fixées pour les caractéristiques du modèle numérique, nous avons opté pour une approche des algorithmes évolutionnaires faisant partie du champ de l'Intelligence Artificielle (IA), ; les algorithmes génétiques. Les algorithmes génétiques en tant qu'approche d'optimisation, paraissant concilier au mieux puissance, généralité et facilité de programmation. Ces algorithmes, sont exploités en instaurant un système servant de passerelle entre la simulation du modèle numérique EF simplifié (bidimensionnel) du barrage et les données issues des essais de vibrations ambiantes.

### **Organisation du projet de mémoire :**

Afin d'explicitier les différentes notions et approches relatives à la thématique de notre projet, le travail a été organisé en quatre (04) chapitres.

Enchaînant la présente introduction générale, le premier chapitre s'agit d'une synthèse bibliographique abordant quelques notions élémentaires sur les barrages en général en première partie et mettant l'accent sur des notions de surveillance de l'état de santé structurelle (SHM), l'identification modale et la procédure du calage.

Le deuxième chapitre est dédié à la simulation numérique de plusieurs variantes de modèle numérique aux éléments finis, partant du modèle bidimensionnel avec un maillage simple au plus raffiné jusqu'au modèle tridimensionnel représentant du barrage de Mahouane.

Le troisième chapitre explicite le procédé de la collecte, l'acquisition et l'analyse des données issues des essais de vibrations ambiantes réalisés sur le barrage.

Le quatrième et dernier chapitre dévoile le concept et l'application des algorithmes génétiques pour le calage du modèle numérique aux éléments finis.

A l'issue de cette étude, une synthèse de l'ensemble des travaux réalisés est présentée portant sur la procédure de calage du modèle numérique à l'aide des algorithmes génétiques, et les perspectives qui en découlent.

**CHAPITRE I**  
**SYNTHESE**  
**BIBLIOGRAPHIQUE**

### I.1 Introduction :

Ce chapitre introductif met en évidence les différentes notions et méthodes relatives à la thématique de ce projet en abordant les aspects des barrages en remblai, de la surveillance de l'état structurelle et du calage.

### I.2 Généralités sur les barrages :

L'homme de tout temps et de toute civilisation a cherché à domestiquer l'eau par des dérivations, des canaux pour la conserver, l'utiliser ou s'en protéger en période de crues

Un barrage est un ouvrage d'Art placé en travers d'un cours d'eau, destiné à retenir et stocker de l'eau ou à la dériver. Il forme avec le terrain sur lequel il est construit un ensemble indissociable : à chaque site, un type de barrage, un dimensionnement adapté tant sur le plan technique qu'économique. C'est pourquoi il n'existe pas de barrage type standard.

Le barrage doit être pourvu d'un dispositif qui permette de laisser passer l'eau que la retenue ne peut stocker, en particulier celle des crues. 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, organe de sécurité, appelée bonde dans les étangs des temps anciens. Cette vidange 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 (**figure I-1**).

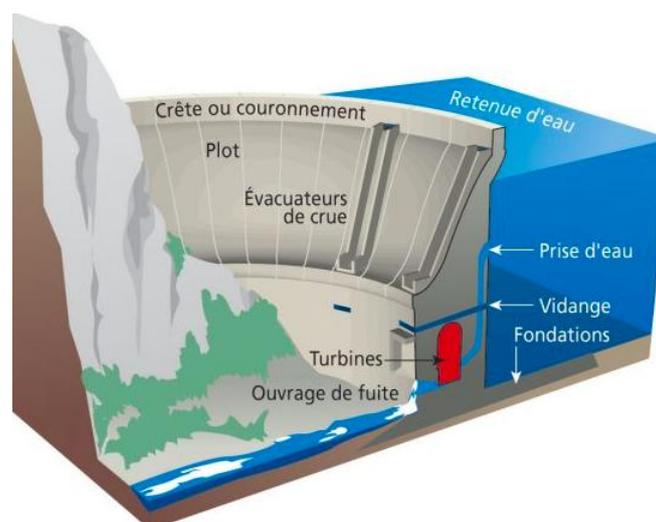


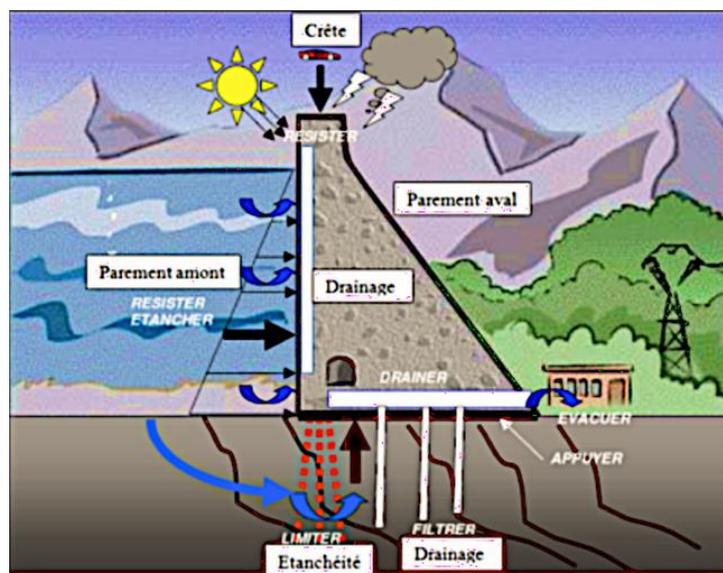
Figure I-2 Disposition d'un barrage déversant

### I.3 Choix du site :

Les principaux paramètres à prendre en compte dans le choix du site sont les suivants [1] :

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

La **figure I-2** ci-dessous représente un schéma type d'un barrage sur site :



**Figure I-3** schéma type d'un barrage sur site

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

### I.4 Type des barrages :

La forme de la vallée, la nature du sol, les matériaux à disposition sur le site déterminent le type de barrage. Les barrages sont construits en béton ou en maçonnerie ; les digues (ou barrages en remblai) sont en terre ou en enrochement.

Les barrages peuvent être classés en deux groupes [2] :

- 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.

### I.4.1 Barrages en béton :

La **figure I-3** suivante décrit les types de barrages en béton :

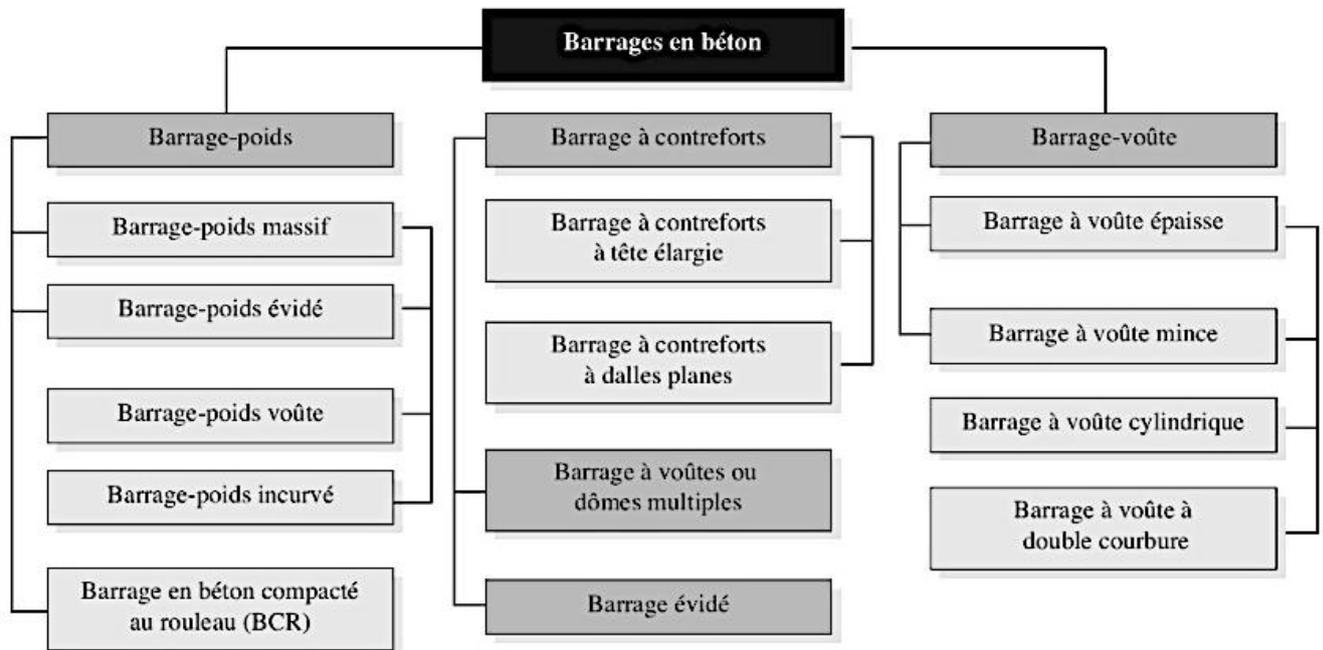


Figure I-4 Les types de barrages en béton.

Les barrages en béton se regroupent principalement en (03) groupes :

- **Barrages voûtes :**

Ils résistent à la poussée de l'eau par leur forme qui leur permet de répercuter la poussée hydrostatique sur la fondation par des arcs travaillant en compression. La voûte des ouvrages de faible hauteur, peut être très mince et présente une simple courbure.

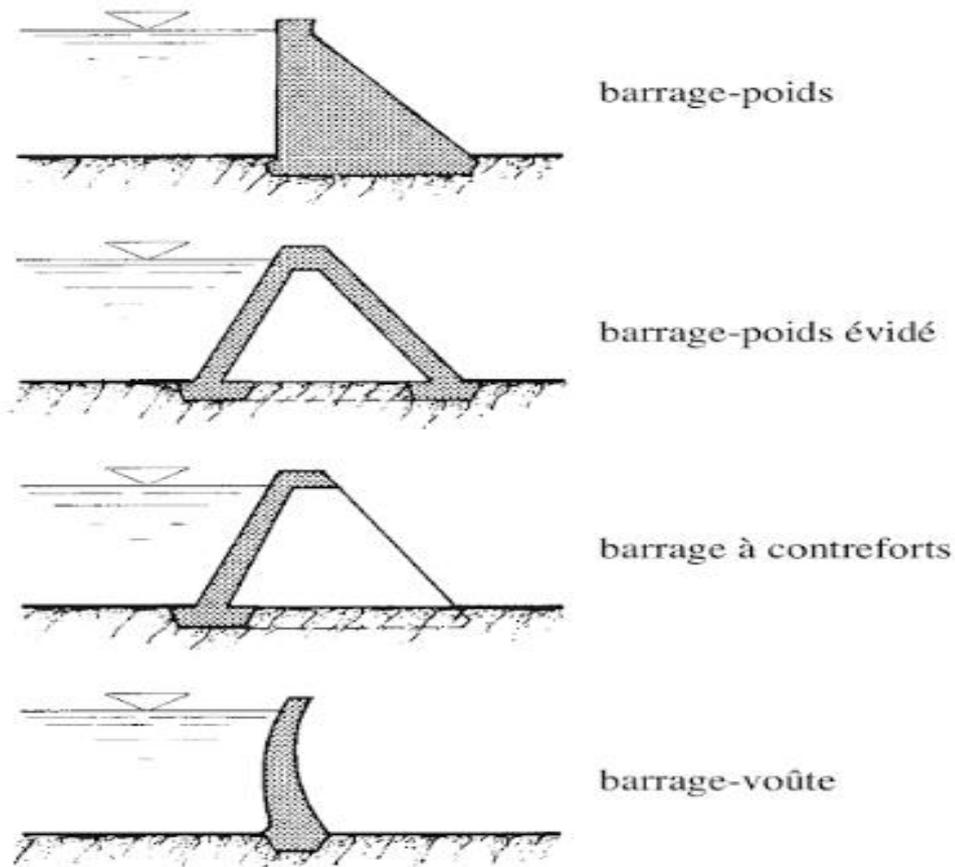
- **Barrages poids :**

Par leur poids et par leur section trapézoïdale, ils résistent à la poussée de l'eau. Tout comme les barrages en maçonnerie, les barrages en béton sont des ouvrages rigides et en conséquence leur conception sera aussi conditionnée par la qualité des fondations.

- **Barrages à contreforts :**

Ils sont composés d'un voile en béton armé et d'une série de contreforts destinés à reprendre la poussée de l'eau et à la transmettre à la fondation.

La **figure I-4** suivante montre la coupe type des barrages en béton:



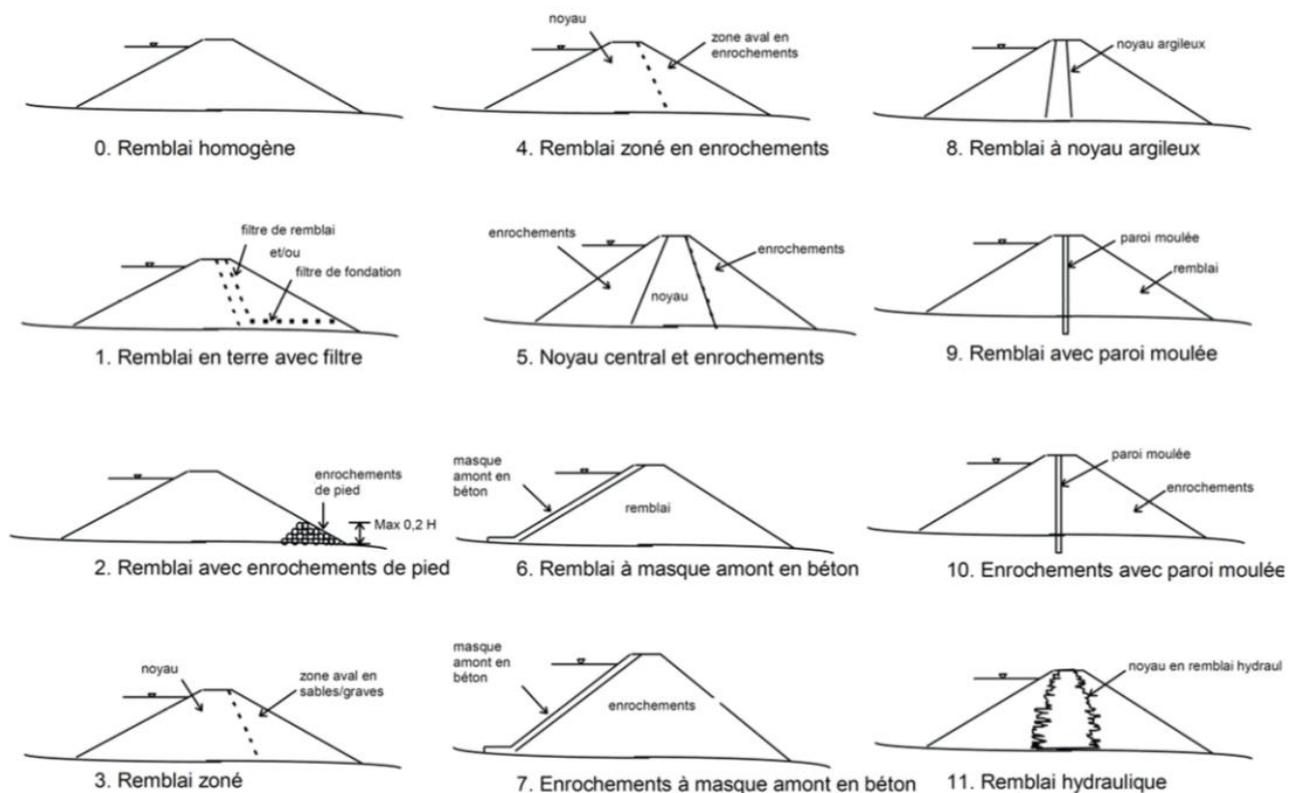
**Figure I-5** Coupe type des barrages en béton

### **I.4.2 Barrages en remblai :**

Les barrages en remblai peuvent être constitués de matériaux très divers et mis en place suivant des configurations différentes. Leur hauteur peut également être très variable : certains de ces ouvrages dépassent 300 m. Cependant la plupart des barrages en remblai ont une hauteur de quelques mètres à une trentaine de mètres. Ils sont souvent destinés au soutien d'étiage, à l'irrigation, à l'écrêtement des crues ou encore à l'alimentation en eau potable. Les ouvrages en remblai sont rarement destinés à l'hydroélectricité, contrairement aux barrages en béton de hauteur plus importante.

Le type de barrage en remblai à mettre en place sur un site donné dépend essentiellement de la qualité et de la quantité des matériaux présents sur le site. La mise en place d'un barrage homogène n'est pas possible lorsqu'on constate l'hétérogénéité des matériaux en place et/ou lorsque le volume de matériau étanche est trop faible pour constituer tout le corps de l'ouvrage [7]. En fonction des matériaux disponibles, la structure de l'ouvrage est choisie afin que le barrage en remblai soit stable, étanche, bien drainé et protégé des agents extérieurs[7].

La **figure I-5** suivante illustre les différents barrages en remblai :



**Figure I-6** Illustration des différents types de barrages en remblai

### I.4.2.1 Avantages des barrages en remblai

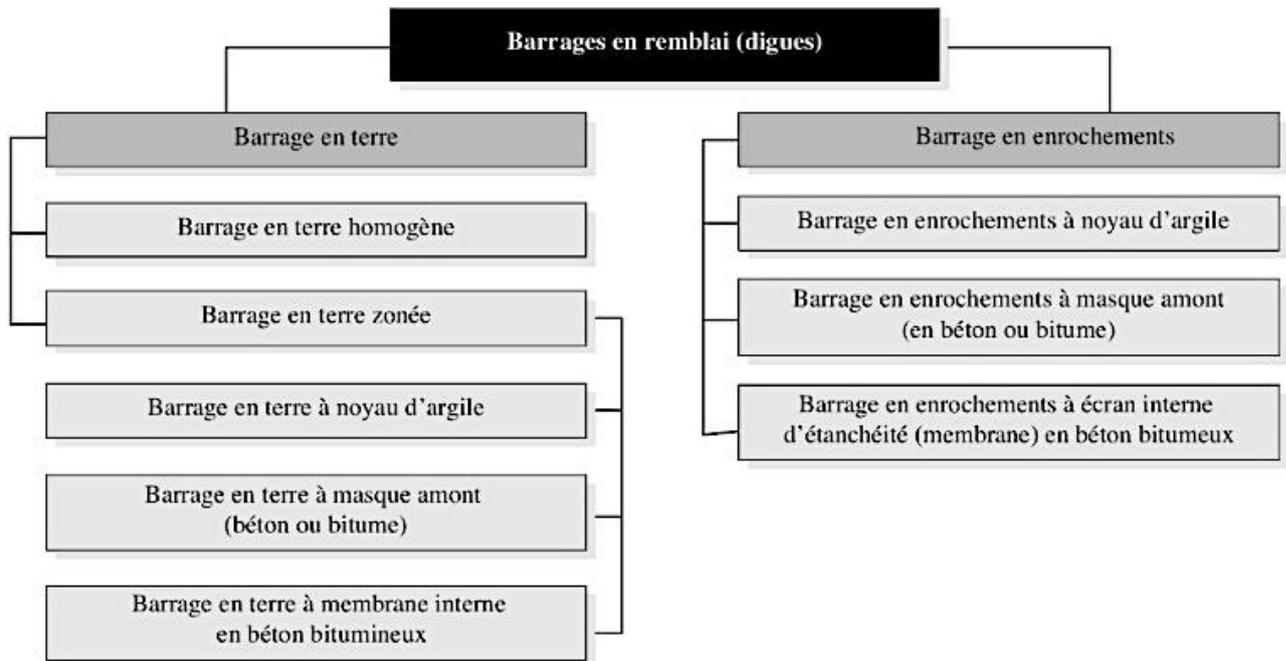
Par rapport aux barrages en béton, les barrages en remblai représentent les avantages suivants[2] :

- La grande majorité, voire la totalité, des matériaux constituant le corps du barrage proviennent des zones d'emprunts situées à proximité du site ;
- La mise en œuvre des matériaux peut être fortement mécanisée et les cadences très importantes, même si le volume à mettre en place est sensiblement plus important ;
- La sollicitation de la fondation (contraintes) est beaucoup plus faible ;

Ces deux dernières sont essentielles pour le choix du type de barrage. Certains types de barrage en remblai peuvent être placés aussi bien sur une fondation rocheuse que sur une fondation en terrain meuble pour autant que la continuité de l'étanchéité soit assurée entre le barrage et la fondation

Ce type de barrage se distingue en deux catégories comme présenté sur la **figure I-6** ci-dessous.

La **figure I-6** suivante montre les différents types barrages en remblai :



**Figure I-7** les différents types de barrage en remblai.

- Les barrages en terre sont des murs de retenue d'eaux suffisamment étanches construits avec la terre et les matériaux du site suivant des mélanges et des proportions bien définies.

Il existe (03) types de barrage en terre :

- **Barrage homogène** : constitué d'un massif en terre compactée imperméable, muni d'un dispositif de drains dans sa partie aval et d'une protection mécanique contre l'effet du battillage dans sa partie amont.
  - **Barrage à noyau étanche** : La fonction d'étanchéité est assurée par un noyau étanche réalisé en matériau argileux ou bitumineux qui pourra être placé en amont du barrage ou au centre de celui-ci.
  - **Barrage à masque d'étanchéité** : Les barrages à masque sont constitués d'un remblai plus ou moins perméable assurant la stabilité d'ensemble. Un écran imperméable, appelé masque, classiquement réalisé en béton est mis en place sur le parement amont de façon à rendre le barrage étanche et lui permettre de retenir l'eau du réservoir.
- Un barrage en enrochement n'est rien d'autre qu'un tas de cailloux à grande échelle, qui résiste par sa masse aux efforts externes (pression d'eau) et aux efforts internes (Frottement/Cohésion) auxquels il est soumis. Mais n'étant pas étanche par lui-même, il faut lui adjoindre un organe d'étanchéité qui constitue la partie la plus délicate, aussi bien au stade du projet qu'à celui de la réalisation.

Les différentes coupes schématiques des barrages en remblai sont représentées dans la figure I-7.

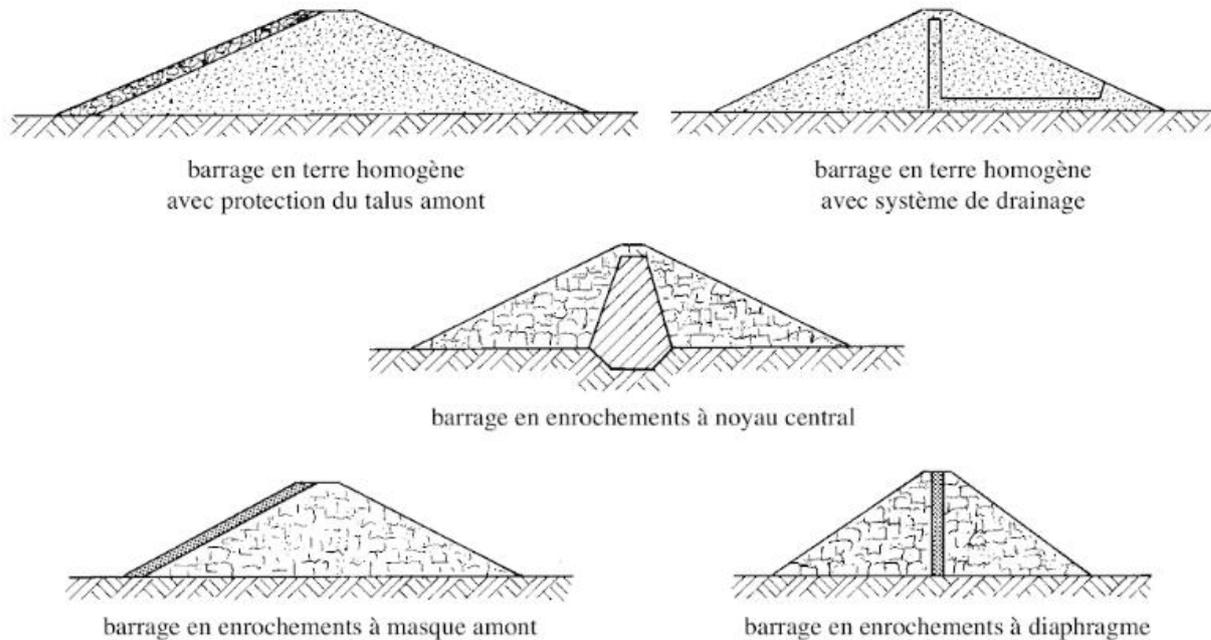


Figure I-8 Coupes schématiques des différents types de barrages en remblai

### I.4.2.2 Stabilité des barrages en remblais :

#### I.4.2.2.1 Mécanismes de rupture :

Les barrages en remblai (ouvrages en terre et en enrochements) représentent la majorité des grands ouvrages présents dans le monde, auxquels s'ajoute des kilomètres de digues de protection contre les inondations et de digues de canaux qui constituent également des ouvrages hydrauliques dont la rupture s'apparente à celle des barrages en remblai

L'analyse des ruptures d'ouvrages connues montre que le taux de rupture des barrages en remblai est deux fois supérieur à celui des barrages en béton [5]. De plus, par rapport aux autres types de barrages en béton ou en maçonnerie, les barrages en remblai se distinguent par une cinétique de rupture qui n'est pas instantanée mais progressive. La rupture se produit sur une période plus ou moins longue, sans effacement instantané d'une partie ou de tout l'ouvrage. Une rupture sur ce type d'ouvrage aura donc des conséquences relativement moins importantes que celle d'un barrage en béton ou en maçonnerie car des mesures d'évacuation de la population pourront être mises en place en fonction de la progression des désordres.

La modélisation de la rupture d'un ouvrage en terre est en ce sens plus compliquée puisqu'elle nécessite de prendre en compte, outre la propagation d'un hydrogramme à définir, des phénomènes complexes d'érosion, de transport de sédiments et de glissement.

Différents travaux d'analyse et de synthèse des cas de rupture ont permis à Singh [6] d'identifier 5 mécanismes majeurs de rupture des barrages en remblai :

- Surverse par débordement dû à des crues extrêmes
- Destruction par érosion interne (de type « renard » ou « piping »)
- Destruction par rupture de contrainte (« shear slide »)
- Destruction suite à des problèmes de fondation
- Destruction liée aux phénomènes sismiques
- Les deux premières causes seraient responsables à elles seules de plus de 60% des cas de rupture connus.

### I.4.2.2.2 Analyse des paramètres de stabilité :

Dans l'analyse de la stabilité des barrages en remblai, plusieurs hypothèses sont prises en compte[3]. L'analyse tient compte des éléments suivants :

- L'aspect structural du barrage (forme, pentes, nombre de bermes, section transversale et dimensions du plan) ;
- Caractéristiques géo-mécaniques des matériaux constructifs du barrage ;
- Les méthodes de collecte et d'élimination des eaux filtrées ;
- Conditions d'exploitation (variation du niveau d'eau en amont et en aval) ;
- Analyse des hypothèses qui reflètent le processus opérationnel, etc.

L'analyse de la stabilité des pentes d'un barrage en terre se fait à partir de deux hypothèses :

- Conception de la pente avec des paramètres mécanico-physiques connus du sol ( $\gamma$ ,  $\Phi$ ,  $c$ ) et les principaux critères fonctionnels imposés par les caractéristiques géométriques (hauteur, profondeur, largeur du couvert végétal). Les résultats du calcul indiquent la valeur de la pente dans des conditions stables ;
- Vérification de la stabilité de la pente exécutée avec une géométrie bien définie, pour estimer la réserve de stabilité[4].

La stabilité d'un barrage en terre est influencée par deux facteurs, phénomènes caractéristiques : les glissements de pente et l'eau filtrée à travers le barrage[3] .

Le **tableau I-1** ci-dessous, illustre le coefficient de sécurité admissible pour la stabilité de la pente :

**Tableau I-1 Coefficient de sécurité**

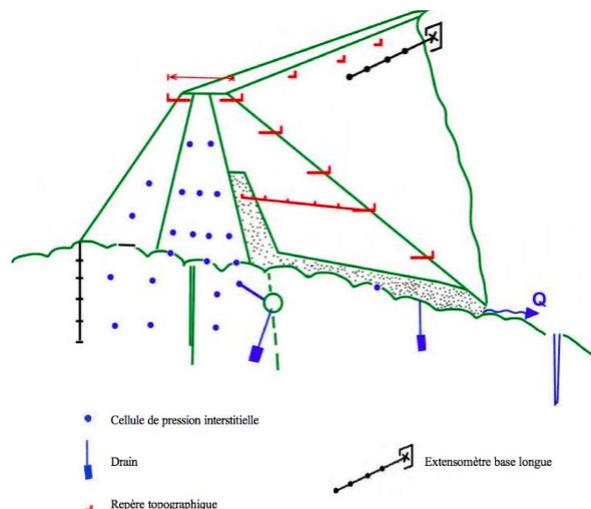
Action	Etat	Hypothèse de travail	Vérification de la pente	Facteur de sécurité admissible	
				Absence de séisme	Présence de séisme
fondamentale	Fin de construction	-	En amont	1,30	1,30
			En aval		
Accidentelle	En phase d'exploitation	Niveau de rétention maximale	En aval	1,50	1,20
		Rétention partielle	En amont	1,50	1,20
	Drainage soudain	Rétention normale	En amont	1,30	Non vérifié
		Rétention maximale	En amont	1,20	Non vérifié

### I.4.3 Auscultation des barrages en remblai :

La surveillance des barrages est basée sur l'inspection visuelle (qualitative) et l'auscultation (quantitative). Ces deux méthodes sont complémentaires [7]

L'auscultation est indispensable pour le suivi du barrage tout au long de la vie de l'ouvrage. C'est une composante de son comportement structurel et du contrôle de la sécurité. Elle est également précieuse pour faire enrichir les retours d'expérience et faire progresser ainsi la connaissance sur le comportement et le vieillissement des barrages.

L'auscultation permet de déceler les défauts et les défaillances de l'ouvrage à l'exploitant ce qu'il lui permet de prévoir les travaux de confortement nécessaire ou dans les cas extrêmes, d'entreprendre les mesures d'urgence assurant la protection des populations en aval.



**Figure I-9** Dispositifs d'auscultation pour un barrage en remblai

## CHAPITRE I: Synthèse bibliographique

---

Les mesures portent sur les sollicitations et sur la réponse de l'ouvrage. Les deux sollicitations principales sont la cote du plan d'eau et les précipitations [7] , [8] .

- **La cote du plan d'eau** : Mesurée par une échelle limnométrique (visuel) ou un limnimètre enregistreur (précision  $\approx$  centimètre) ;
- **Les précipitations** : Obtenues par un pluviomètre installé sur le barrage, relevé quotidiennement (précision  $\approx$  millimètre/jour). Il peut parfois être nécessaire de prendre en compte d'autres sollicitations : niveau aval, nappe de versant ou fonte des neiges.
- **Les séismes** : Obtenus par des enregistrements au rocher à proximité de l'ouvrage

La réponse de l'ouvrage est appréhendée par des mesures de déplacements et des mesures hydrauliques ; l'accélération d'un déplacement ou la montée brutale d'une pression d'eau sont des exemples de comportement qu'il est capital de déceler à temps

Les mesures de déplacements sont de trois types :

- **Les déplacements de surface** : mesurés par nivellement et planimétrie (tassements, mouvements amont/aval et rive/rive). Ces mesures mobilisent des compétences spécialisées, une fois ou deux fois par an ;
- **Les déplacements en profondeur** mesurés par des instruments installés le plus souvent lors de la construction (pendule, inclinomètre, élongamètre, extensomètre, distofofor, tassomètre) ;
- **Les déplacements relatifs** : le long d'un joint ou d'une fissure, quantifiés par des instruments le plus souvent installés à la demande (fissuromètre, vinchon).

Les mesures hydrauliques sont les suivantes :

- **Les débits de fuite** : mesurés par empotement (collecte chronométrée avec un récipient gradué) ou par seuil calibré (déversoir à seuil avec limnimètre, puis utilisation d'une loi de seuil pour estimer le débit). Ils concernent les drains, les puits de décompression, les zones de résurgence ;
- **Les charges hydrauliques** : mesurées par des piézomètres. Le piézomètre à tube ouvert est le système le plus simple et le plus robuste. Il est implanté dans le corps du barrage, dans la fondation, les rives ou en aval.
- **Les pressions interstitielles** : mesurées par des cellules de pression interstitielle, appareils de faible dimension installés lors de la construction dans le corps du barrage ou dans la fondation.

Il est indispensable de réaliser des mesures de manière continue dans le temps.

L'analyse comparée de l'évolution de plusieurs grandeurs est parfois indispensable pour conclure. C'est notamment le cas du couple pression interstitielle/débit de fuite. La diminution d'un débit de fuite est un exemple de comportement qui nécessite la connaissance de la piézométrie dans la zone concernée. Si celle-ci diminue, on peut conclure à un auto-colmatage du corps du barrage (phénomène rassurant). A contrario, si celle-ci augmente, on peut soupçonner un colmatage du dispositif de drainage (phénomène très inquiétant).

### I.5 Surveillance de la santé structurale (SHM) :

#### I.5.1 Définition de la SHM :

La surveillance de la santé structurale (Structural Health Monitoring) représente une réponse prometteuse aux exigences de la gestion et de l'entretien des structures. Après son application dans le domaine de la mécanique de précision[9], cette technique a marqué une diffusion croissante également dans le domaine du génie civil est liée à l'opportunité d'une évaluation rapide des dommages potentiels, du suivi de leur évolution et de l'acquisition presque en temps réel d'informations sur le niveau de sécurité de l'ouvrage lui-même.

La réduction des coûts d'inspection, la protection sismique, la possibilité de développer des scénarios post-séisme et de soutenir les opérations de sauvetage présentent quelques-uns des principaux avantages liés à la mise en œuvre de systèmes SHM efficaces.

Selon Aktan & al. (2000), la surveillance de la santé structurale est définie comme suit[10]:

*« the measurement of operating and loading, environment and the critical responses of a structure to track and evaluate the symptoms of operational incidents, anomalies, and/or deterioration or damage indicators that may affect operation, serviceability, or safety reliability". »*

En d'autres termes, la SHM est une mesure de diagnostic et de suivis sur le cours ou le long terme de l'état de santé de la structure susceptible aux conditions environnantes.

D'autre part, l'identification des dommages vise spécifiquement à identifier, localiser et quantifier les dommages qui pourraient survenir dans les structures. Strictement parlant, l'identification des dommages peut être considérée comme une tâche vitale de la surveillance de la santé structurale. Théoriquement, l'état de santé actuel d'une structure peut être compris en appliquant des techniques appropriées d'identification des dommages.

Ci-après le **tableau I-2** qui résume la procédure de la SHM[9]

**Tableau I-2 Présentation de la SHM**

#### **Structural Health Monitoring**

<b>Finalité</b>	État de la structure au moment de l'inspection, y compris l'existence, l'emplacement, la gravité et la durée de vie résiduelle des dommages.
<b>Objet</b>	Structure
<b>Model</b>	Mathématiques et physique
<b>Caractéristique mesurée</b>	Signaux dans le domaine temporel

<b>Type de capteur</b>	Accéléromètre, haute sensibilité
<b>Excitation</b>	Excitation externe, ambiante, aléatoire, non-stationnaire
<b>Algorithme</b>	Basé sur un modèle ou non basé sur un modèle
<b>Processeur</b>	Ordinateur

Une fois mise en place, une procédure SHM se veut idéalement globale [10] (dans le sens de couvrir l'ensemble de la structure ou une grande partie de celle-ci), automatisée, sans interaction humaine, rentable et capable de traiter efficacement les sous-problèmes de niveau I, II et III [11], à savoir la détection des dommages (simplement détecter leur présence), leur identification (identifier le type/nature et leur localisation) et leur évaluation (estimer l'ampleur des dommages)[11].

### **I.5.2 Les approches SHM :**

#### **I.5.2.1 Non-Destructive Testing (NDT)**

La SHM peut être considérée comme une évolution des procédures classiques d'essais non destructifs (Non-Destructive Testing (NDT)) (généralement basées sur les principes des ultrasons, de l'acoustique, de la radiographie, des courants de Foucault et du champ thermique[12]).

L'essai non destructif est cependant différent, en ce sens qu'il s'exerce à la demande (généralement sur une base périodique) sans capteurs permanents montés sur la structure et pas nécessairement de manière automatisée. Les essais non destructifs sont généralement effectués localement, ce qui nécessite un accès à proximité de l'endroit où l'on soupçonne un dommage, alors que la procédure est souvent longue et coûteuse[13].

#### **I.5.2.2 Problème direct :**

La solution préliminaire d'un problème dynamique direct fournit généralement des informations nécessaires à la conception d'un dispositif expérimental approprié pour l'identification et le calage du modèle d'une structure donnée. En particulier, la possibilité de développer un modèle structurel fiable, calibré expérimentalement, dépend fortement d'un certain nombre de facteurs : la complexité de l'échantillon testé (la structure réelle) et son comportement dynamique, les sources potentielles d'excitation, les équipements utilisés pour mesurer les vibrations et autres grandeurs physiques, les méthodes d'identification utilisées pour traiter les données bruyantes acquises. Par conséquent, la connaissance du comportement dynamique de la structure sous les excitations disponibles pendant les essais, c'est-à-dire le problème direct, enrichira la probabilité de succès de l'ensemble de la procédure[14]. **Figure I-9** ci-dessous :

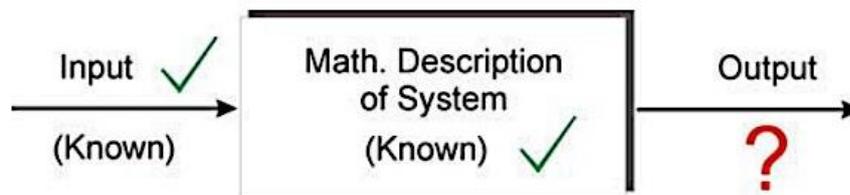


Figure I-10 les paramètres d'un problème direct

### I.5.2.3 Problème inverse :

Selon le schéma typique des problèmes inverses, le processus d'identification d'une structure sollicitée commence par la connaissance de sa réponse expérimentale (sortie) à une source d'excitation (entrée), et se termine par l'évaluation d'un modèle paramétrique. Le résultat de premier niveau à atteindre consiste généralement à obtenir un modèle numérique, défini par un ensemble de paramètres modaux, comprenant généralement les fréquences propres, les taux d'amortissement, les formes modales et les facteurs de participation modale. Ces informations, à différents stades d'exhaustivité, peuvent s'avérer suffisantes pour de nombreuses applications techniques[15].

Un défi de second niveau réside dans la reconstruction d'un modèle physique ou spatial, consistant en une distribution des propriétés mécaniques. Même pour les systèmes naturellement continus, les inconnues du problème peuvent être réduites à un ensemble fini de paramètres de rigidité, d'amortissement et de masse, par exemple, récurrents à la discrétisation par éléments finis pour limiter l'ordre du modèle[14]. Voir la **figure I-10** :

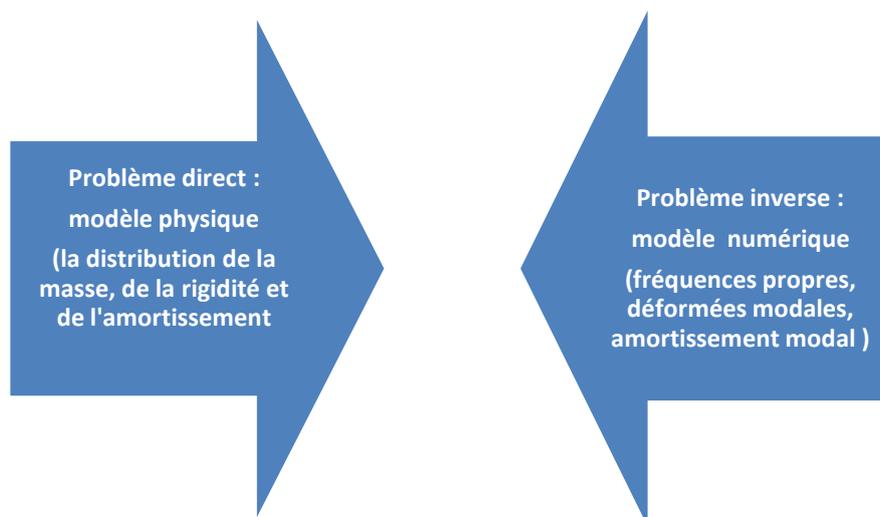


Figure I-11 Distinction entre problème direct et inverse

### **I.5.2.4 Surveillance locale et globale :**

Deux approches distinctes permettent d'atteindre l'objectif de surveillance de la santé structurale ou d'identification des dommages : les techniques de détection locales et les techniques globales basées sur les vibrations [16] :

#### **I.5.2.4.1 Les techniques de détection locale :**

Ce sont des méthodes expérimentales visuelles ou localisées telles que l'utilisation de rayons X, de jauges de contrainte, de fibres optiques, de vibrations ultrasonores, de courants de Foucault, d'émissions acoustiques, de mesures infrarouges et d'ondes de lambeaux. Ces techniques exigent une connaissance préalable du voisinage des dommages et la partie de la structure examinée par ces méthodes locales devrait être facilement accessible [17]

#### **I.5.2.4.2 Les techniques globales basées sur les vibrations :**

Ce sont des méthodes qui déterminent l'état de santé des structures par les changements dans leurs propriétés dynamiques ou leurs réponses. Cependant, les méthodes globales utilisent le fait que les dommages locaux, qui, par exemple, provoquent une réduction de la rigidité locale, ont une influence sur le comportement global de la structure entière en termes de temps et d'espace. Par exemple, la réduction de la rigidité entraîne une diminution des fréquences propres, qui ne sont pas des grandeurs locales (spatiales) mais plutôt temporelles. Des déformations statiques dues à une charge statique, des vibrations dues à des charges opérationnelles ou à des vibrations naturelles, peuvent être utilisées à cette fin. Ces méthodes, basées sur des vibrations à basse fréquence, surveillent l'ensemble du système en examinant les décalages des fréquences de résonance, les augmentations de l'amortissement ou les changements de modes de vibration. Ces modifications sont utilisées comme des caractéristiques extraites des données brutes et permettent de faire la distinction entre l'état intact et l'état endommagé de la structure. Les caractéristiques choisies doivent être sensibles aux dommages[18].

Il est généralement admis que les techniques locales et globales, ayant leurs propres avantages et limites, devraient se compléter et contribuer conjointement à un système de surveillance complet applicable aux ouvrages de génie civil. Bien que les techniques globales basées sur les vibrations aient le potentiel de détecter un événement et de localiser un emplacement approximatif de dommages structuraux possibles, ce sont les techniques de détection locales qui peuvent fournir une évaluation plus directe et précise de la gravité et de l'étendue des dommages.

### **I.5.2.5 Essais d'identification des caractéristiques structurelles :**

Les modèles utilisés dans l'analyse dynamique des structures sont des idéalizations créées pour présenter la réponse des structures réelles à diverses charges dynamiques (fort séisme, vent fort...). Ces modèles peuvent être vérifiés en réalisant des expériences sur les vibrations ambiantes et forcées en grandeur réelle[19]. Tous deux peuvent être utilisés pour identifier les caractéristiques structurelles (fréquences des vibrations, taux d'amortissement et déformées modales)

### **I.5.2.5.1 Les essais de vibrations ambiantes :**

Les vibrations ambiantes décrivent le comportement linéaire des structures, car les amplitudes de vibration sont faibles. Ils peuvent également être utilisés pour décrire le comportement linéaire des structures endommagées et de leurs composants, et peuvent aider à développer des modèles structurels et des algorithmes d'analyse dépendant du temps et de l'amplitude, pour une utilisation dans la surveillance de la santé structurelle et dans les études de contrôle structurel. Par conséquent, la mise au point de méthodes expérimentales pour la mesure in situ de la structure partiellement endommagée à pleine échelle est d'un intérêt considérable[20].

L'un des avantages de la vibration ambiante par rapport à l'étude des vibrations forcées est qu'en général, seul un équipement léger et un plus petit nombre d'opérateurs sont nécessaires. Les sources d'excitation sont le vent, les micro tremblements, les microséismes et diverses sources locales aléatoires et périodiques.

### **I.5.2.5.2 Les essais de vibration forcée :**

Ce type d'essai peut nécessiter des forces importantes pour produire des amplitudes de réponse utiles (plus grandes) des structures à pleine échelle. Le générateur de vibrations (un vibreur) est généralement situé sur le dessus de la structure. Cela conduit à une excitation plus importante des modes de vibration qui ont de grandes amplitudes aux niveaux supérieurs des structures. Egalement, le trajet des ondes se propageant à travers la structure est différent de ceux en cas de tremblement de terre, bruit ambiant ou excitation du vent et une interprétation prudente des résultats est nécessaire pour prendre en compte ces différences [21].

## **I.5.2.6 Techniques d'identification modale :**

### **I.5.2.6.1 Introduction :**

Les méthodes d'identification des paramètres modaux basées sur les vibrations se divisent généralement en deux catégories, selon qu'elles fonctionnent dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel. Cependant, la quantité d'informations disponibles est absolument indépendante du fait que les données soient représentées dans le domaine temporel ou fréquentiel. Malgré les questions discutées sur les avantages et les inconvénients relatifs aux deux approches, il est établi, du moins en partie, que, d'un point de vue théorique, " il existe une équivalence totale entre l'identification dans le domaine du temps et dans celui des fréquences " [22]. Ainsi, en principe, les deux approches ne devraient pas être considérées comme concurrentes l'une par rapport à l'autre en termes de performances potentielles, et un certain nombre d'études concluent que la meilleure méthode d'identification devrait être choisie en considérant plutôt les particularités structurelles attendues (densité modale élevée, rapports d'amortissement élevés, importance des non-linéarités), les résultats visés (ordre, intégralité, etc.) et enfin la nature (périodicité, stationnarité, qualité (rapport bruit-signal) des données disponibles [23].

### I.5.2.6.2 Domaine temporel :

Les méthodes du domaine temporel représentent depuis longtemps une norme pour l'analyse modale expérimentale en génie civil, en particulier dans les applications de mesures de type "output only" où les techniques classiques du domaine fréquentiel se révèlent généralement peu pratiques. Travaillant sur les signaux de mesure bruts au lieu de leurs transformées fréquentielles, disponibles dans une multitude de variantes allant des méthodes indirectes (modales) (par exemple, la réalisation de systèmes propres) aux méthodes directes (comme les techniques autorégressives), les méthodes temporelles peuvent éviter les biais de fuite et atteindre une bonne capacité de découplage modal et une résolution spectrale élevée, fournissant les meilleurs résultats quand une large gamme de fréquences ou un grand nombre de modes existe dans les données [23].

Les données de domaine temporel sont généralement applicables dans les situations suivante :

- Lorsque le système en question est dépendant du temps ;
- Dans un système non linéaire ; et
- Lorsque La propagation du bruit à large bande peut être traitée sans difficulté.

L'une des méthodes d'identification modale les plus courantes dans le domaine temporel est l'algorithme Eigensystem Realization Algorithm (ERA) [24]. Dans sa formulation originale, l'ERA exige des données de réponse libre (généralement obtenues par l'application de charges impulsives). Si celles-ci ne sont pas directement disponibles, comme c'est le cas lorsque la vibration ambiante est utilisée, la réponse libre doit être estimée à partir des mesures en « output only » afin que l'ERA soit applicable. Une telle estimation peut être réalisée, par exemple, en recourant à des algorithmes de décrémentation aléatoire (RD) ou à ce qu'il est convenu d'appeler les algorithmes des Techniques d'excitation naturelle (Natural Excitation Technique (NExT)) .

### I.5.2.6.3 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 [25], [26]. Le rapport réponse-excitation dans le domaine fréquentiel à chaque fréquence est appelé fonction de réponse en fréquence (FRF).

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 [27]. La première identification des paramètres modaux a été effectuée à l'aide de la procédure de « output only » connue sous le nom de fonction d'identification de modes complexes (CMIF) ou alternativement Décomposition du domaine fréquentiel (FDD) (Peeters et De Roeck 2001).

### I.5.2.6.4 Domaine temps-fréquence :

L'avantage du domaine temps-fréquence est que les domaines temps et fréquence sont affichés en même temps. Ceci s'applique aux signaux dont les caractéristiques changent en fonction du temps. Il existe de nombreux types de techniques temps-fréquence, notamment la transformée Wavelet (WT), la transformée de Fourier à court terme, la distribution de Gabor et la distribution de Wigner-Ville [27]. Le choix de l'une des techniques à utiliser dépend de l'application en question. Par exemple, la fonction de distribution de Wigner (WDF) est très claire en raison de la fonction d'auto-corrélation, mais la conséquence en est une lacune transversale. Par conséquent, l'analyse d'un signal à un seul terme en utilisant le WDF est bénéfique. Cependant, lorsque le signal a plusieurs composantes, la transformation de Gabor est préférable[25].

De plus, Wavelet est une fonction mathématique qui est appliquée pour décomposer un signal en temps continu en un certain nombre de composantes avec des plages de fréquences correspondant à chaque composante. Chaque composante est ensuite analysée avec une résolution correspondant à son échelle. L'avantage des techniques Wavelet (WT) est leur capacité à caractériser les fonctions qui ont des discontinuités et des pics prononcés. De plus, les WT sont capables de déconstruire et de reconstruire parfaitement les signaux non périodiques et non stationnaires.

## I.6 Le calage des modèles EF :

En raison de cette incohérence entre les données mesurées et les données des éléments finis, des méthodes de calcul ont été mises au point pour mettre à jour le modèle des éléments finis afin qu'il puisse prédire de près les résultats mesurés [25]. Les techniques mises au point pour mettre à jour le modèle par éléments finis se divisent en deux catégories : directes et itératives :

### ➤ Méthodes directes :

Ces méthodes mettent à jour le modèle par éléments finis sans tenir compte des modifications des paramètres physiques. Pour cette raison, les méthodes directes tendent à donner des modèles qui représentent les paramètres mesurés sans égard à la structure analysée. Il en résulte des matrices de masse et de rigidité qui ont peu de signification physique et qui ne peuvent être reliées à des changements physiques dans les éléments finis du modèle original.

### ➤ Méthodes itératives :

Pour ce type de méthodes les paramètres physiques sont mis à jour jusqu'à ce que le modèle par éléments finis reproduise les données mesurées avec un degré de précision suffisant. En raison de cette nature des méthodes itératives, elles donnent des modèles par éléments finis qui assurent la connectivité des nœuds et ont des matrices de masse et de rigidité qui ont une signification physique.

### I.6.1 Le calage pour la détection des dommages :

#### I.6.1.1 Techniques de détection des dommages :

Les techniques communes utilisées dans les études de détection des dommages par vibration sont brièvement résumées ci-dessous. Un résumé plus détaillé se trouve dans (Doebling, et al., 1996) [24] .

- Propriétés basiques modales
- Variation de la forme des déformées modales
- Mesure dynamique de la flexibilité
- Méthodes non-linéaire

Une autre catégorie de méthodes d'identification des dommages est fondée sur des caractéristiques liées aux changements des indices de masse, de rigidité et de matrice d'amortissement qui ont été corrélés de sorte que le modèle numérique représente les propriétés dynamiques identifiées (fréquences de résonance, amortissement modal et vecteurs de forme de mode) des structures saines et endommagées, respectivement. Ces méthodes permettent de résoudre les matrices mises à jour (ou les perturbations du modèle nominal qui produisent les matrices mises à jour) en formant un problème d'optimisation contraint basé sur les équations du mouvement définissant le système structurel, le modèle nominal et les propriétés modales identifiées [28].

Les comparaisons des indices matriciels qui ont été corrélés avec les propriétés modales identifiées à partir de la structure endommagée aux indices matriciels corrélés d'origine fournissent une indication sur les dommages qui peuvent être utilisés pour quantifier l'emplacement et l'étendue de ces derniers.

L'inadéquation entre les degrés de libertés du modèle numérique et les points de mesure peut constituer un obstacle majeur à l'exécution du calage des matrices en question.

#### I.6.1.2 Procédure de calage d'un modèle numérique:

Un modèle mathématique, le plus souvent un modèle d'éléments finis, est d'abord construit sur la base d'une connaissance préalable de la structure. Certaines caractéristiques sélectionnées sont ensuite simulées et comparées aux caractéristiques correspondantes obtenues à partir des mesures. Les différences entre les deux ensembles de caractéristiques indiquent que le modèle mathématique s'écarte de la structure réelle et qu'une procédure de mise à jour est nécessaire sur ce modèle numérique pour concilier ces différences. Une fois les différences entre les deux ensembles de caractéristiques minimisées, une comparaison entre le modèle sain et le modèle calibré révélerait alors l'existence, l'emplacement et la gravité des dommages. Compte tenu d'un modèle et de ses caractéristiques, le calage du modèle peut être considéré comme un problème d'optimisation.

Doebling et al. (1996) ont décrit trois grandes catégories de méthodes de calage [29] :

- La mise à jour de la matrice optimale,
- Le calage fondé sur la sensibilité
- La méthode d'affectation de la structure propre.

Les caractéristiques typiques choisies à cette fin comprennent les fréquences modales, les formes des modes et les Fonctions de Réponse en Fréquence (FRF). Normalement, le processus de calage est un problème inverse « mal conditionné » [15] dans lequel le nombre de caractéristiques n'est pas égal au nombre de paramètres susceptibles d'être endommagés dans la structure. Par conséquent, le modèle calibré ne peut être déterminé de façon unique et il est parfois nécessaire d'introduire des contraintes supplémentaires et très probablement hypothétiques ou une régularisation pour assurer une solution unique (Zhang et al., 2000). Voir **figure I-11**.

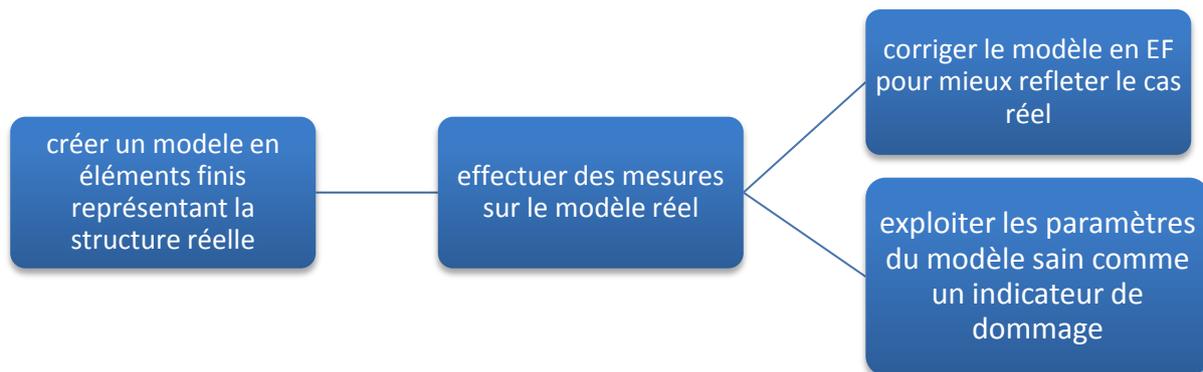


Figure I-12 processus de calage

### I.6.1.3 Méthodes intelligentes :

#### I.6.1.3.1 Réseaux de neurones (NN) :

Les modèles NN ont été utilisés avec succès pour résoudre des problèmes complexes dans divers domaines d'application, notamment la classification, la reconnaissance des formes, la prédiction, l'optimisation, l'approximation des fonctions et les systèmes de contrôle [30]. L'intérêt croissant pour ce domaine provient de la capacité d'apprentissage de ces modèles, qui relient les variables sans imposer de relations entre elles. Un neurone est l'élément principal d'un réseau neuronal artificiel. Il s'agit d'un opérateur avec des entrées et des sorties, associées à une fonction de transfert,  $f$ , des connexions by-synaptiques interconnectées ou des poids,  $w$ . La figure ci-dessous illustre comment l'information est traitée par un neurone unique. Voir **figure I-12**.

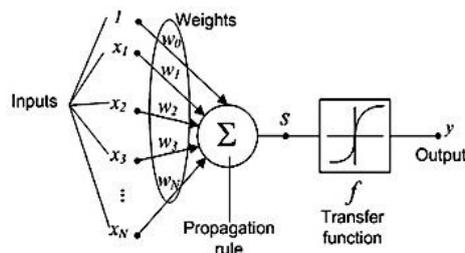
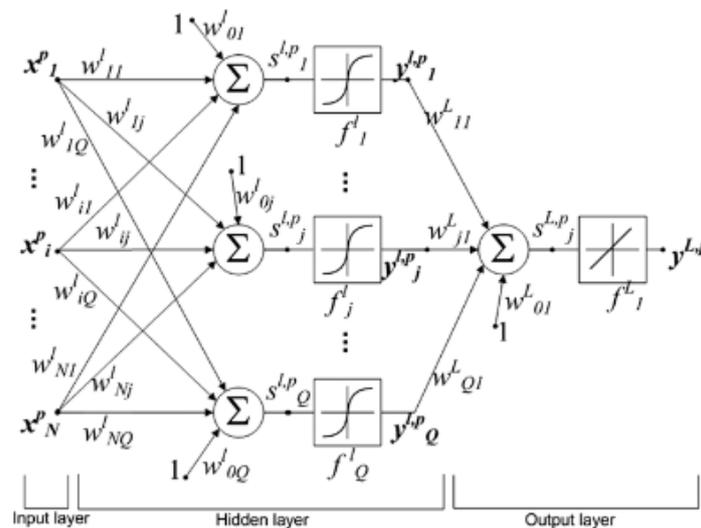


Figure I-13 Représentation d'un neurone

Différents modèles NN ont été proposés depuis sa conception dans les années 1940, mais la méthode Multi-layer Perceptron (MLP) est la plus largement utilisée [31]. Multi-layer Perceptron a des neurones disposés en couches. La première couche reçoit les entrées et la dernière couche produit les sorties. Les couches intermédiaires n'ont aucune connexion avec le monde extérieur et sont appelées couches cachées. Chaque neurone d'une couche est connecté à chaque neurone de la couche suivante. L'information est constamment transférée d'un calque à l'autre. La connexion entrante est associée à deux valeurs, une valeur d'entrée et une valeur de poids.

Les modèles MLP apprennent par un processus itératif, en ajustant les poids de façon à pouvoir apprendre correctement les données de formation et donc, après la phase de test, prédire les données inconnues. Les connaissances sont généralement stockées sous la forme d'un ensemble de poids de connexion.

La Figure suivante illustre un exemple générique de MLP, avec une couche d'entrée ayant  $N$  paramètres d'entrée, une couche cachée,  $l$ , avec  $Q$  neurones et une couche de sortie,  $L$ , avec une sortie. Voir **figure I-13**.



**Figure I-14 Représentation de Multi-layer Perceptron**

### I.6.1.3.2 Algorithme génétique (GA) :

Contrairement à de nombreux algorithmes d'optimisation, une méthode d'algorithme génétique a une probabilité plus élevée de converger vers une solution optimale globale qu'une méthode basée sur le gradient. Un algorithme génétique est une technique probabiliste basée sur la population qui fonctionne pour trouver une solution à un problème parmi une population de solutions possibles [33]. Il est utilisé pour trouver des solutions approximatives à des problèmes difficiles par l'application des principes de la biologie évolutionnaire à l'informatique. C'est analogue à la théorie de l'évolution de Darwin où les membres de la population rivalisent pour survivre et se reproduire tandis que les plus faibles s'éteignent. On attribue à chaque individu une valeur de condition physique en fonction de la mesure dans laquelle elle répond à l'objectif de résolution du problème et, d'identifier le modèle optimal en éléments finis. De nouvelles solutions individuelles et plus évolutives sont produites au cours d'un cycle de générations, où des opérations de sélection et de recombinaison ont eu lieu, d'une manière analogue à celle

de transfert de gènes s'appliquant aux individus. Ce processus se poursuit jusqu'à ce qu'une condition de cessation d'emploi soit remplie, après quoi le meilleur individu jusqu'à présent est considéré comme étant le modèle en éléments finis mis à jour.

Les trois aspects les plus importants de l'utilisation d'un algorithme génétique sont [32] :

- La définition de la fonction objective ;
- La mise en œuvre de la représentation génétique ; et
- La mise en œuvre des opérateurs génétiques.

Les détails des algorithmes génétiques sont illustrés à la **figure I-14** ci-dessous :

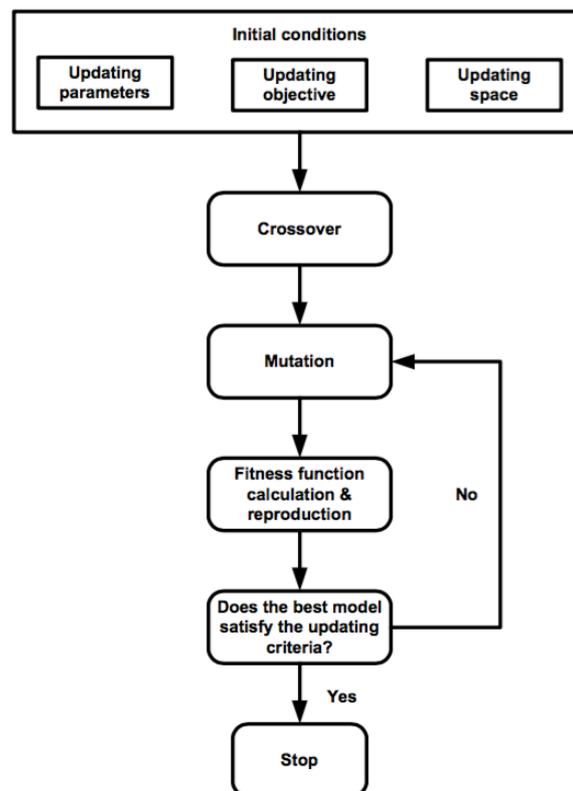


Figure I-15 Organigramme des algorithmes génétiques

### I.7 Les issues de l'étude bibliographique :

L'étude bibliographique détaillant différentes notions et les approches relatives à la thématique du mémoire nous a permis de nous situer par rapport à l'organisation et le contenu du travail et d'adopter des approches en adéquation avec les attentes fixées pour projet davantage.

En effet, la réalisation d'un modèle numérique de référence exploité dans le cadre de la surveillance de l'état de santé structurale d'un grand ouvrage tel que le barrage en remblai de Mahouane, est considéré comme une problème inverse faisant appel à la procédure de calage donnant naissance à un modèle numérique représentant le plus fidèlement possible la structure réelle. De plus, Le modèle numérique du barrage modélisé comporte plusieurs paramètres incertains, ce qui nous a menés à choisir et à appliquer les algorithmes génétiques en tant qu'une méthode intelligente pour le calage du modèle.

# **CHAPITRE II**

# **MODÉLISATION**

# **NUMÉRIQUE**

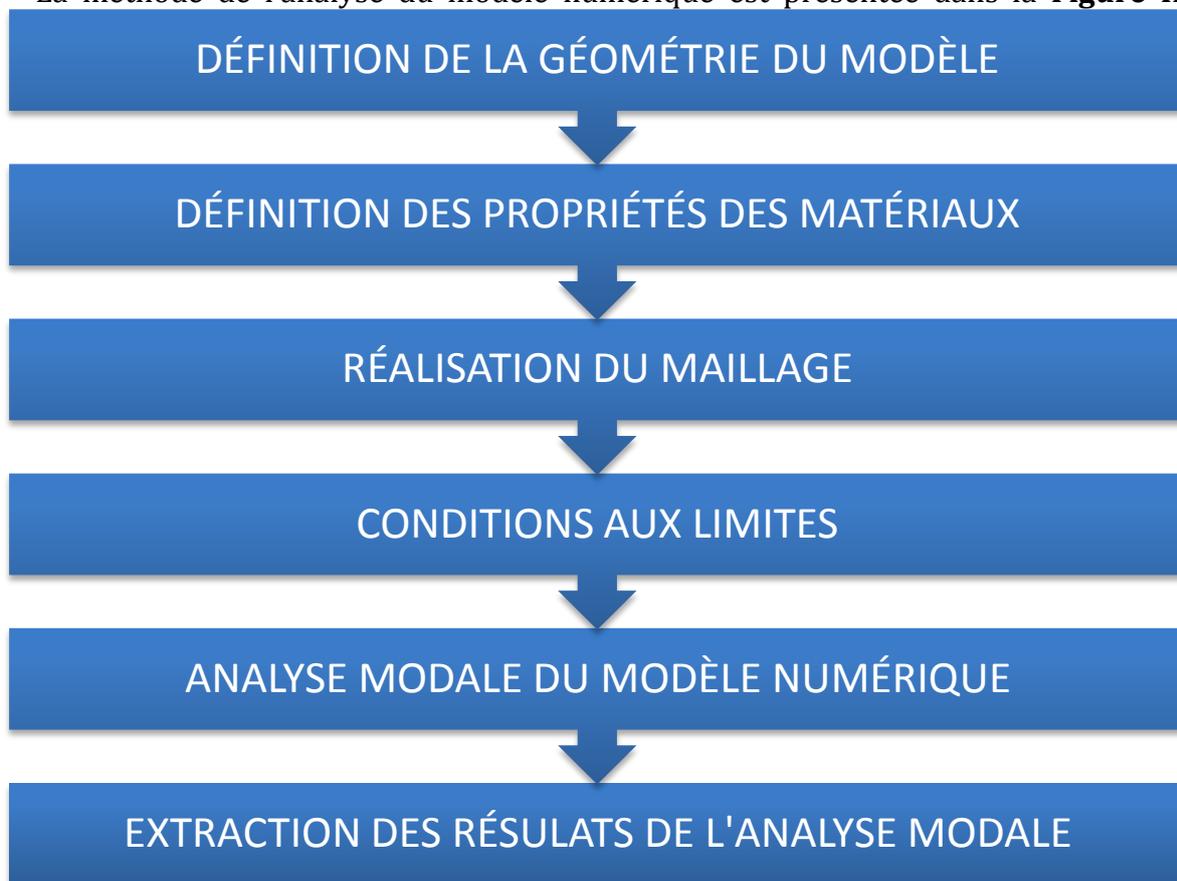
### II.1 Introduction

Le présent chapitre concerne l'élaboration des modèles numériques du barrage de Mahouane en utilisant le logiciel aux éléments finis SAP2000.

Ces modèles nous ont permis de déterminer les caractéristiques vibratoires du barrage à savoir les fréquences propres et les déformées modales.

A cet effet, plusieurs simulations ont été réalisées. Dans un premier temps, différentes variantes du modèle 2D ont été réalisées, dont celle qui a servi de modèle de référence représentatif de la structure réelle. Dans un deuxième temps, un modèle 3D a été élaboré. Ce modèle dont l'utilisation est coûteuse en temps, a été utilisé compte tenu du temps imparti dans le cadre de cette étude, comme moyen de vérification pour orienter les choix suivis pour la variante bidimensionnelle.

La méthode de l'analyse du modèle numérique est présentée dans la **Figure II-1**

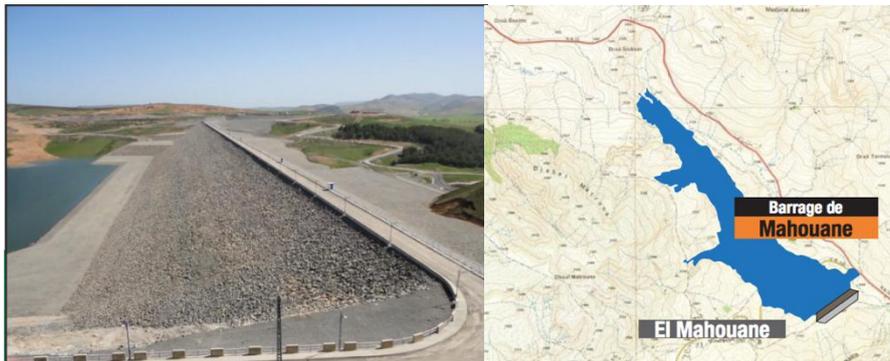


**Figure II-2 Procédure de l'analyse du modèle numérique en EF**

### II.2 Présentation du barrage Mahouane :

Le barrage de Mahouane est un barrage poids en remblai à noyau argileux constitué de 5 matériaux argile, grés, alluvion, sable, enrochement. Avec son bassin versant de plus de **145 millions** de mètres cube. Le barrage de Mahouane se situe sur l'Oued Gussar, à 8 km au nord-ouest de la ville de Sétif. Il constitue le réservoir aval du système «Ouest» du transfert «Sétif-Hodna».et à 350 kilomètres à l'Est d'Alger dans le nord-est de l'Algérie sur l'Oued Kébir.

La **figure II-2** ci-dessous représente le barrage de Mahouane :



**Figure II-3** Présentation du barrage de Mahouane

### II.2.1 Caractéristiques géométriques du barrage

Ci-après un rappel des principales caractéristiques géométriques du barrage de Mahouane **Tableau II-1**.

**Tableau II-1** Caractéristiques du barrage

Type de barrage	Digue en enrochement
Longueur de la crête	884 m
Largeur de la crete	6 m
Hauteur maximale sur fondation	88 m
Côte de la crête du barrage	1.151,42 m NGA
Côte de la retenue normale	1.148,72 m NGA
Capacité totale de la retenue	145,97 Hm <sup>3</sup>

### II.2.2 Caractéristiques physiques des matériaux constitutifs

Lors des études et réalisation d'un barrage en remblais, quelques propriétés physiques telles que le module d'élasticité ne font pas l'objet d'essais spécifiques, contrairement à d'autres propriétés comme l'angle de frottement interne des matériaux, leurs cohésions et leurs perméabilités.

Comme ces modules d'élasticité sont incontournables pour définir les fréquences propres de l'ouvrage étudié, différentes données bibliographiques [33] ont été analysées pour définir les intervalles de variation de ces caractéristiques pour les différents matériaux constitutifs du barrage.

## CHAPITRE II: Modélisation numérique

Le **tableau II-2** résume les caractéristiques physiques [33] des matériaux composant le barrage de Mahouane.

$$E = \rho \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} V_s^2$$

Où

$V_p$  : Vitesse de l'onde primaire ;

$V_s$  : Vitesse de l'onde secondaire.

**Tableau II-2 Caractéristiques des matériaux**

	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/m <sup>2</sup> )	213538	55733	3955810	982278	654230
$E_{max}$ (MPa)	3324,6	1325,2	18820,87	2193,2	9013,355
$E_{max}$ (KN/m <sup>2</sup> )	3324578	1325210	18820768	2193231	9013333
$\nu_{min}$	0,44	0,39	0,32	0,45	0,33
$\nu_{max}$	0,48	0,47	0,40	0,46	0,35
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1800	1900	2200	2100	2000

## II.3 Modélisation numérique

### II.3.1 Comportement des matériaux

Le comportement des matériaux constituant les remblais est très complexe et fortement non linéaire. Ce comportement varie en fonction des sollicitations subies par un barrage.

Néanmoins pour les besoins de calculs des modes propres, relatifs aux cas de système non forcé, il est possible de se limiter aux propriétés linéaires qui permettent d'approcher les fréquences propres de l'ouvrage [34].

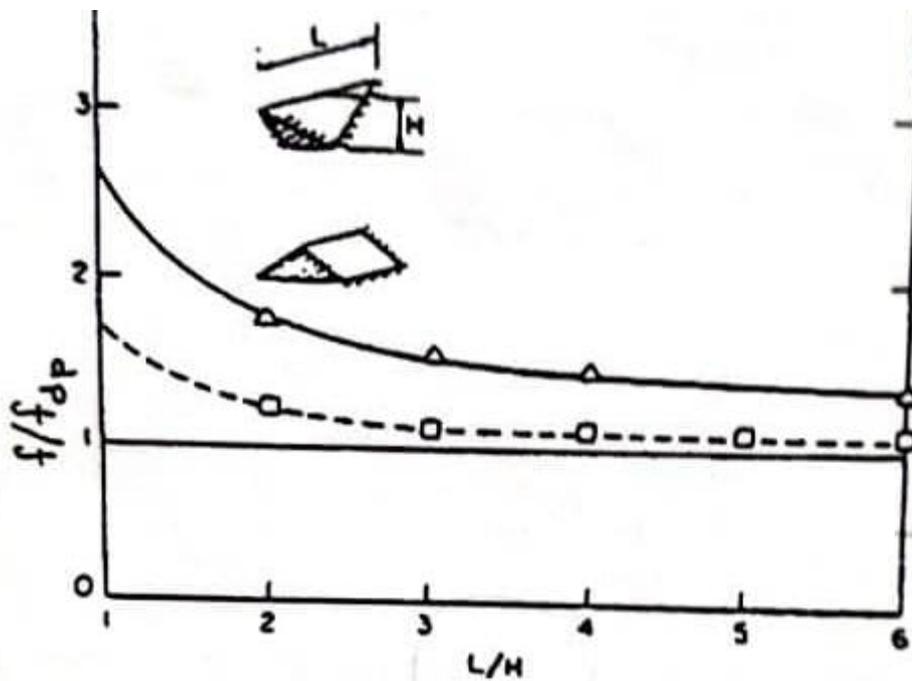
C'est ce qui a été adopté dans le cadre de la présente étude.

### II.3.2 Modèle en déformations planes et effet tridimensionnel

La modélisation d'un barrage peut se faire en 2D pour des raisons de simplifications. Néanmoins, même si ces modèles qui permettent d'avoir une appréciation assez proche dans l'ensemble, il n'en demeure pas moins que la modélisation 3D reste plus précise. Une intéressante étude paramétrique a été présentée par MAKDISI et al [34] sur la comparaison de la réponse sismique d'un barrage en remblai en déformation plane et en tridimensionnel (Canyon rectangulaire et en V)

L'une des conclusions principales de cette étude, note que l'augmentation de la fréquence est plus faible pour un canyon rectangulaire de 10% à 20% par rapport à un canyon triangulaire.

La **figure II-3** suivante illustre une comparaison de la réponse tridimensionnelle et en déformation plane d'un barrage dans un canyon triangulaire ou rectangulaire :



**Figure II-4** Comparaison de la réponse tridimensionnelle et en déformation plane d'un barrage dans un canyon triangulaire ou rectangulaire

L'effet tridimensionnel peut être quantifié en prenant l'exemple ci-avant dans lequel il est possible de constater pour un canyon rectangulaire, un rapprochement significatif des fréquences d'un modèle tridimensionnel avec un modèle en déformation plane.

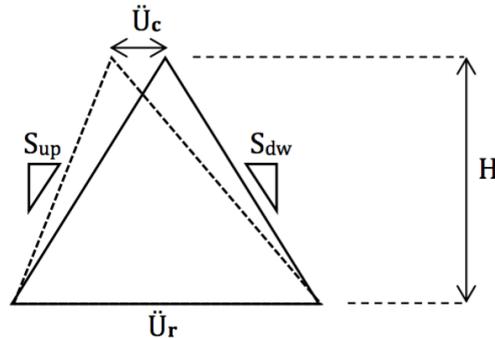
Cet effet est accentué pour un rapport L/H plus grand pour notre cas le rapport L/H égale à 10,04 ce qui permet d'utiliser un modèle 2D dans le cadre de la présente étude.

## II.4 Calcul de la fréquence fondamentale par la formule simplifiée

### II.4.1 Introduction

Afin d'estimer la fréquence fondamentale d'un barrage en remblai, une méthode simplifiée a été proposée par Tardieu & al.

Le barrage est assimilé à un résonateur simple de forme triangulaire constituant un système à un seul degré de liberté (déplacement horizontal en crête). Voir **figure II-4**.



**Figure II-5** Modèle pour résonateur simple à un seul degré de liberté.

Ci-après les hypothèses adoptées pour cette approche [35] :

- Le barrage est fondé sur un substratum rocheux supposé rigide
- Les effets de la composante horizontale de rive à rive ne sont pas pris en compte
- Le mode de déformation du barrage est supposé se réduire à un cisaillement horizontal et une flexion d'axe parallèle à celui du barrage.
- Le barrage est assimilé à un résonateur simple à deux degrés de liberté (un en déplacement et un en flexion).
- Le résonateur est un prisme triangulaire.

Le prisme triangulaire aura une hauteur H, correspondant à la profondeur d'eau qui y a immédiatement à l'amont du barrage.

### II.4.2 Evaluation de la fréquence fondamentale du barrage :

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

$$N = \alpha V$$

Avec V est la vitesse de l'onde de cisaillement.

Tardieu et al [38] ont montré qu'il est possible de calculer le coefficient  $\alpha$ , tel que :

$$N = 0.17 \frac{S}{H}$$

## CHAPITRE II: Modélisation numérique

Avec :

H : Hauteur de la retenue normal d'eau, 80 m

S : Vitesse de l'onde de cisaillement

$$S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$\rho$  : La masse volumique moyenne du barrage

$$\rho_{moy} = \frac{\sum \rho_i A_i}{\sum A_i}$$

G : Module de cisaillement moyen du barrage

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

Où :

$$E_{moy} = \frac{\sum E_i A_i}{\sum A_i}$$

et :

$$\nu = \nu_{moy} = \frac{\sum \nu_i A_i}{\sum A_i}$$

Les données exploitées pour l'application numérique de cette méthode, pour le calcul de la fréquence fondamentale, sont les suivants :

$$\rho_{moy} = 2081 \text{ Kg/ m}^3 ;$$

$$\bar{\nu}_{min} = 0.44 \quad ; \quad \bar{E}_{min} = 2242114,11 \text{ KN/m}^2 \quad ; \quad \bar{G}_{min} = 823345603.7 \text{ N/m}^2$$

$$\bar{\nu}_{max} = 0.46 \quad ; \quad \bar{E}_{max} = 11606146.2 \text{ KN/m}^2 \quad ; \quad \bar{G}_{max} = 4097777191 \text{ N/m}^2$$

$$S_{min} = \sqrt{\frac{823345603.7}{2081}} = 629.01 \text{ m/s}$$

$$S_{max} = \sqrt{\frac{4097777191}{2081}} = 1403.26 \text{ m/s}$$

Les résultats obtenus sont présentés dans le **tableau II-3**.

**Tableau II-3 Fréquence fondamentale du barrage**

	Méthode de Tardieu
$N_{min}$ (Hz)	1,45
$N_{max}$ (Hz)	3,25

### II.5 Modélisation EF et analyse numérique

Un modèle éléments finis a été élaboré pour analyser les paramètres modaux du barrage de Mahouane. Ce modèle servira de référence à comparer avec les mesures In-Situ ce qui pourrait permettre d'évaluer et de suivre l'état de service de ce dernier.

Deux modèles éléments finis ont été réalisés. Il s'agit de [36] :

- Modèle bidimensionnelle (2D) en déformation plane
- Modèle tridimensionnelle (3D).

Même si la modélisation bidimensionnelle 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. Cependant, cela coûte cher sur le plan informatique. De plus, l'analyse par éléments finis peut être formulée de manière à ce que le système soit linéaire ou non linéaire. La modélisation d'un système linéaire n'est pas aussi complexe et ne tient généralement pas compte de la déformation plastique, contrairement aux systèmes non linéaires.

Dans notre cas nous avons choisi de travailler sur le modèle 2D que nous avons validé par la suite en étudiant la correspondance des modes vibratoires avec ceux du modèle 3D.

#### II.5.1 Présentation du modèle 2D

Le modèle 2D a été généré suivant la coupe type (P0) du barrage. Voir la **figure II-5** suivante :

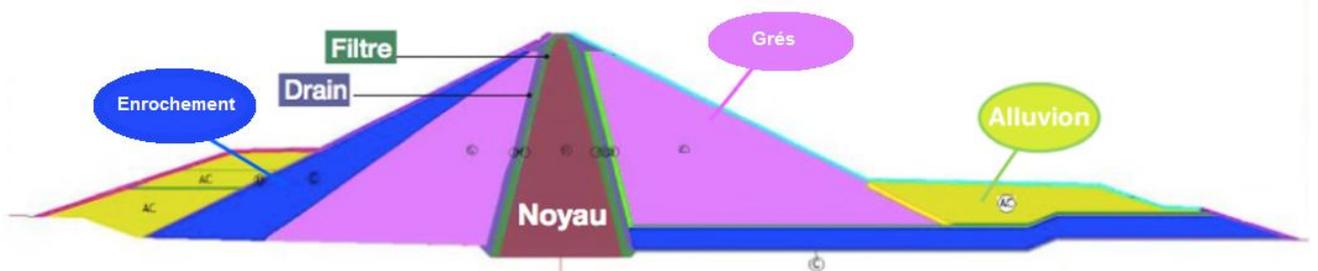


Figure II-6 Coupe type du barrage Mahouane

Plusieurs modèles numériques ont été réalisés et leurs fréquences propres ont été comparées aux fréquences propres obtenues des résultats expérimentaux. Les différentes variantes réalisées sont présentées dans la **figure II-6** ci-dessous.

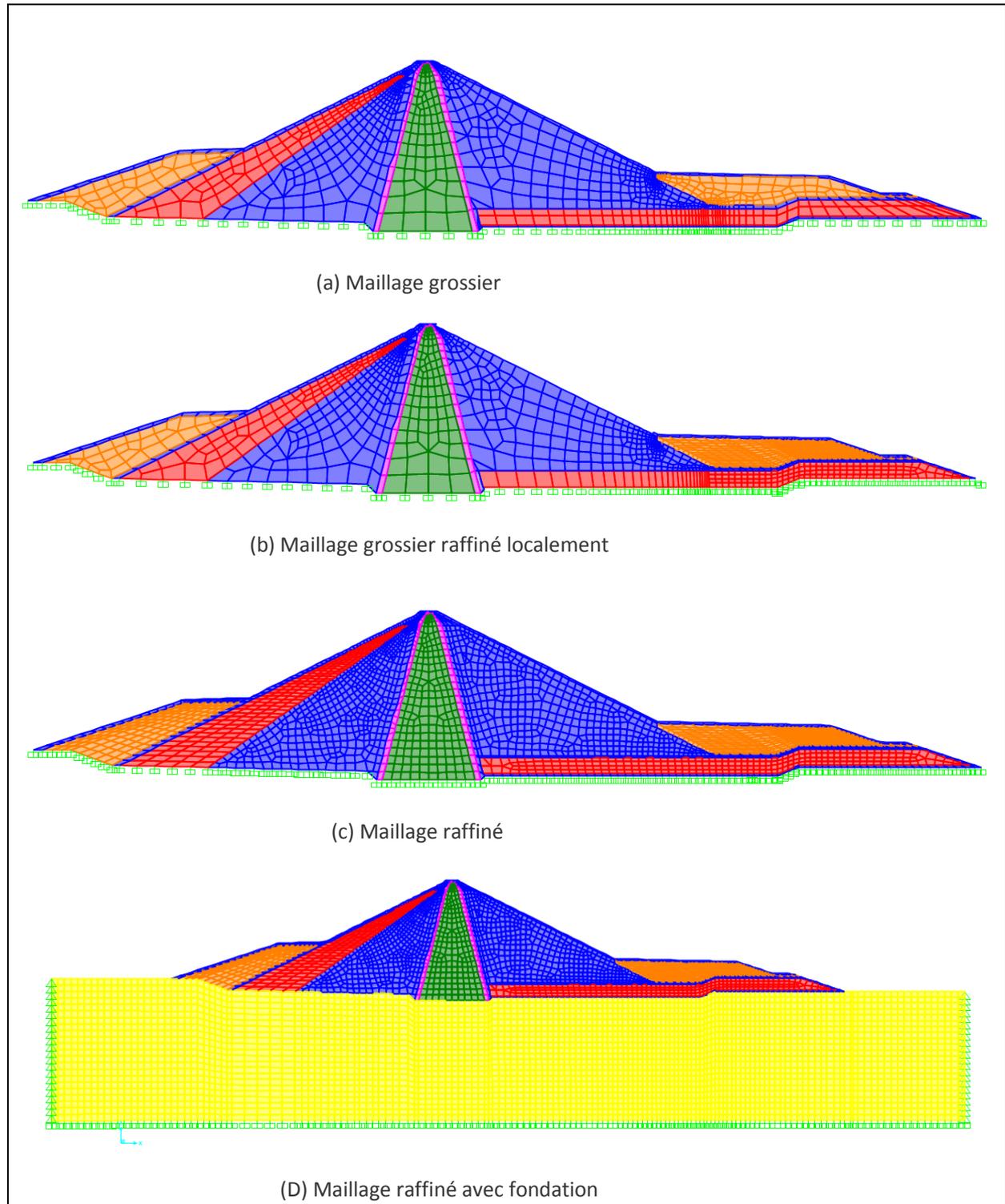


Figure II-7 Les différentes Variantes du modèle 2D

### II.5.1.1 Analyse modale du modèle numérique bidimensionnel

Les deux modèles ayant été retenus pour faire l'objet d'analyses dans notre présent travail sont le modèle 2D raffiné sans fondation et le modèle 2D raffiné avec fondation.

Une comparaison globale des fréquences obtenues analytiquement et numériquement a été faite. Les résultats sont présentés comme suit dans le **tableau II-4**:

Tableau II-4 Résultats du calcul des fréquences propres

	Tardieu	Modèle numérique	
		Avec fondation	Sans fondation
$f_{min}$ (Hz)	1,46	1,71	1,92
$f_{max}$ (HZ)	3,25	3,13	5,42

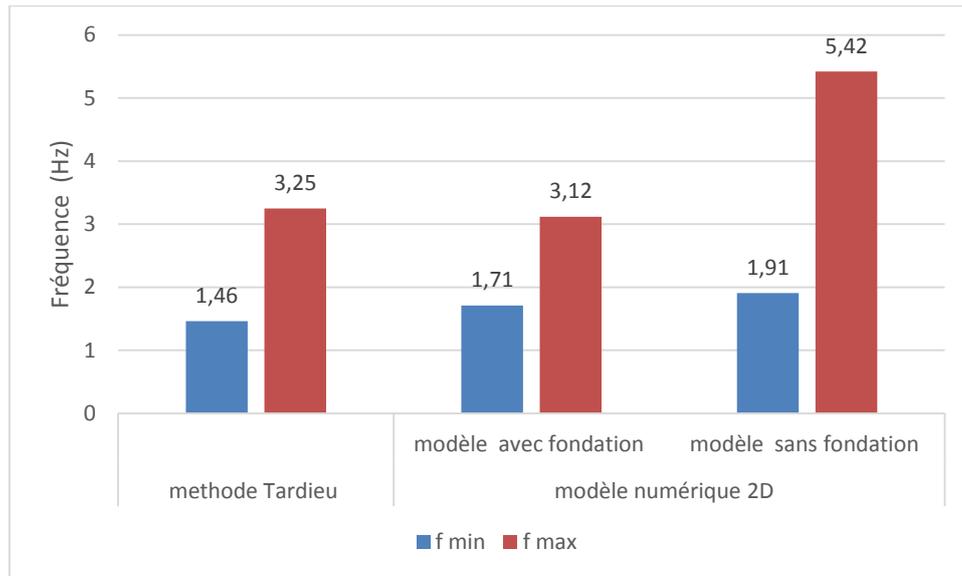


Figure II-8 Comparatif des fréquences fondamentales

### II.5.1.1.1 Modèle 2D avec fondation

Le modèle ayant été retenu pour le calage du modèle 2D est celui avec fondation avec un maillage raffiné avec des éléments comprenant deux (02) points de Gauss. Ce modèle à un maillage relativement fin comportant 6218 nœuds et 5969 éléments surfaciques en déformations planes. Voir **figure II-8**.

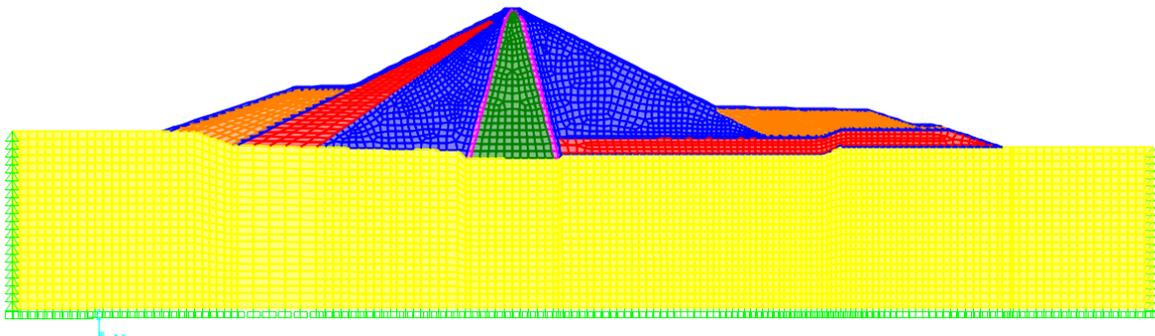


Figure II-9 Modèle (2D) de mailles raffinées avec fondation

Les résultats obtenus numériquement pour le modèle 2D avec fondation sont récapitulés dans le **tableau II-5** ci-dessous. Les différentes fréquences min et max

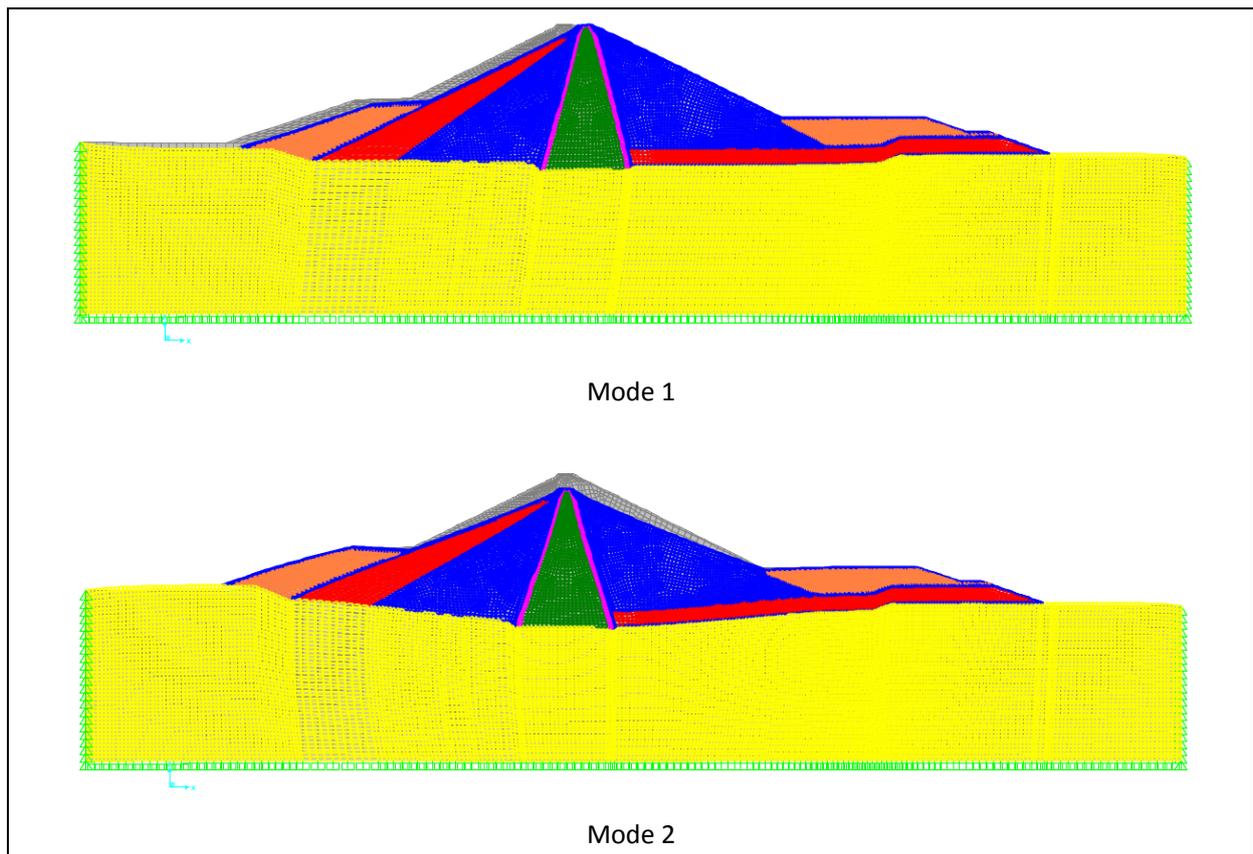
## CHAPITRE II: Modélisation numérique

correspondent respectivement aux valeurs minimales et maximales pour le module élastique de chacun des matériaux.

Tableau II-5 Fréquences propres du modèles (2D) avec fondation

Modèle avec fondation					
modes propres	mode 1	mode 2	mode 3	mode 4	mode 5
$f_{min}$ (Hz)	1.70	2.51	2.83	3.29	3.44
$T_{min}$ (s)	0.58	0.39	0.35	0.30	0.29
$f_{max}$ (Hz)	3.12	4.70	5.82	6.32	6.88
$T_{max}$ (s)	0.31	0.21	0.17	0.15	0.14q

Les déformées modales des quatre (04) premiers modes avec des valeurs moyennes des différents modules élastiques ( $E_i$ ) sont présentées sur la page suivante:



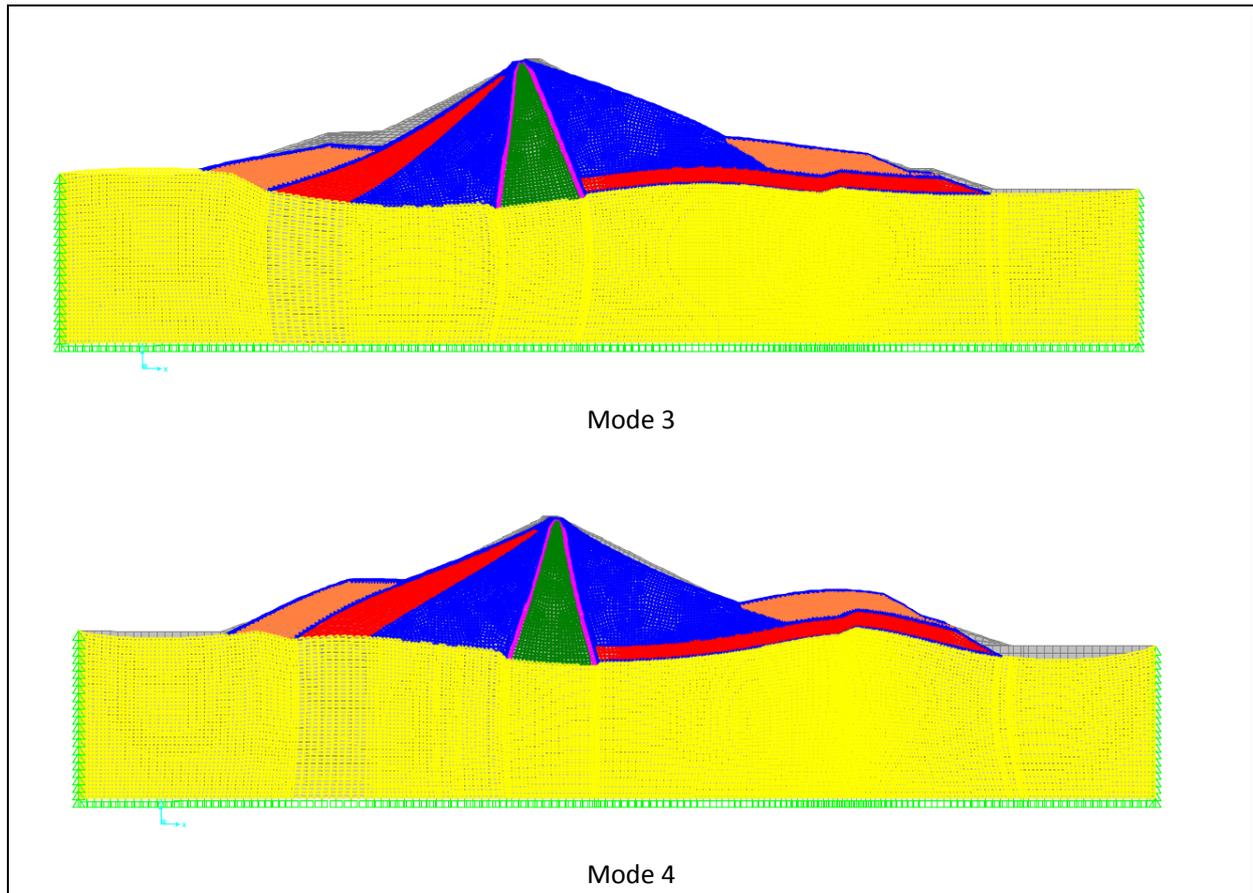


Figure II-10 Déformées modales du modèle 2D avec fondation

### II.5.1.1.2 Modèle 2D sans fondation

Le modèle ayant été retenu pour la correspondance du modèle 2D et 3D est celui sans fondation avec un maillage raffiné avec des éléments comprenant deux (02) points de Gauss. Ce modèle à un maillage relativement fin comportant 2813 nœuds et 2625 éléments surfaciques en déformations planes. Voir **Figure II -10**.

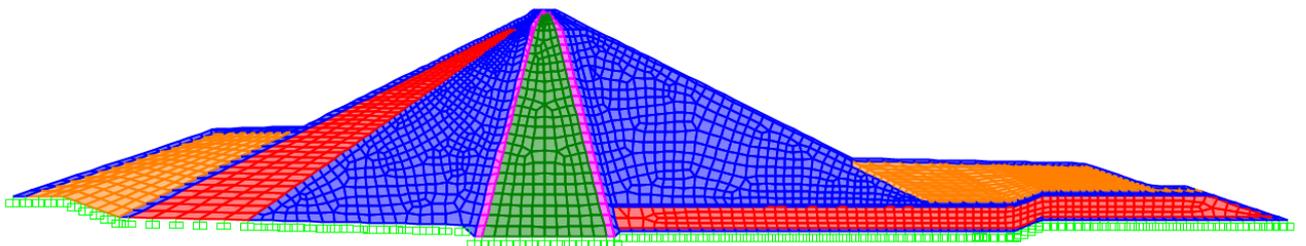


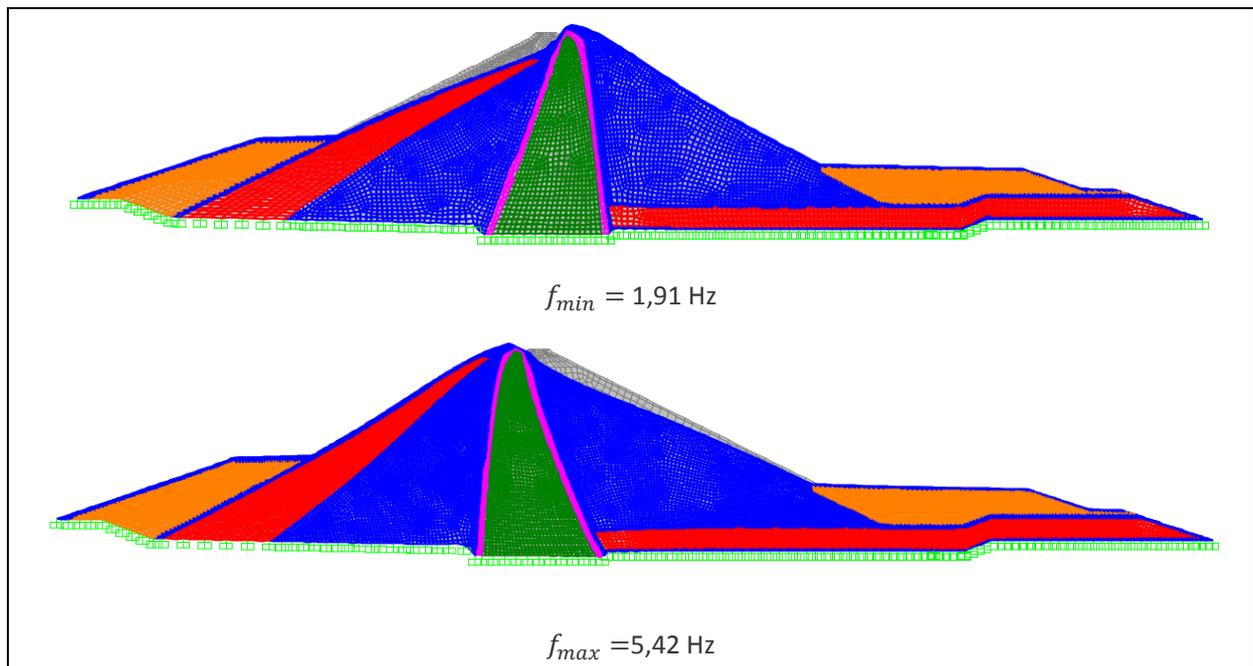
Figure II-11 Modèle (2D) de mailles raffinées sans fondation

Les résultats obtenus numériquement pour le modèle 2D sans fondation sont récapitulés dans le suivant **Tableau II-6**

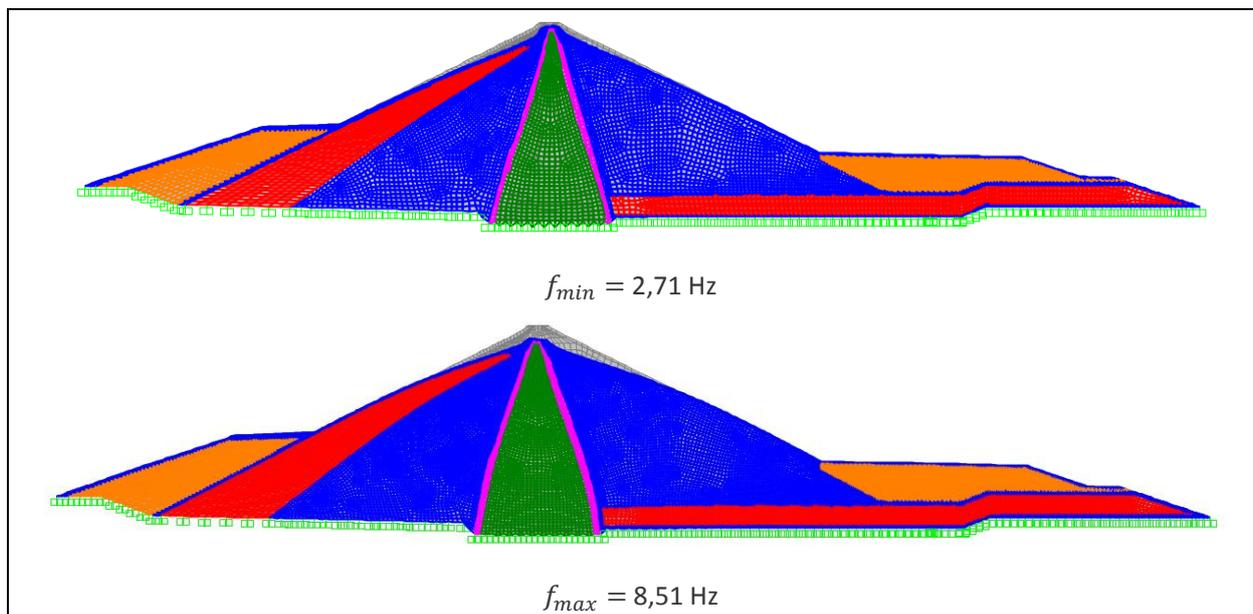
Tableau II-6 Fréquences propres du modèles (2D) sans fondation

Modèle sans fondation					
Mode propre	1	2	3	4	5
$f_{min}$ (Hz)	1.91	2.71	3.11	3.75	3.80
$T_{min}$ (s)	0.52	0.36	0.32	0.26	0.26
$f_{max}$ Hz	5.42	8.51	10.27	10.65	10.85
$T_{max}$ (s)	0.18	0.11	0.10	0.09	0.09

Les déformées modales sont présentées dans la **figure II -11** ci-dessous.



Mode 1



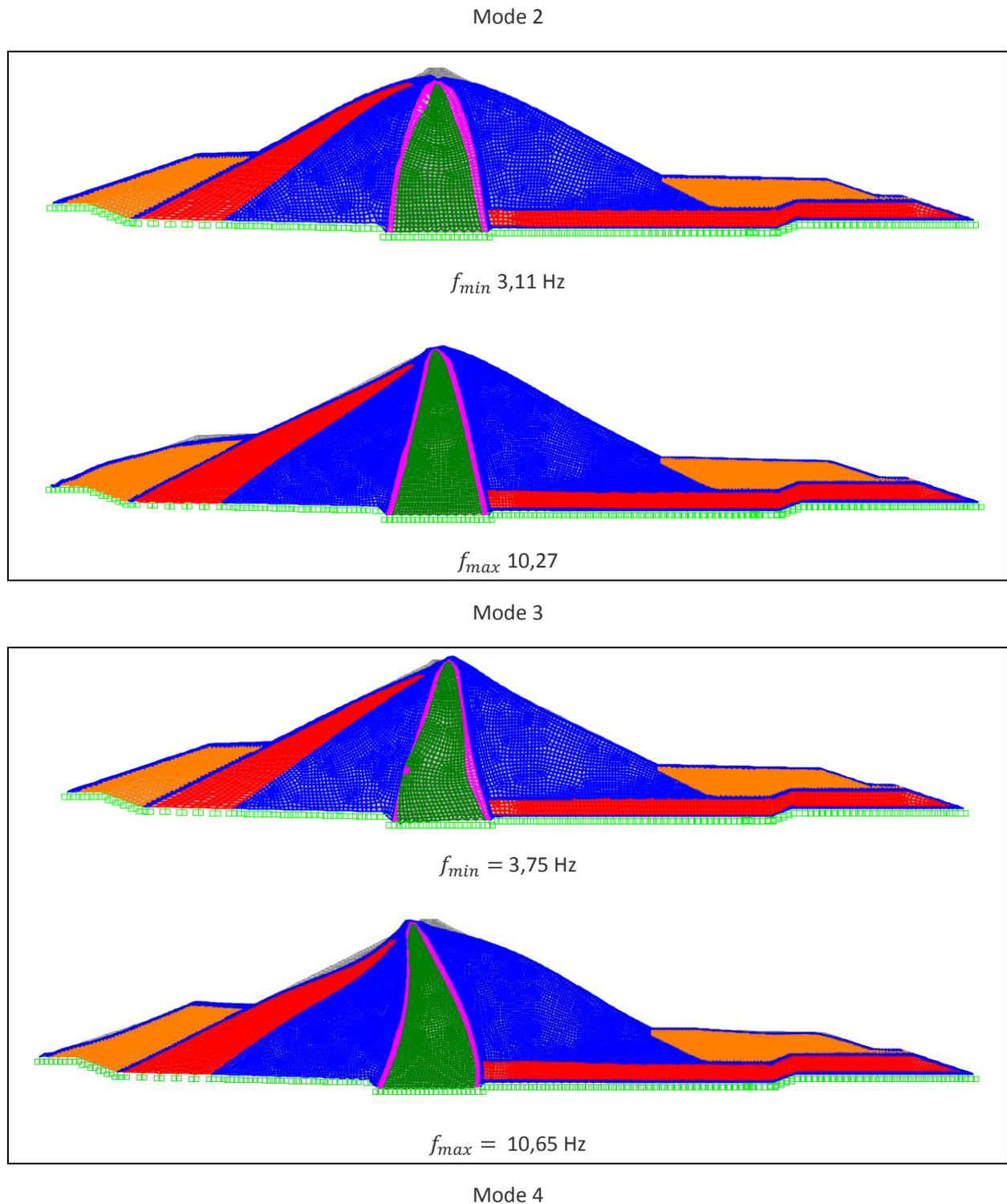


Figure II-12 Déformées modales du modèle 2D sans fondation

### II.5.2 Présentation du Modèle 3D

Le modèle 3D a été réalisé par extrusion des éléments surfaciques (de la coupe P0 selon le plan XZ) du modèle (2D) suivant l'axe (OY) par le biais du logiciel SAP2000. Le modèle 3D représente au mieux les propriétés géométriques (tridimensionnelles) réelles du barrage comporte 231 148 nœuds et 213 614 éléments volumiques (Figure II-13).

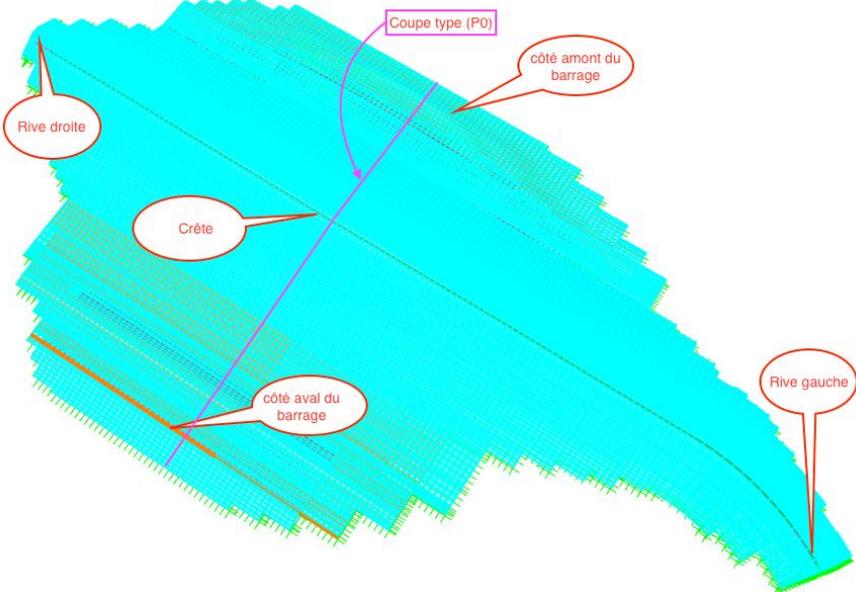


Figure II-14 Modèle 3D

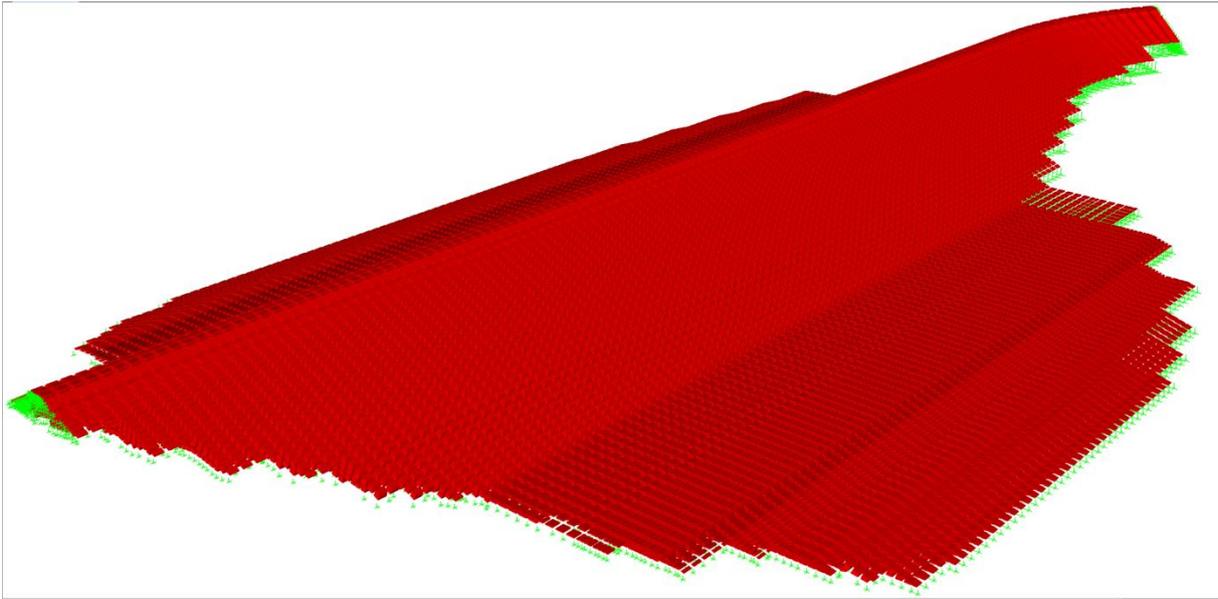


Figure II-15 Vue en perspective du modèle 3D

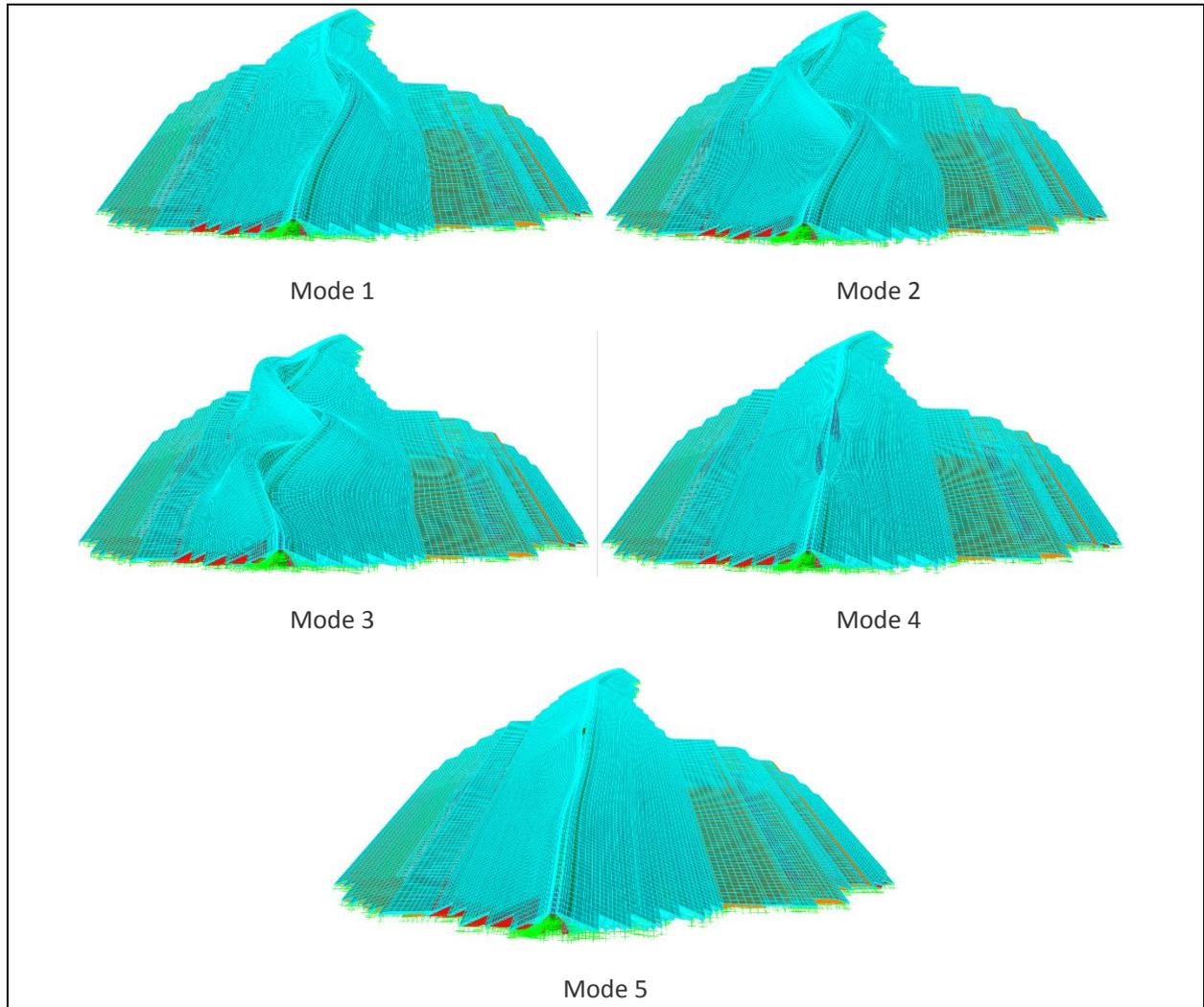
### II.5.2.1 Analyse modale

Les fréquences obtenues sur le modèle 3D sont récapitulées dans le **tableau II-7** qui suit.

**Tableau II-7 Modes propres du modèle 3D**

mode	1	2	3	4	5
$f_{max}$ (Hz)	6,06	6,83	7,64	8,30	9,04
$T_{max}$ (s)	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11
$f_{min}$ (Hz)	2,23	2,61	2,93	3,00	3,15
$T_{min}$ (s)	0,44	0,38	0,34	0,33	0,31

Les déformées modales des cinq (05) premiers modes sont présentées ci-dessous Figure II-16.



**Figure II-17 Déformées modales du modèle 3D**

## CHAPITRE II: Modélisation numérique

Afin de vérifier la représentativité des résultats obtenus du modèle 2D du barrage, une comparaison a été menée entre les modes vibratoires du modèles 2D sans fondation avec ceux du modèle 3D.

La comparaison montre une similarité entre les modes observés sur les deux modèles, ce qui justifie une fois de plus l'utilisation du modèle 2D comme modèle simplifié conformément aux hypothèses citées précédemment.

Le **tableau II-8** ci-dessous permet la comparaison des modes ;

La **figure II-18** permet de visualisé les modes graphiquement.

**Tableau II-8 Correspondance des modes des modèle 2D et 3D**

modèle 2D sans fondation		Modèle 3D	
mode	f max	mode	f max
1	5,42	-	-
2	8,26	4	8,30
3	9,87	8	9,80
4	10,26	9	10,47
5	10,59	12	10,51
6	11,27	15	11,22
7	11,45	17	11,47



**Figure II-19 Comparaison entre fréquences du modèle 2D et 3D**

Une illustration de correspondance d'un mode propre du modèle 2D avec le modèle 3D, est présentée ci-dessous.

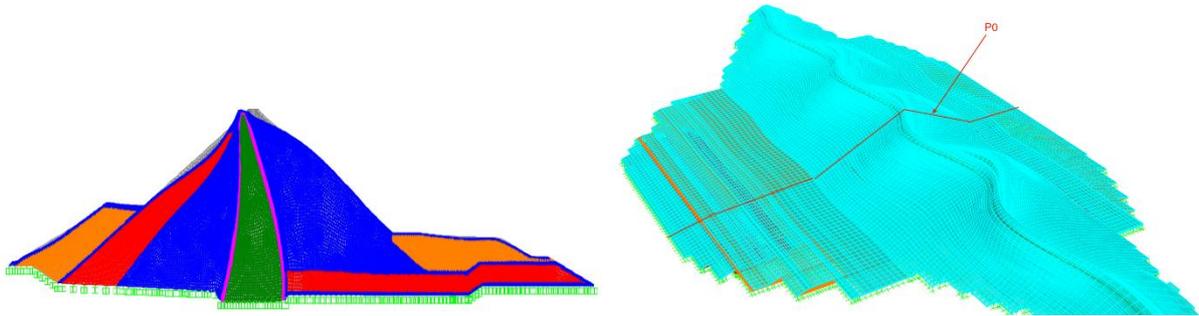


Figure II-20 exemple de correspondance modale entre 2D et 3D

### II.6 Interprétation des résultats finaux :

L'ensemble des fréquences fondamentales, issues de la méthode de Tardieu et les différentes analyses modales, sont présentées dans la figure suivante.

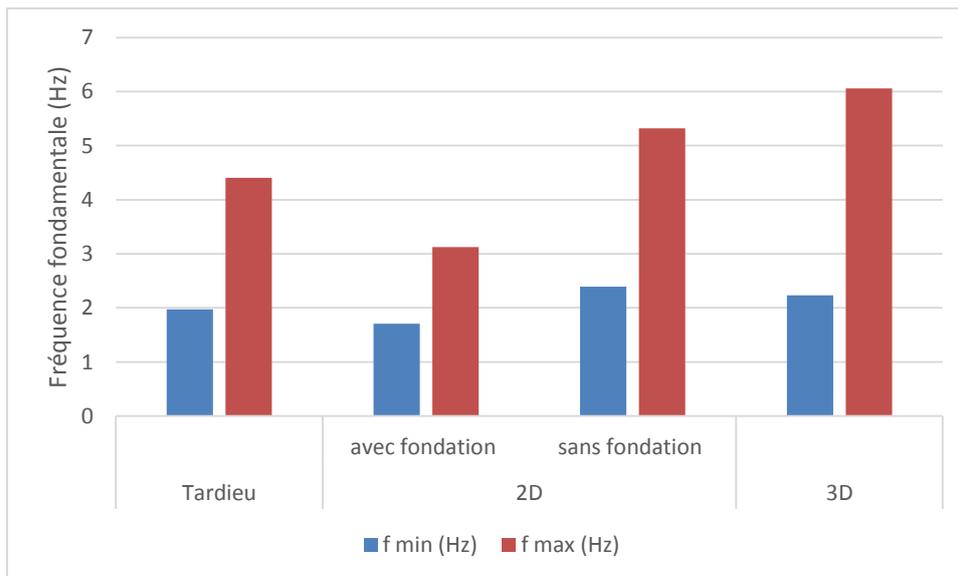


Figure II-21 Fréquences fondamentales issues de la modélisation numérique

La méthode de Tardieu montre une surestimation relative des fréquences fondamentales par rapport à celles que fournit la simulation numérique. Cette similarité justifie le choix du modèle bidimensionnel avec fondation pour la représentation des déformations planes de la structure réelle.

### II.7 Conclusion :

Le barrage Mahouane étant un ouvrage révélant un aspect complexe pour la surveillance vibratoire, un modèle de référence d'un certain niveau de détail s'avère nécessaire. Pour ce faire, plusieurs variantes de modèles numériques du plus simple au 3D ont été réalisées. Pour des raisons de disponibilité de moyens de calcul, nous avons opté pour un modèle 2D relativement simple en terme de calcul tout en étant capable de simuler 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 mis en évidence par la correspondance présente entre les modes propres du modèle 2D et ceux du 3D.

Les fréquences fondamentales déterminées par la méthode de Tardieu [37] se rapprochent de celles issues de l'analyse modale du modèle 2D avec fondation, tout en justifiant le choix de ce dernier comme un modèle de référence préliminaire, simplifié.

Le modèle 2D avec fondation est censé représenter la réponse dynamique transversale du barrage, étant en interaction avec le sol sur lequel il repose. Pour valider cela, le modèle fera objet d'identification avec les résultats des essais de vibrations ambiantes explicitée dans le prochain chapitre

**CHAPITRE III**  
**Essais de vibrations**  
**ambiantes**

### III.1 Introduction :

Le calage du modèle numérique se fait nécessairement par la collecte de données In-Situ relatives à la structure. Pour ce faire, l'essai de vibrations ambiantes se présente comme un outil intéressant de par les résultats qu'il octroie (fréquences et modes propres), sa facilité de mise en place, la fiabilité des résultats et son faible coût de réalisation. Nous avons donc réalisé ce type d'essai sur le barrage de Mahouane, le 08 mai 2019, dans le cadre de l'identification et du recalage du modèle éléments finis bidimensionnel.

Ce chapitre est dédié à la description du déroulement de l'essai vibrations ambiantes et à l'exploitation de données obtenues.

### III.2 Particularité des essais de vibrations ambiantes :

La réponse des structures soumises à des charges dynamiques telles que : tremblement de terre, vent fort et explosion, est simulée à l'aide d'outils numériques tels que les modèles par éléments finis (FEM). Les modèles numériques peuvent varier en complexité, mais tous représentent une certaine idéalisation de la structure réelle [37]. Leur efficacité dans la simulation de la réponse de la structure est mieux évaluée avec la disponibilité des résultats d'essais expérimentaux tels que : les résultats des essais de vibrations forcées ou ambiantes, ou de leur enregistrement de la réponse sismique. Cela permet la collecte des données expérimentales qui sont utiles pour la validation du modèle numérique. En effet, les essais de vibration ambiante sont plus prisés dans le sens où une structure, peut être soumise aux vibrations sous charge éolienne, trafic et activité humaine où le mouvement résultant, est mesuré avec des instruments sensibles sans besoin de gros équipements pour charger la structure étudiée. Par conséquent, le coût global de la mesure est beaucoup moins élevé comparant aux autres essais préalablement mentionnés.

### III.3 Source d'excitation

Dans les conditions d'exploitation, les vibrations ambiantes, telles que les bruits issus du sol, du vent, de la route et de la circulation, sont les seules excitations disponibles pour les grandes infrastructures civiles[38]. Dans le cas d'essais dynamiques sous sollicitations ambiantes, l'excitation est inconnue ; certaines hypothèses doivent donc être émises sur sa nature. L'hypothèse de base reste que les sollicitations sont des processus stochastiques stationnaires avec une densité spectrale de puissance suffisamment riche (c'est à dire avec une bande de fréquence suffisamment large) pour que toutes les fréquences propres pertinentes de la structure soient excitées. Si cette hypothèse est valide, seule la réponse de la structure est utile pour estimer les paramètres dynamiques de la structure.

### III.4 Identification modale

#### III.4.1 Hypothèses et principe de la méthode

L'identification modale par le biais des essais de vibrations ambiantes dite identification en « Output Only » repose sur les hypothèses suivantes [39] :

- Linéarité : La réponse du système à une combinaison donnée est égale à la même combinaison des sorties correspondantes,
- Stationnarité : Les caractéristiques dynamiques de la structure ne varient pas avec le temps, de sorte que les coefficients des équations différentielles régissant la réponse dynamique de la structure sont indépendants du temps,
- Observabilité : La disposition des capteurs a été correctement conçue pour observer les modes d'intérêt, en évitant, par exemple, les points nodaux.

#### III.4.2 Technique d'identification

##### III.4.2.1 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 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)[27]. Illustration **Figure III-1**

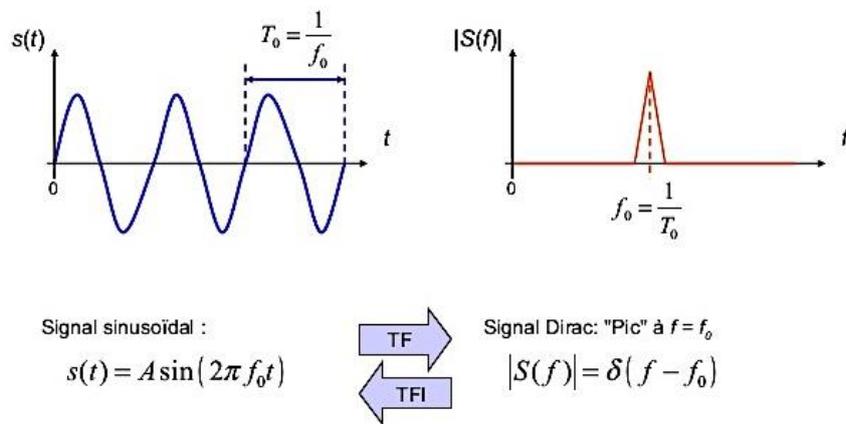


Figure III-2 Dualité domaine temporel-fréquentiel

##### III.4.2.2 Fonction de Réponse en Fréquence

La Fonction de Réponse en Fréquence (FRF) est définie comme le rapport de la réponse de la transformée de Fourier à la transformée de Fourier en terme de force [28]. La FRF (H) peut être écrite en termes de propriétés modales en utilisant l'équation de sommation modale comme suit

$$H_{kl}(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{-\omega^2 \phi_k^i \phi_l^i}{-\omega^2 + 2\xi_i \omega_i \omega_j + \omega_i^2}$$

$H_{kl}(\omega)$  : une FRF due à une excitation à k et une réponse à l

$\omega$  : La fréquence du point de mesure

$\omega_i$  : La  $i^{ème}$  fréquence naturelle du point de mesure

N : nombre de mode

$\xi_i$  : L'amortissement du  $i^{ème}$  mode

**III.4.2.2.1 Identification modale par la FRF :**

La corrélation de la fonction de réponse en fréquence (FRF) contient les mêmes informations que la corrélation des déformées modales (les deux contiennent un ensemble de points de mesure), la corrélation des FRF s'est avérée plus difficile à utiliser avec succès. Cette difficulté est principalement due à la sensibilité élevée des FRF à de légères perturbations à la fois dans les conditions aux limites et dans l'excitation et la réponse. Par conséquent, les déformées modales globalement extraites minimisent la contamination due aux perturbations issues de l'essai expérimental, tandis que les FRF maintiennent cette sensibilité[23]. Les avantages et les inconvénients des FRF sont classés dans le **tableau III-1** ci-dessous.

**Tableau III-1 Avantages et les Inconvénients des FRF**

Avantage	Inconvénient
Les données mesurées comprennent les effets des modes hors bande passante de fréquence	Les données contiennent plus d'informations qu'il n'en faut pour l'identification des dommages
Une seule mesure fournit des données abondantes	Il n'existe pas de méthode pour choisir la largeur de bande de fréquence d'intérêt
L'analyse modale n'est pas nécessaire et, par conséquent, les erreurs d'identification modale sont évitées	Les FRF sont généralement bruyants dans les régions anti-résonance.
Les fonctions de réponse en fréquence sont applicables aux structures à amortissement élevé et à densité modale élevée.	

**III.4.2.3 Identification des pics (Peak Picking)**

Le Peak Picking est une méthode puissante, basée sur le domaine fréquentiel, qui permet d'estimer les propriétés modales d'un système structurel à partir des données de réponse collectées. Cette méthode suppose que l'entrée d'excitation peut être caractérisée comme un bruit blanc Gaussien normalisé [39] .

L'analyse du « Peak Picking » repose sur le fait que la FRF d'un système définit des valeurs des crêtes autour des fréquences modales du système. Dans l'hypothèse d'une excitation de bruit blanc, la FRF d'une structure à l'emplacement (i) du capteur, peut être considéré comme

équivalent au spectre de Fourier des données de réponse recueillies à ce capteur. Ce spectre peut être formulé en convertissant la réponse mesurée dans le domaine fréquentiel à l'aide d'une transformée de Fourier rapide (FFT).

### III.5 Procédure des mesures des vibrations ambiantes

La procédure de réalisation des essais de vibrations ambiantes sur le barrage, se résume comme suit :

- Etablissement d'un réseau des points de mesures pour l'application de l'essai de vibration ambiante sur le barrage
- Enregistrement des signaux des vibrations ambiantes par la station d'acquisition de données « City Shark II ».
- Traitement des signaux enregistrés par le logiciel « Geopsy » (post-traitement des données issues des mesures effectuées)

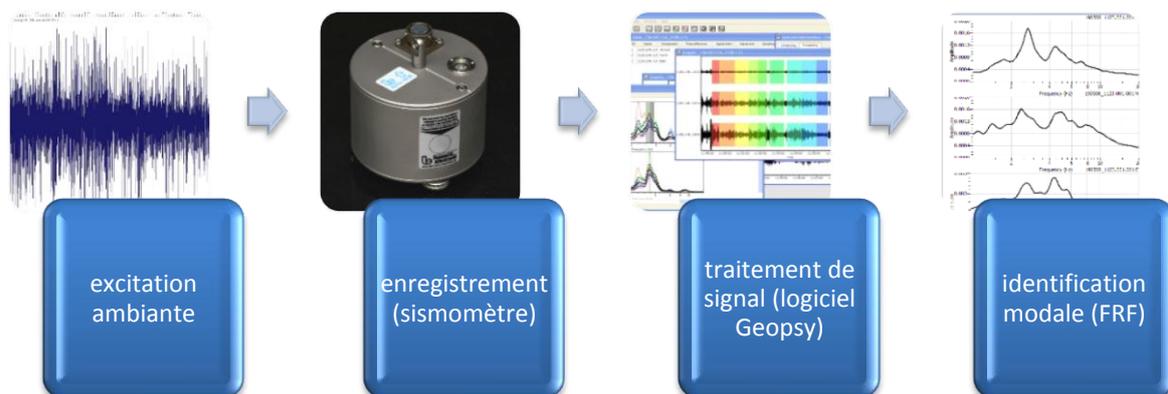


Figure III-3 Procédure de l'essai de vibrations ambiantes

#### III.5.1 Emplacement des mesures :

Les points de mesures ont été initialement judicieusement choisis afin de capter les amplitudes maximales des modes de vibration. Pour des contraintes de non accessibilité à certaines zones du barrage, le nombre de points de mesure a été réduit au minimum nécessaire. Le choix des points de mesure a été adopté de manière à ce que les résultats obtenus de l'essai, mettent en évidence la réponse globale du barrage.

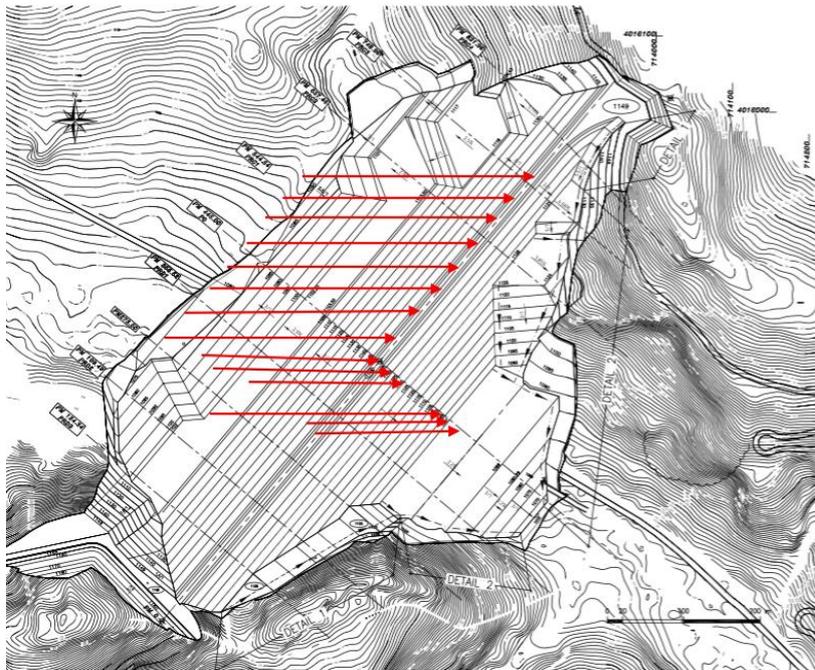


Figure III-4 Vue en plan représentant l'ensemble des points de mesures

Ayant rencontré un problème technique avec l'un des sismomètres utilisés lors de l'essai, nous nous sommes limités aux emplacements de mesures ci-dessus, sachant qu'on ne peut pas mesurer les modes de vibrations sans un capteur de référence.

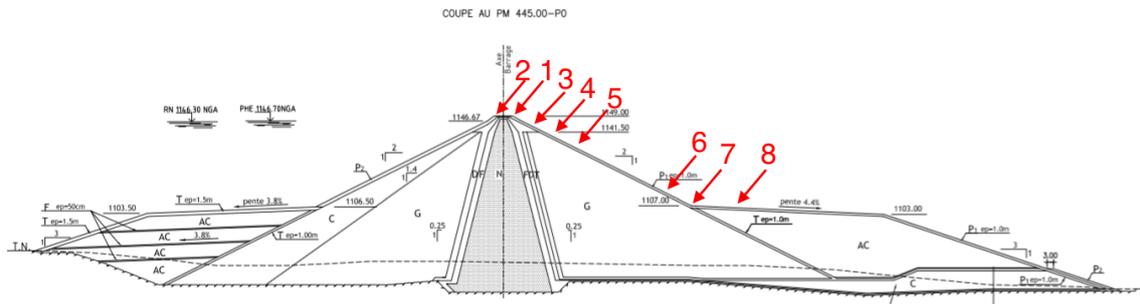


Figure III-5 Coupe transversale du barrage représentant les points de mesures

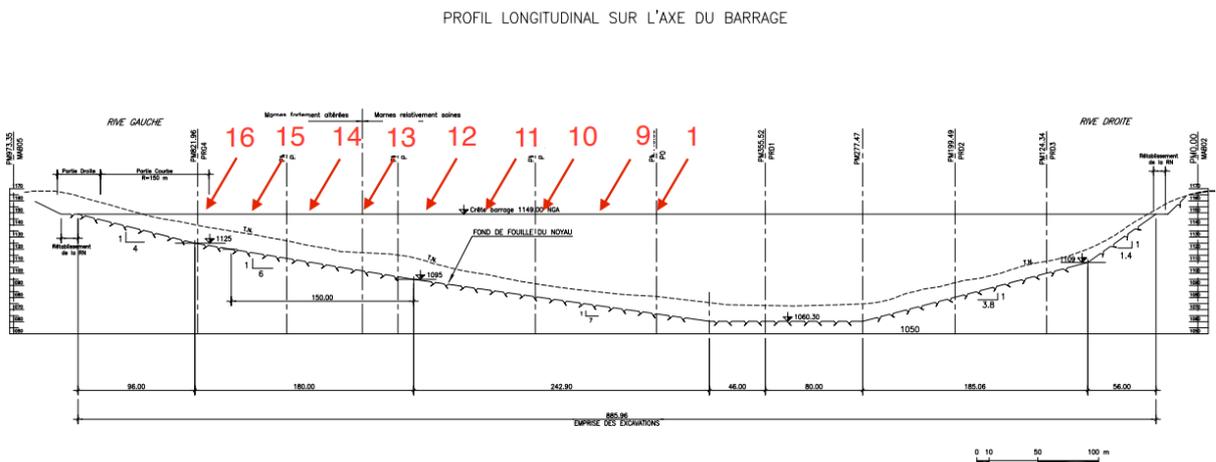


Figure III-6 Points mesure sens « Rive-Rive »

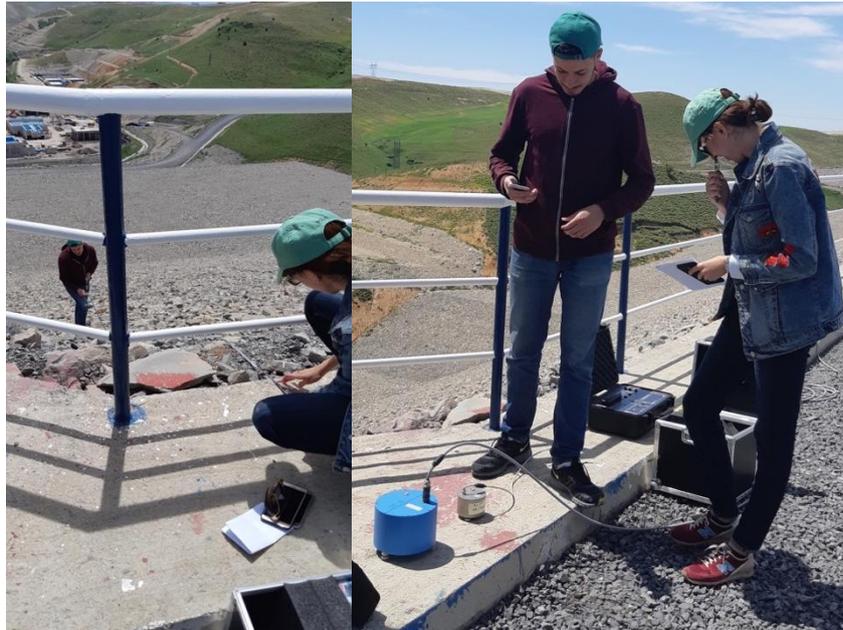


Figure III-7 réalisation de l'essai

### III.5.2 Instrumentation

Les instruments utilisés pour les mesures de vibrations ambiantes se composaient de deux stations d'acquisition de données City Shark-II avec deux capteurs d'enregistrement de vitesses (sismomètres de Lennartz Electronic) selon les trois directions orthogonales (N, E et Z). Un capteur a été placé comme référence pour la normalisation et l'autre comme baladeur pour couvrir les points de mesures projetés. Les signaux mesurés ont été traités à l'aide d'un logiciel de géophysique « GEOPSY » capable d'effectuer la plupart des opérations de traitement de signal pour l'analyse des données de vibrations ambiantes.



Figure III-8 Sismomètre et station de mesures

## CHAPITRE III : Essais de vibrations ambiantes

Capteurs :

Deux capteurs disponibles ont été utilisés lors des mesures en vibrations ambiantes

### - LE-3Dlite

Le LE-3Dlite avec une fréquence de coupure plus basse de 1 Hz est parfaitement adapté à tous les types de surveillance (micro)sismique locale.

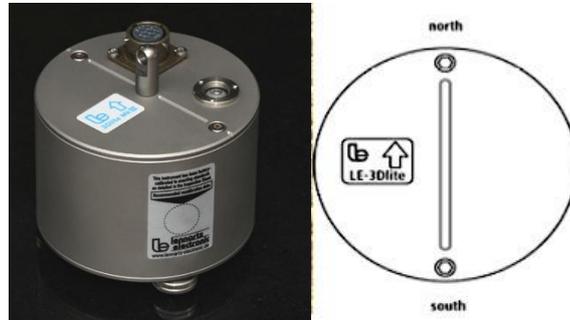


Figure III-9 Sismomètre LE-3Dlite

Caractéristiques essentielles :

- Instrument compact et robuste
- Boîtier en acier inoxydable
- Indice de protection IP67
- Très faible consommation d'énergie (<6 mA / 2,5 mA (3D/1D) @12 V DC)
- Installation simple et rapide (brancher et mesurer)
- Sensibilité et fonction de transfert uniformes
- Instrument à trois composants (LE-3Dlite)

### - LE-3D/5s

Ce sismomètre avec une fréquence de coupure inférieure de 0,2 Hz est parfaitement adapté à la surveillance sismique, aux mesures H/V bruit de fond et à la micro zonation sismique. Il présente un bon compromis entre portabilité, solidité, et gamme de mesures [0,15Hz-50Hz].



Figure III-10 Sismomètre LE-3D/5s

Caractéristiques et caractéristiques essentielles :

- Instrument robuste
- Indice de protection IP67
- Très faible consommation d'énergie (7 mA @ 12 V DC)
- Installation simple et rapide (brancher et mesurer)
- Sensibilité et fonction de transfert uniformes

### Station d'acquisition des données

City Shark II est un système d'acquisition de données polyvalent et fiable dédié aux applications géophysiques et civiles. Cet appareil d'enregistrement synchrone multicanal (uo à 18) principalement conçu pour l'enregistrement des vibrations ambiantes est capable d'enregistrer tout signal basse tension.



Figure III-11 Station City Shark II

City Shark II est un outil portable compact et convivial efficace pour l'étude des paramètres dynamiques des sols et des bâtiments. Le GPS interne, l'horloge de haute qualité et les capacités d'enregistrement continu permettent à City Shark II d'être utilisé également pour la surveillance sismique.

L'application de City Shark II est dédiée aux :

- Études sur les vibrations ambiantes
- Investigations en génie civil
- Surveillances des tremblements de terre
- Recherches géophysique

Les principaux avantages de City Shark II sont les suivants :

## CHAPITRE III : Essais de vibrations ambiantes

- City Shark II est un appareil portable indépendant doté d'une puissante batterie interne, d'une carte Compact Flash amovible pour un stockage de données efficace pour l'enregistrement synchrone d'un à six capteurs 3 composants (3 à 18 canaux).
- Il est possible d'utiliser à la fois des capteurs passifs et actifs. Les capteurs actifs sont directement alimentés par la station elle-même par le même câble que le signal enregistré.
- Le bruit interne est si faible qu'il permet d'utiliser un capteur 4.h Hz pour étudier des fréquences aussi basses que 0.2 Hz

### III.5.3 Traitement de signal :

#### III.5.3.1 Logiciel Géopsy

Le traitement des signaux issus des mesures de vibrations ambiantes a été fait en utilisant le logiciel « Géopsy » moyennant la technique de transformée de Fourier rapide FFT (Fast Fourier Transform) afin de procéder à l'identification modale de la structure.

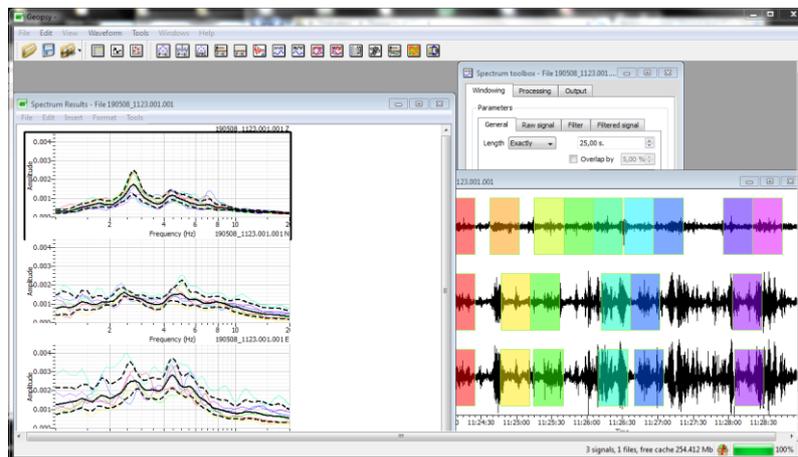


Figure III-12 Interface du logiciel d'acquisition « Géopsy »

Ce logiciel est une interface d'utilisation graphique pour la visualisation des formes d'ondes, le traitement de base et avancé du signal. Ces derniers sont implémentés dans des plug-ins qui sont installés en option :

- Rapport H/V et spectre d'amplitude
- Estimation de l'amortissement à partir d'une décroissance aléatoire
- Mouvement des particules
- Réseau vibratoire ambiant
- Expérience source active (MASW)
- Empilage de signaux pour la réduction du bruit
- Analyse temps-fréquence
- Plus-moins réfraction (pas encore disponible)

### III.5.3.2 Traitement dans le domaine fréquentiel

### III.5.4 Paramètres d'enregistrement des vibrations ambiantes

Les différents paramètres d'entrée pour l'essai de vibrations ambiantes sont récapitulés dans le **tableau III-2** suivant :

**Tableau III-2 Paramètres d'enregistrement de l'essai de vibrations ambiantes**

Paramètres	Descriptif
<b>Gain</b>	<p>Le réglage se fait sur la base du degré de saturation du signal tout en permettant l'amplification du signal enregistré.</p> <p>Le gain a été fixé à 1024 bits sans saturation.</p>
<b>Fréquence d'échantillonnage</b>	<p>La fréquence devrait être choisie de telle sorte à ce que la fréquence d'échantillonnage du signal soit égale ou supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans ce signal permettant la conversion du domaine temporel à celui fréquentiel (Nyquist-Shannon (1960))</p> <p>Une fréquence au-delà de 100 Hz est préconisé pour notre barrage</p>
<b>Durée d'enregistrement</b>	<p>La durée d'enregistrement équivaut un temps minimal <math>T = \text{Max} (100 / \omega_k \xi_k)</math> [s]. (Brincker et al. (2003)).</p> <p>Une durée d'enregistrement de 5min a été choisie pour couvrir toutes les fréquences fondamentales correspondant à un amortissement de l'ordre de 10%.</p>

### III.6 Résultats des mesures expérimentales

Lors de l'essai de vibrations ambiantes, 16 points de mesure ont été étudiés suivant la coupe transversale du barrage (sens amont-aval) et la coupe longitudinale (sens rive-rive).

Le traitement des données expérimentales par le logiciel d'acquisition de données (Géopsy) a donné les courbes FRF traduisant la réponse locale du barrage de ces différents points de mesures.

Le signal brut a été traité grâce à la bibliothèque FFTW (Fast Fourier Transformation in the West), en utilisant un fenêtrage approprié la transformé rapide de Fourier a été calculée pour chaque fenêtre ambiante sélectionnée dans le domaine temporel. Le spectre de fréquence a ainsi été calculé et moyenné sur toute la sélection.

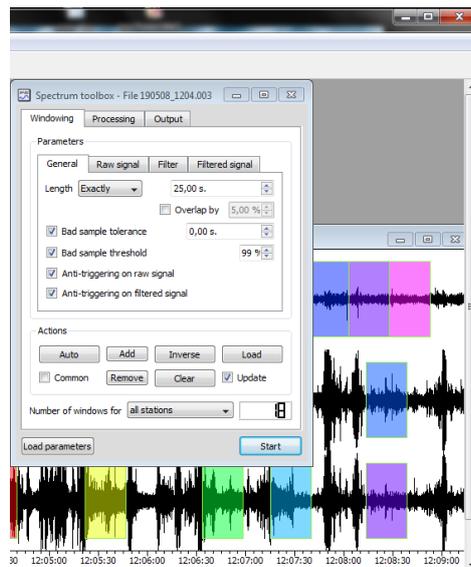


Figure III-13 Traitement du signal brut

Pour le premier point de mesure se situant sur la crête du barrage, le traitement de signal effectué par le logiciel « Géopsy » a donné les courbes FRF suivant les directions (N, E, Z) .

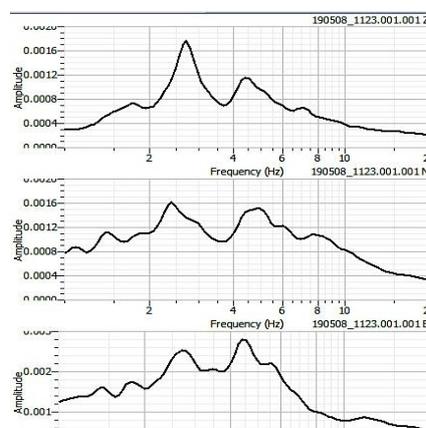


Figure III-14 Les FRF du point de mesure «1»

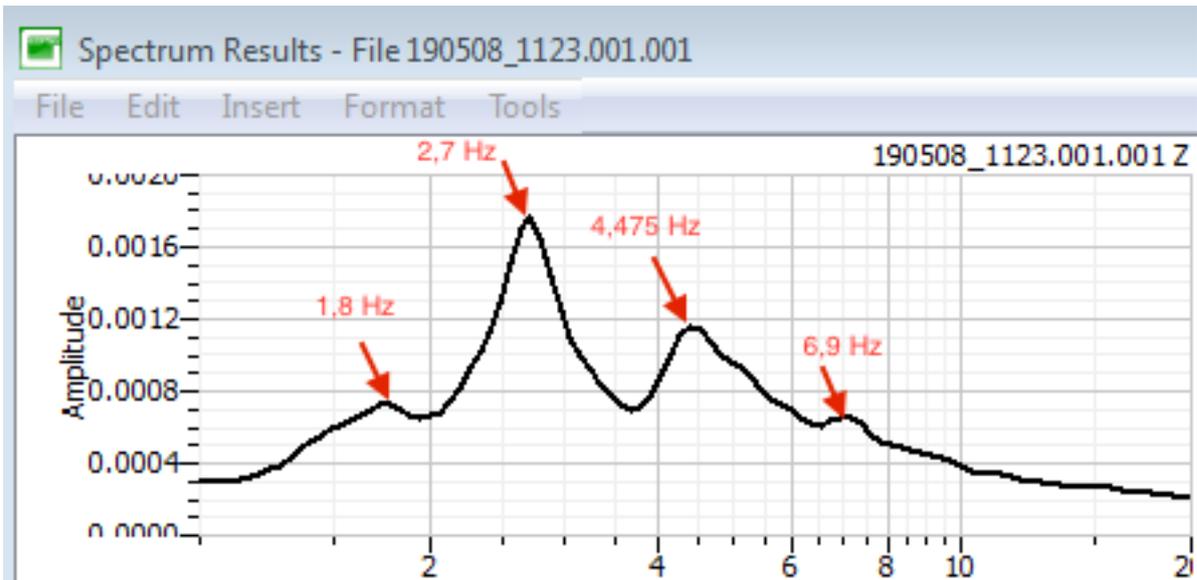


Figure III-15 FRF du Point de mesure (1) sur la crête suivant Z

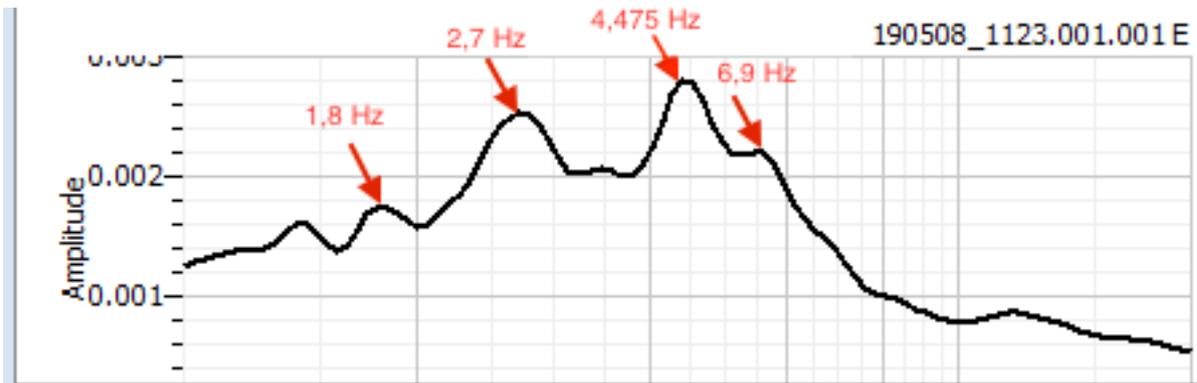


Figure III-16 FRF du point de mesure (1) suivant X

Les différentes courbes FRF expérimentales des points de mesures relatives au sens « amont-aval » sont présentées ci-dessous **Figure III-17**.

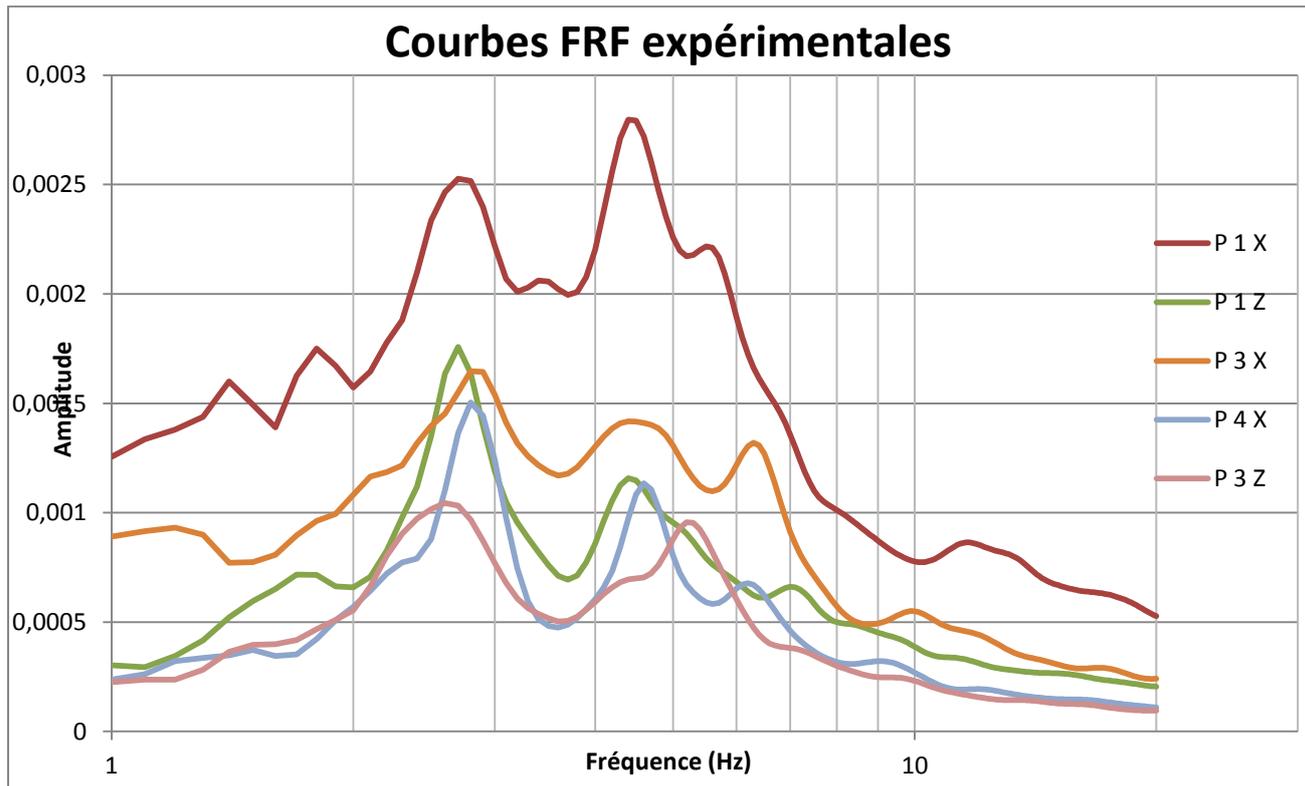


Figure III-18 Représentation des FRF expérimentales

Ayant opté pour une approche globale du problème seul les points dont les courbes FRF présentent des pics clairs ont été retenus. (L'ensemble des courbes FRF expérimentales se trouvent en annexe). La méthode du « Peak Picking » nous a permis de déterminer les pics des FRFs relatifs aux points de mesures sélectionnés précédemment, ceux-ci sont présentés dans le **tableau III-3** suivant tout en se limitant à une fréquence de l'ordre de 10Hz dans le choix des modes propres.

Tableau III-3 Fréquences expérimentales issues du « Peak Picking »

Point de mesures	Méthode de Peak Picking sur 3 points de mesure « amont-aval »				
	$P_{1x}$	$P_{1z}$	$P_{3x}$	$P_{3z}$	$P_{4x}$
Fréquences	1,8	1,8	2,8	2,8	2,6
Expérimentales détectées	2,7	2,7	4,5	4,4	4,2
$f_{exp}$ (Hz)	3,4	4,4	6,3	5,3	
	4,4	7		7,3	
	5,5			10	

Nous nous sommes limités aux fréquences basses pour le choix des modes car ce sont ceux qui influencent le plus la réponse du barrage.

### III.7 Conclusion :

Les essais de vibrations ambiantes, de part de leur simplicité et efficacité pour l'étude des ouvrages à pleine échelle, fournissent des paramètres essentiels de validation des modèles numériques en vue de leur usage dans la surveillance vibratoire.

La réalisation de l'essai de vibrations ambiantes sur le barrage de Mahouane nous a fourni de données dont leur acquisition et analyse a permis d'obtenir les courbes « FRF » de chacun des points de mesures traduisant la réponse dynamique de l'ouvrage à une excitation ambiante.

Les fréquences détectées expérimentalement feront objet de paramètres de calage du modèle numérique afin de faire minimiser les écarts entre les propriétés numériques et réelles, jusqu'à ce que le modèle numérique représente fidèlement l'état initial de l'ouvrage permettant de faire des prédictions de qualité lors de la surveillance de l'état de santé structurale (SHM).

# **CHAPITRE IV**

## **Calage du modèle numérique**

### IV.1 Introduction :

En raison de l'aspect complexe du barrage modélisé aux éléments finis, opter pour une approche conventionnelle pour le calage du modèle numérique se révèle inefficace voire impossible. Pour pallier ce problème, nous avons procédé au calage par le développement d'un algorithme bio-inspiré permettant l'optimisation du problème.

Le présent chapitre met en évidence les notions élémentaires relatives aux algorithmes bio-inspirés et les aspects fondamentaux des algorithmes génétiques appliqués dans le cadre du calage du modèle numérique.

### IV.2 Justesse des modèles numériques :

Les modèles numériques en éléments finis sont susceptibles de comporter des lacunes en termes de représentativité des caractéristiques physiques réelles de la structure modélisée. Etant une simplification, tout modèle a ses limites et son domaine de validité en raison de l'influence de nombreux facteurs sur leur fiabilité, notamment les hypothèses simplificatrices concernant les conditions aux limites, les charges imprévues sur une structure et le comportement complexe des matériaux.

Le calage vise à valider les paramètres qu'adopte le modèle numérique permettant une prédiction fiable traduisant les propriétés de la structure réelle.

### IV.3 Principe du calage :

Le calage du modèle numérique est un processus d'ajustement de ce dernier afin qu'il reflète mieux les données observées de la structure physique modélisée en éléments finis qui est une approximation de l'objet physique réel modélisé [40].

Ce processus est fondamentalement un problème d'optimisation où les variables de conception sont les paramètres du modèle aux éléments finis qui sont jugés douteux et la fonction Objectif est une équation qui caractérise une certaine distance entre les prévisions du modèle aux éléments finis et celles des mesures.

### IV.4 Corrélation des résultats numériques et expérimentaux :

La corrélation peut être définie comme l'étape finale pour évaluer le degré de représentativité d'un modèle numérique. Les données expérimentales sont considérées comme étant plus précises et servent donc de référence pour évaluer la qualité du modèle en éléments finis. Si la différence entre les données analytiques et expérimentales se situe à l'intérieur d'une marge de tolérances préétablies, le modèle analytique peut alors être jugé représentatif.

Les raisons de l'écart entre les données du modèle par éléments finis et les données mesurées comprennent [40] :

- Les erreurs de structure du modèle, qui peuvent résulter de la difficulté de modéliser l'amortissement, les joints ;

- Les erreurs d'ordre de modélisation, qui peuvent résulter de la difficulté à modéliser la non-linéarité ;
- Des erreurs dans les paramètres du modèle, ce qui rend difficile l'identification des propriétés correctes des matériaux
- Les erreurs de mesure.

Plusieurs méthodes de corrélation peuvent être utilisés comme première appréciation de la qualité et la justesse des paramètres modaux numériques par rapport à ceux mesurés expérimentalement. Les différentes méthodes sont présentées ci-après.

### IV.4.1 Direct Natural Frequency Correlation

L'approche la plus courante et la plus simple pour corréler deux modèles modaux est la comparaison directe des fréquences naturelles[32]. Les données sont parfaitement corrélées si un tracé des valeurs expérimentales par rapport aux valeurs numériques se superposent. Un pourcentage d'écart peut également être défini comme :

$$\epsilon_{\omega_i} = \frac{|\omega_{A_i} - \omega_{X_i}|}{\omega_{A_i}} \times 100$$

Un indicateur de dispersion de fréquence globale peut être utilisé comme :

$$\phi_A = \left[ \frac{\sum_{i=1}^L (\omega_{A_i} - \omega_{X_i})^2}{\sum_{i=1}^L \omega_{A_i}^2} \right]^{1/2} \times 100$$

Où « L » est le nombre de fréquences propres mesurées ou de formes modales dans la gamme de fréquences d'intérêt.

### IV.4.2 Frequency Response Function Correlation :

L'utilisation de « Fonction de Réponse Fréquentielle » (FRF) au lieu de paramètres modaux pour le calage des modèles est relativement récente[32]. Cette approche présente certains avantages. Comme la FRF est une grandeur mesurée, les erreurs dues à l'extraction des paramètres modaux sont évitées.

Basé sur la technique MAC, et sur le concept de décalage de fréquence, Pascual et al (1996) ont proposé de mesurer la corrélation entre la FRF expérimentale et la FRF analytique en utilisant le critère (Frequency Domain Assurance Criterion) suivant :

$$FDAC(\omega_A, \omega_X, j) = \frac{(\{H_A(\omega_A)\}_j^T \{H_X(\omega_X)\})^2}{(\{H_A(\omega_A)\}_j^T \{H_A(\omega_A)\}_j) (\{H_X(\omega_X)\}_j^T \{H_X(\omega_X)\}_j)} ;$$

$$FDAC \in \{0,1\}$$

$j$  : la colonne mesurée de  $[H]$ .

$\omega_A$  : la fréquence à laquelle  $\{H_A\}$  est calculé

$\omega_x$  : la fréquence à laquelle la FRF a été mesuré expérimentalement.

Le critère d'assurance du domaine fréquentiel (FDAC) peut être considéré comme équivalent au MAC dans le domaine FRF. Comme pour MAC, les valeurs de FDAC sont limitées entre 0 et 1 : une valeur de 1 signifie une corrélation parfaite tandis que 0 signifie aucune corrélation du tout.

## IV.5 Méthode bio-inspirée :

### IV.5.1 Historique :

Les AE font partie du champ de l'Intelligence Artificielle (IA). Il s'agit d'IA de bas niveau, inspirée par " l'intelligence " de la Nature. Intelligence que l'on peut définir de la façon suivante [41] :

« La capacité d'un system à s'adapter d'une manière adéquate à son environnement »

Les Algorithmes Evolutionnaires (AE) sont inspirés du concept de sélection naturelle élaboré par Charles Darwin. Le vocabulaire employé est directement calqué sur celui de la théorie de l'évolution et de la génétique. Nous parlerons donc d'individus (solutions potentielles), de population, de gènes (variables), de chromosomes, de parents, de descendants, de reproduction, de croisement, de mutations, etc, en s'appuyant constamment sur des analogies avec les phénomènes biologiques [42].

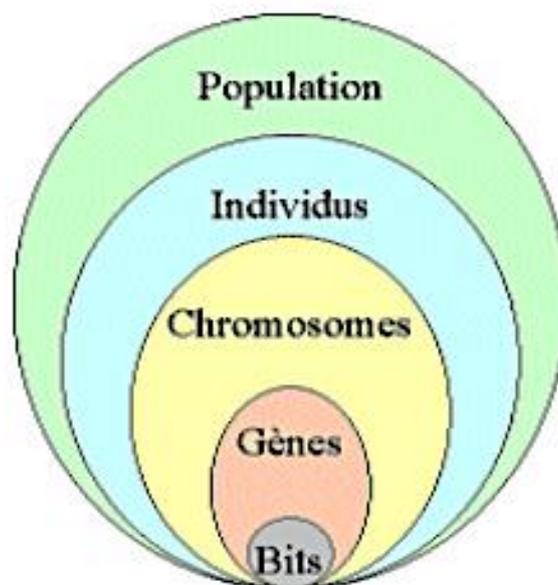


Figure IV-1 Formulation des AGs

### IV.5.2 Particularité :

Les AE constituent une approche originale : il ne s'agit pas de trouver une solution analytique exacte, ou une bonne approximation numérique, mais de trouver des solutions satisfaisant au mieux différents critères, souvent contradictoires. S'ils ne permettent pas de trouver à coup sûr la solution optimale de l'espace de recherche, du moins peut-on constater que les solutions fournies sont généralement meilleures que celles obtenues par des méthodes plus classiques, pour un même temps de calcul [43].

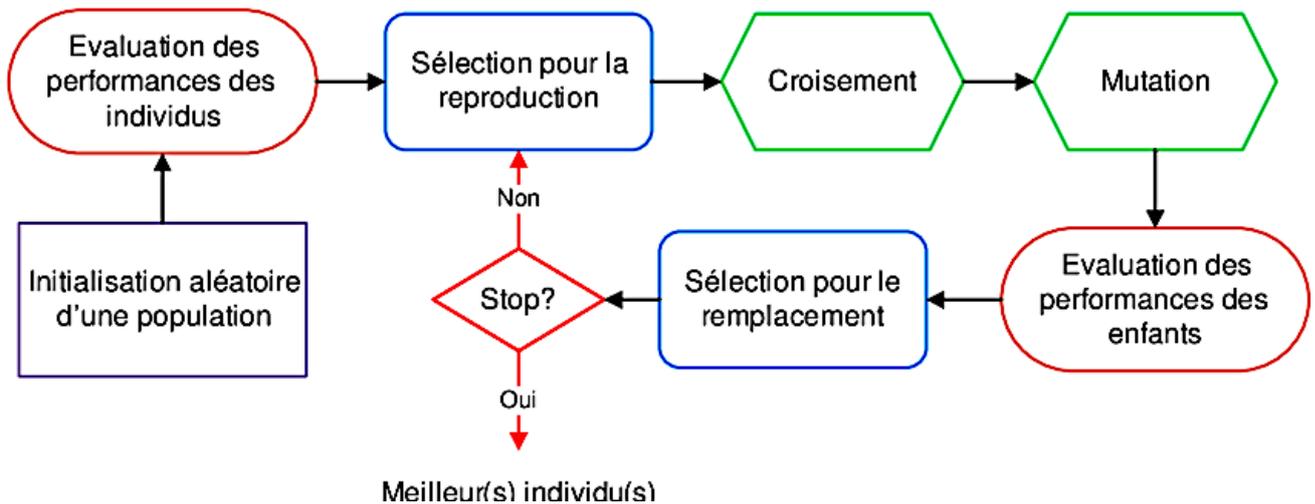


Figure IV-2 Organigramme des AEs

### IV.5.3 Dérivées des AE :

Trois types d'AE ont été développés isolément et à peu près simultanément, dans les années 60, par différents scientifiques : les Algorithmes Génétiques, les Stratégies d'Évolution, et la Programmation Évolutionnaire. Présentant des différences marquées à l'origine, ils tendent de plus en plus à se confondre suite à leurs emprunts respectifs [44]. Dans les années 90, ces trois champs ont commencé à sortir de leur isolement et ont été regroupés sous le terme anglo-saxon d'Evolutionary Computation.

## IV.6 Algorithme génétique :

Parmi les AE cités précédemment, l'application des Algorithmes Génétiques (AG) est privilégiée en raison de la simplicité des notions et la robustesse de l'implémentation algorithmique en terme de temps d'exécution.

Leur particularité est qu'ils sont fondés sur le Néo-Darwinisme, c'est-à-dire l'union de la théorie de l'évolution et de la génétique moderne. Ainsi, les variables sont généralement codées en binaire (par analogie avec les quatre lettres de l'alphabet génétique) sous forme de gènes dans un chromosome. Des opérateurs génétiques (croisement, mutation) sont appliqués à ces chaînes binaires que sont les chromosomes [45].

### IV.6.1 Optimisation par les AGs :

L'optimisation consiste à rechercher la meilleure solution d'un problème au sens d'un ou de plusieurs critères choisis en respectant les caractéristiques du système et les contraintes qui lui sont imposées. Les AGs utilisés pour résoudre les problèmes d'optimisation nécessitent le codage de l'ensemble des paramètres d'origine du problème à optimiser en une chaîne de caractères, de longueur finie. Enfin, ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes [46].

### IV.6.2 Domaine d'application :

Les applications des AG sont multiples [43]: optimisation de fonctions numériques difficiles (discontinues, multimodales, bruitées...), traitement d'image (alignement de photos satellites, reconnaissance de suspects...), optimisation d'emplois du temps, optimisation de design, contrôle de systèmes industriels, apprentissage des réseaux de neurones, etc. Les AG peuvent être utilisés pour contrôler un système évoluant dans le temps (chaîne de production, centrale nucléaire...) car la population peut s'adapter à des conditions changeantes. En particulier, ils supportent bien l'existence de bruit dans la fonction à optimiser. Ils peuvent aussi servir à déterminer la configuration d'énergie minimale d'une molécule ou à modéliser le comportement animal.

### IV.6.3 Aspect de l'algorithme génétique :

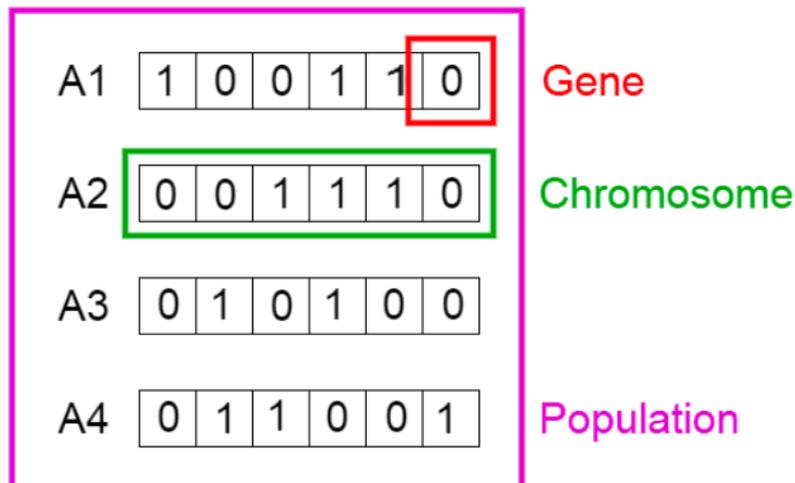
Les trois aspects les plus importants de l'utilisation d'un algorithme génétique sont [46] :

#### ➤ 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*.

- Un individu est représenté par un chromosome (génome) représenté à son tour d'une chaîne de gènes ;
  - Le phénotype représente l'ensemble des valeurs observables prises par chaque gène.
  - Le génotype donne une représentation codée d'une solution potentielle sous la forme d'un chromosome.
- 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 de chromosomes ou de points de l'espace de recherche ;
- *Environnement* : L'espace de recherche ;

La figure IV-3 illustre la composition d'une population génétique.



### IV-4 Représentation d'une population génétique

#### ➤ La définition de la fonction « Objectif » :

Chaque individu a une fonction Objectif «  $f$  » (fonction « fitness ») qui mesure l'adaptation de l'individu à son environnement local. C'est la fonction - positive - que nous cherchons à maximiser.

La théorie darwinienne indique que, parmi des individus d'une population, celui qui est le mieux adapté à l'environnement local a le plus de chance de survivre et d'avoir un plus grand nombre de descendants : c'est la règle de la « survie du plus fort ». Ainsi, la fonction objectif «  $f$  » du problème d'optimisation joue le rôle d'un critère d'adaptation [18]. Un des points les plus importants des algorithmes génétiques est la flexibilité dans la fonction objective.

#### ➤ 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* 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 élevée aura plus de chance d'être sélectionné qu'un autre avec une valeur de « fitness » inférieure. Cette fonction peut être envisagée comme une mesure de profit ou de qualité qu'on souhaite maximiser.

- **Le croisement :**

## CHAPITRE IV : Calage du modèle numérique

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.

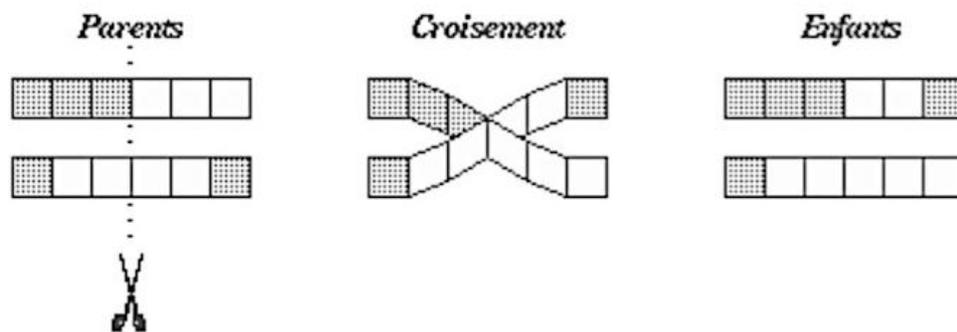


Figure IV-5 Opérateur de croisement

- **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.

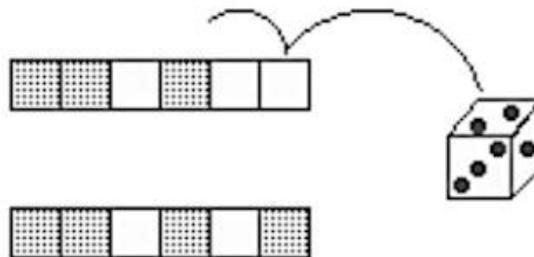


Figure IV-6 Opérateur de mutation

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).

### IV.6.4 Procédés des AGs

Le procédé général de l'AG est récapitulé comme suit :

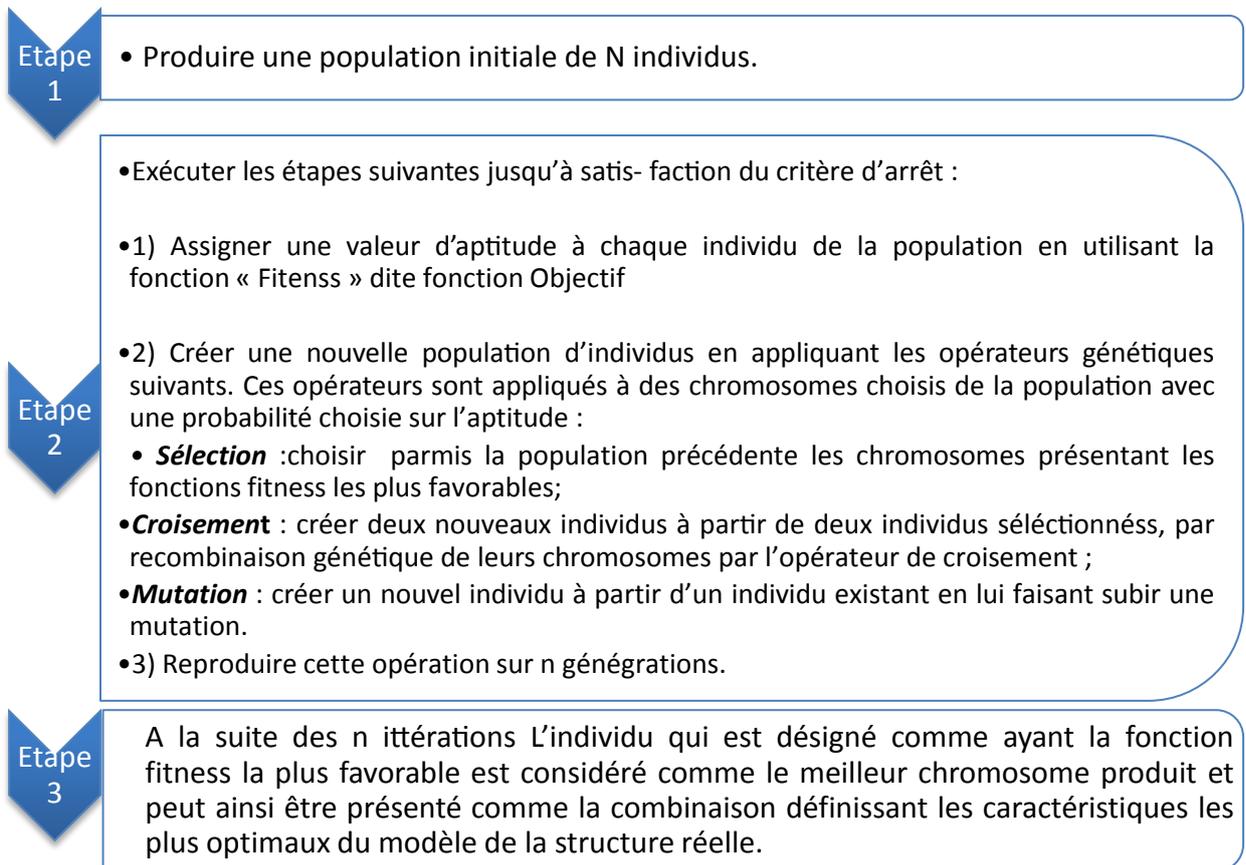


Figure IV-7 Démarche d'un AG

## IV.7 Approches adoptées pour le calage du modèle numérique

### IV.7.1 Sélection des fréquences cibles :

Afin de corrélérer les fréquences obtenues de l'analyse numérique d'un modèle en éléments finis avec les fréquences cibles expérimentales, nous avons procédé de la manière suivante :

Les fréquences expérimentales, étant représentatives de la réponse locale des points de mesures de l'essai de vibrations ambiantes, sont sélectionnées en tant que fréquences cibles pour le calage du modèle éléments finis 2D par le biais des modes numériques ayant le taux de participation massique le plus prépondérant sélectivement.

Une fréquence cible représente la moyenne des fréquences des pics adjacents se retrouvant dans la plage de variation des fréquences numériques  $\{f_{min}, f_{max}\}$  du mode ayant un taux de participation massique important dans une direction donnée.

## CHAPITRE IV : Calage du modèle numérique

Les différents modes pris en compte sont ceux dont leurs intervalles  $\{f_{min}, f_{max}\}$  respectifs comportent au moins un pic de la courbe FRF expérimentale. Les différents paramètres de sélection sont présentés dans le **tableau IV-1** et **2** ci-dessous.

**Tableau IV-1 Taux de participation massique du modèle 2D pour un module élastique minimal**

	Fréquence numérique $f_{min}$ (Hz)	$E_{min}$	
		Taux de participation massique	
		$U_x$	$U_z$
<b>Mode 2</b>	1,27	0,003	0,076
<b>Mode 6</b>	2,15	0,006	0,004
<b>Mode 13</b>	3,06	0,007	0,010

**Tableau IV-2 Taux de participation massique du modèle 2D pour un module élastique maximal**

	Fréquence numérique $f_{max}$ (Hz)	$E_{max}$	
		Taux de participation massique	
		$U_x$	$U_z$
<b>Mode 2</b>	2,009	0,003	0,075
<b>Mode 6</b>	3,42	0,007	0,004
<b>Mode 13</b>	4,82	0,009	0,014

L'ensemble des fréquences cibles déduites de cette étude sont les suivantes :

$$f_{exp}(Hz) = \{1,8 ; 2,7 ; 4,475\}$$

### IV.7.1.1 Corrélation entre fréquences numériques et fréquences expérimentales :

Le degré de corrélation, entre les fréquences du modèle numérique et les fréquences cibles de la structure réelle, est déterminé par le biais de la formule de l'erreur cumulée défini comme suit :

$$E_{cumul} = \alpha_1 \left| \frac{f_{num,1} - f_{exp,1}}{f_{exp,1}} \right| + \alpha_2 \left| \frac{f_{num,2} - f_{exp,2}}{f_{exp,2}} \right| + \alpha_3 \left| \frac{f_{num,3} - f_{exp,3}}{f_{exp,3}} \right|$$

Où les  $\alpha_i$  représentent le coefficient de pondération propre à chaque pic de la courbe FRF expérimentale. La valeur attribuée pour chacun des coefficients est telle que :

$$\begin{cases} \alpha_1 = 0,3 \\ \alpha_2 = 0,5 \\ \alpha_3 = 0,2 \end{cases} ; \quad \sum \alpha_i = 1$$

$$\begin{cases} f_{exp,1} = 1,8 \text{ Hz} \\ f_{exp,2} = 2,7 \text{ Hz} \\ f_{exp,3} = 4,475 \text{ Hz} \end{cases}$$

### IV.7.2 Approche algorithmique

Nous avons procédé à l'élaboration d'un algorithme capable d'effectuer des changements de rigidité de façon automatique, puis comparer les fréquences réelles et numériques, et de sortir la combinaison des modules élastiques donnant les fréquences numériques les plus proches des fréquences expérimentales donnant la réponse spectrale la plus proche de celle obtenue par les essais de vibrations ambiantes

#### IV.7.2.1 Principe de l'approche

Chaque matériau est caractérisé par une valeur de module élastique appartenant à l'intervalle discrétisé. La discrétisation s'est faite en 6 sous intervalles. Pour des raisons de simplification chaque interval de variation est discrétisé en 6 points variant du min au max comme suit

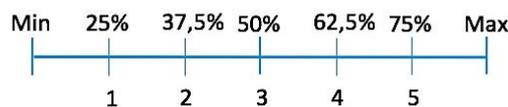


Figure IV-8 Représentation graphique d'un intervalle de E discrétisé

Ce découpage permet de prendre en compte les cas les plus probables d'une solution du problème, sans tenir compte des valeurs extrêmes (min, max) en s'inspirant des lois probabilistes (Cloche de Gausse) [13].

Nous avons opté pour des marges de variation relativement large pour pouvoir balayer le maximum de cas dans le but d'étudier la faisabilité de cette méthode d'optimisation plutôt que de déterminer la solution exacte pour notre problème.

#### IV.7.2.2 Méthode « Tank » :

Cette méthode consiste à prendre en compte l'ensemble des combinaisons possibles pour ces 5 variations des 6 matériaux ce qui revient à créer  $5^6 = 15\ 625$  cas possibles, constituant ainsi une base de données dont les fréquences propres retournées doivent être comparés aux fréquences propres expérimentales afin d'estimer le degré de corrélation des modèles qui en découlent.

Cette méthode bien que donnant le résultat le plus optimale pour les valeurs de E pris en compte, elle est néanmoins excessivement coûteuse en temps

Pour cela notre choix s'est porté sur la deuxième méthode qui est quant à elle plus rapide

#### IV.7.2.3 Algorithme génétique :

Nous avons adapté l'algorithme génétique à notre cas d'étude en suivant la représentation génétique suivante :

- **Initialisation :**

## CHAPITRE IV : Calage du modèle numérique

---

Une population initiale contenant 20 individus (chromosomes), chaque chromosome comporte 6 gènes, chaque gène représente une valeur de E d'un matériau. Celle-ci est représentée par une valeur discrète de 1 à 5 tirée aléatoirement. Un chromosome est un vecteur ligne dont les colonnes contiennent une valeur du phénotype.

### - Évaluation :

Chaque chromosome est décodé puis les valeurs des modules élastiques pour de chaque matériau sont implémentées dans le programme puis l'analyse modale est effectuée. Les valeurs tirées de cette dernière feront l'objet d'une comparaison à l'aide de la fonction Objectif suivante

$$\epsilon_{\omega_i} = \frac{|\omega_{A_i} - \omega_{X_i}|}{\omega_{A_i}} \times 100$$

Cette dernière (fonction Objectif) évalue l'écart entre les fréquences numériques et les fréquences cibles

$$f_{exp}(Hz) = \{1,8 ; 2,7 ; 4,475\}$$

### - Sélection :

Création d'une nouvelle population de  $N$  chromosomes par l'utilisation d'une méthode de sélection appropriée.

Afin que la nouvelle population soit de meilleures qualités que celle qui la précède les gènes sont triés selon leur fonction objectif, les 8 parents dont la fonction objectif présente le meilleur taux sont sélectionnés pour la reproduction et participent à la création des nouveaux gènes

L'inconvénient majeur de cette méthode repose sur le fait qu'un individu n'étant pas le meilleur peut tout de même dominer la sélection. Elle peut aussi engendrer une perte de diversité par la domination d'un super individu.

Pour réduire quelque peu cet effet dans notre approche de l'algorithme génétique les générations créées sont ajoutées à celle qui les précède ce qui fait que les générations antérieures sont préservées

### - Reproduction :

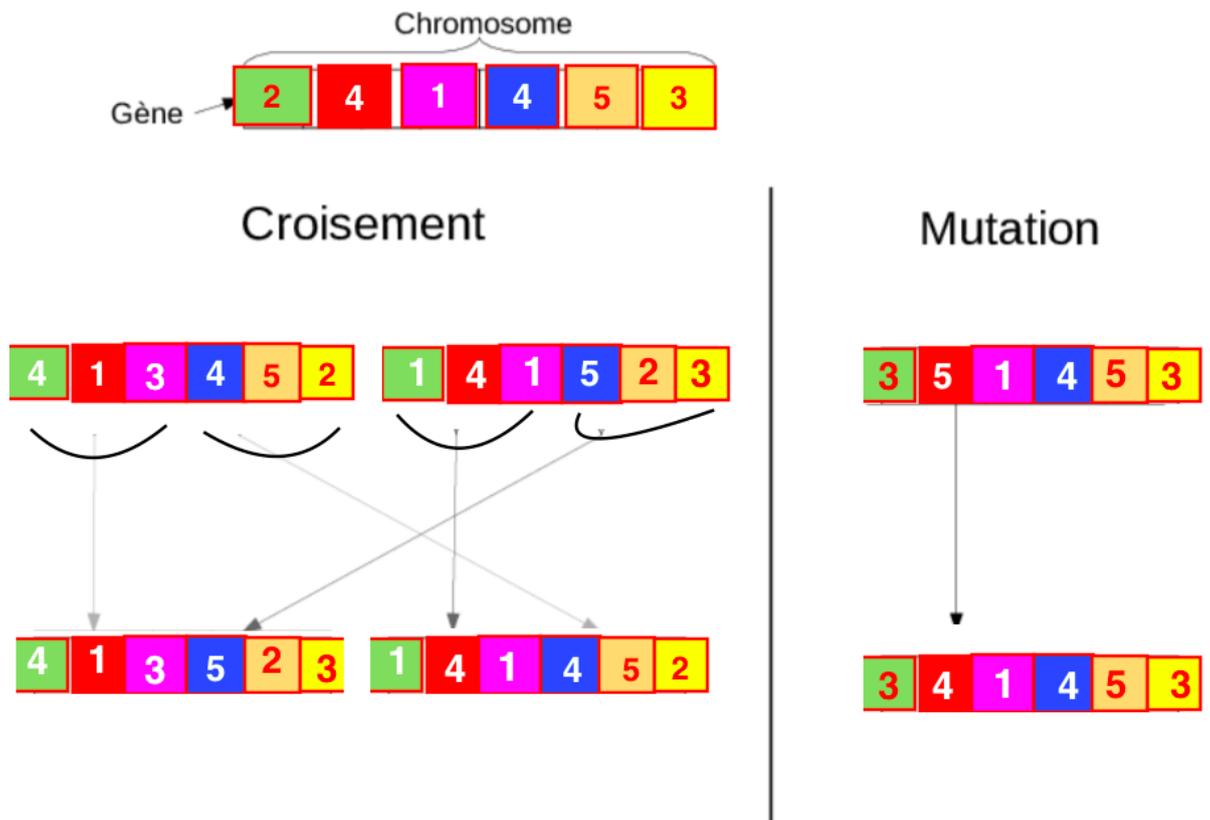
Possibilité de croisement et mutation au sein de la nouvelle population. Dans cette étape 40% des « parents » sélectionnés pour un processus de **croisement** donnent à la suite une combinaison 8 « enfants » au travers le mélange de leurs gènes.

### - Mutation :

Dans cette étape 2 fils parmi les 8 constitués sont choisis aléatoirement et subissent une mutation d'un de leur gène afin d'optimiser le processus de création de chromosome différents de ceux des générations précédentes

La construction des nouveaux chromosomes ainsi réalisée, ces derniers sont ajoutés à la population parente afin de créer la nouvelle génération constituée ainsi de 20+8+2 individus.

La **figure IV-9** représente les deux opérations principales de génération des nouveaux chromosomes



**Figure IV-10** Processus de génération de population

### - Retour :

Au final l'optimisation des valeurs du module élastique propres à chaque matériau définissant le modèle numérique lors du processus de calage se fait suivant l'organigramme de l'algorithme génétique présenté ci-dessous. L'implémentation de l'algorithme s'est faite pour 30 populations afin d'apprécier la qualité des résultats obtenus en passant par la phase d'évaluation pour chaque population générée.

L'erreur cumulée pour chaque génération ( $i$ ) est calculé pour une appréciation du degré de corrélation entre le numérique et l'expérimental. Plus l'erreur cumulée est petite mieux sont les propriétés du modèle numérique, telle que :

$$E_{cumul}(i) = \frac{\sum E_{cumul}}{n}$$

Où  $n$  est le nombre d'individu de chaque génération.

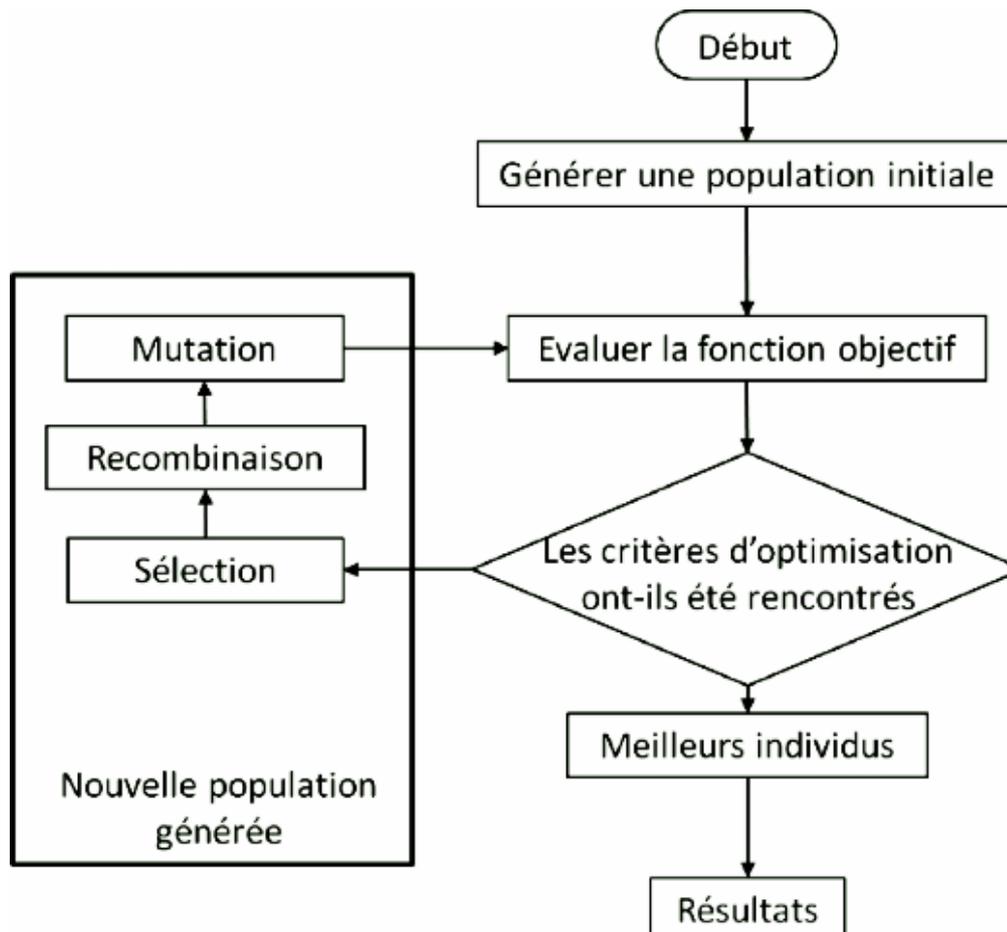
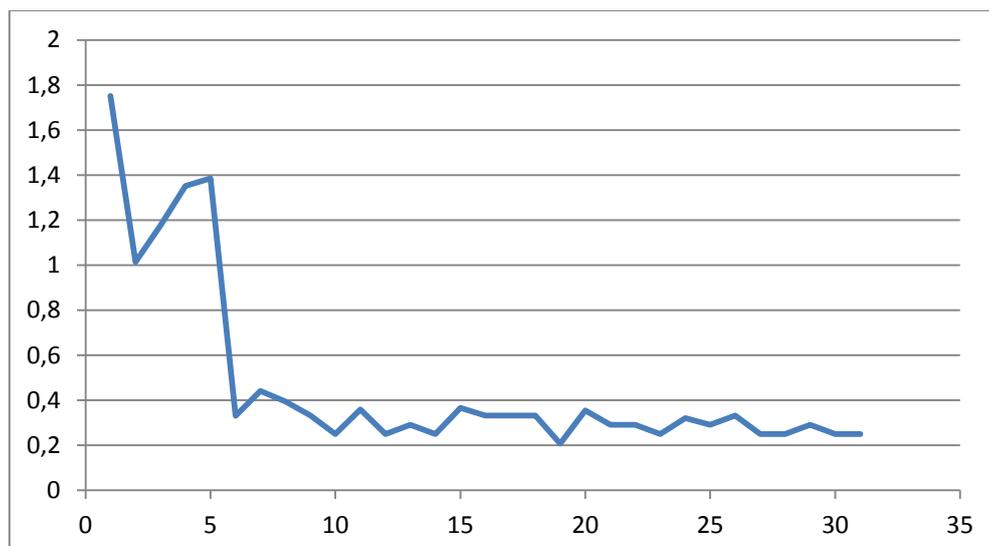


Figure IV-11 Organigramme de l'AG

#### IV.7.2.3.1 Résultats :

La qualité de l'ensemble des générations issues de l'algorithme génétique est évaluée en calculant son erreur cumulée, c'est-à-dire la fonction « Objectif » cumulée, de tous les individus composant la génération.



IV-12 Convergence de l'erreur cumulée

## CHAPITRE IV : Calage du modèle numérique

A la suite des 30 itérations le résultat considéré comme optimum porte la combinaison présentée dans le **tableau IV-3** suivant. L'erreur qui lui est associé est de 3,92% ce qui correspond à un taux de corrélation de 96%

**Tableau IV-3 Paramètres obtenus pour un parent de la dernière génération**

	Argile	Enrochement	Filtre sable sec	grés	recharge alluviale	SOL
<b>Code génétique</b>	4	3	4	3	3	2
<b>Valeur de E (MPa)</b>	2157938	4833781,5	849156,125	11388289	1587754,5	1380178

Les fréquences propres obtenues pour le premier parent de la dernière génération, ayant la plus petite erreur, sont présentées dans le **tableau IV-4** suivant :

**Tableau IV-4 fréquences modales sont pour les 13 premiers modes**

Mode (i)	Fréquence f (Hz)
<b>1</b>	1,129681
<b>2</b>	1,735156
<b>3</b>	2,01E+00
<b>4</b>	2,384888
<b>5</b>	2,634089
<b>6</b>	2,760584
<b>7</b>	2,968669
<b>8</b>	3,31665
<b>9</b>	3,404881
<b>10</b>	3,672594
<b>11</b>	3,768384
<b>12</b>	3,982091
<b>13</b>	4,165609

### IV.7.2.3.2 Discussion des résultats :

Le calage du modèle numérique par les algorithmes génétiques s'est basé essentiellement sur les points suivants :

- La prise en compte des fréquences expérimentales cibles les plus prépondérantes en terme de taux de participation massique pour la fonction Objectif ;
- L'Optimisation de la valeur des différents modules élastiques propres à chaque matériau pour une meilleure corrélation entre les fréquences propres numériques et expérimentales ;

L'application des algorithmes génétiques pour le calage du modèle numérique en question s'est montré efficace donnant des résultats assez satisfaisants pour une implémentation réalisé pour 30 populations. L'erreur cumulée lors de chaque itération s'avère optimisée en convergeant de plus en plus vers une erreur minimisée définissant une meilleure corrélation entre les fréquences numériques et celles expérimentales prises en tant que fréquences cibles.

## IV.8 Conclusion

Un modèle numérique comportant des incertitudes est assimilé à un problème à multiples variables. En général, l'utilisation des approches conventionnelles pour corriger les imperfections du modèle numérique élaboré, par rapport au cas réel, est suffisante. Or pour notre cas d'étude, l'optimisation par le biais de la méthode « Tank » des paramètres incertains du modèle numérique, à savoir les divers modules élastiques propres à chaque matériau du barrage modélisé, s'est avéré contraignant en terme de temps de résolution. Pour pallier ce problème, une approche intelligente, se découlant des algorithmes évolutionnaires, a été adoptée pour la procédure du calage.

Les algorithmes génétiques, une méthode bio-inspirée, conférant aux problèmes d'incertitude une certaine souplesse dans le choix des critères de convergence, permet le calage du modèle numérique en donnant naissance à plusieurs solutions satisfaisant les critères prédéfinis par le biais de la fonction Objectif.

Le modèle numérique est assimilé à un chromosome comportant des gènes définissant les paramètres incertains du modèle. Les différentes populations générées, se présentent sous forme de combinaisons des divers modules élastique qu'adopte le modèle.

L'ensemble des résultats que fournit l'algorithme donne une appréciation sur La qualité de chaque population générée par le biais de la fonction Objectif représentant le degré de corrélation entre le modèle numérique et la structure réelle.

Le présent chapitre a mis en valeur l'efficacité des algorithmes génétiques pour le calage des modèles numériques comportant multiples paramètres incertains en donnant naissance à diverses solutions optimisées répondant aux critères de choix définis par la fonction Objectif, tout en permettant une convergence rapide des données numériques vers celles expérimentales.

# **CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

## CONCLUSION GENERALE

---

Afin de mettre en évidence la complémentarité entre la modélisation numérique en éléments finis et la surveillance vibratoire, le présent projet a été conduit et appliqué sur un ouvrage d'art. Une modélisation numérique du barrage en remblai de Mahouane a été menée, suivie par une collecte et acquisition de données issues de la vibration ambiante, puis calage du modèle numérique par le biais d'algorithmes génétiques.

Plusieurs variantes de modèles en éléments finis ont été élaborées avec différents maillages. Il résulte de l'étude comparative entre les variantes du modèle bidimensionnel et la méthode simplifiée de Tardieu pour les fréquences fondamentales du barrage, la prise en compte de deux variantes du modèle numérique 2D. Un maillage relativement fin a ainsi été adopté présentant un compromis entre la précision des résultats numériques et le coût de la simulation numérique.

Un modèle numérique bidimensionnel avec fondation a également été élaboré pour compléter la procédure de calage servant de modèle de référence. La comparaison des modèles 2D avec le modèle 3D a permis de montrer une correspondance acceptable de ces modèles par rapport à leurs réponses modales respectives.

En raison des difficultés rencontrées par rapport à l'aspect géométrique complexe du barrage et les limitations techniques lors des mesures In-Situ, le modèle 2D avec fondation a été considéré comme modèle simplifié dans cette étude.

Le choix des paramètres du modèle numérique est très important. En effet les résultats numériques dépendent fortement des multiples variables à savoir les paramètres physiques (précisément le module élastique propre à chaque matériau), les conditions aux limites... etc. C'est pour ces raisons que la présente étude vise à mettre en évidence l'identification et le calage du modèle numérique par l'essai de vibrations ambiantes et l'algorithme génétique.

La deuxième étape de cette étude consiste après la modélisation numérique, de réaliser les essais In-Situ de vibrations ambiantes sur le barrage de Mahouane et la collection des données expérimentales. Les vibrations ambiantes ont été effectuées sur des points de mesures prédéfinis suivant la coupe transversale du barrage (sens amont-aval) mettant en évidence la déformation plane de l'ouvrage présentée par le modèle 2D. D'autres mesures ont été effectuées également suivant le sens longitudinal (sens rive-rive) pour une éventuelle exploitation des résultats pour le modèle numérique 3D.

L'acquisition des résultats expérimentaux nous a fourni les propriétés dynamiques du barrage. Les fréquences propres expérimentales ont été obtenues en se basant sur la technique de « Peak Picking » pour la sélection des pics des FRFs, des courbes traduisant la réponse des points de mesures sous sollicitations ambiantes dans le domaine fréquentiel.

Afin de minimiser les écarts entre les paramètres modaux du modèle numérique et ceux de la structure modélisée, une fonction « objectif » a été établie définissant le degré de corrélation entre les fréquences numériques et expérimentales. Les fréquences cibles sont celles sélectionnées des FRFs expérimentales correspondant aux modes propres numériques d'un taux de participation massique important.

La présence de nombreux paramètres incertains dans le modèle numérique ont conduit à l'application d'une approche bio-inspirée robuste s'agissant de l'optimisation par algorithmes génétiques. Ces derniers fournissent de nombreuses solutions susceptibles de satisfaire au mieux différents critères. Même s'ils ne permettent pas de

## CONCLUSION GENERALE

---

trouver à coup sûr « La Solution Optimale » de l'espace de recherche, l'application de l'application génétique a permis d'obtenir des résultats meilleurs pour un temps de calcul optimisé.

L'application de l'algorithme génétique pour la procédure de calage a été faite pour le cas d'un barrage en remblai, elle peut également être étendue à d'autres types de barrage mais également d'autres types de grands ouvrage du génie civil tels que les ponts.

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] E.-R. Michalski. Sécurité des petits barrages, analyse des risques potentiels, propositions de mesures techniques préventives.

[2] Anton J. Schleiss, Henri Pougatsch, Les barrages : du projet à la mise en service

[3] Alexandru Lucian LUCA, Olga-Adelina POP. EARTH DAM STABILITY - THE ANALYSIS OF FILTRATION PROCESS

[4] Ratiu M., Constantinescu C., 1989, Behaviour of Hydrotechnical constructions

[5] Barthélémy, F.; Martin, X.; Nicolazo, J.-L. (2004). "La réglementation en matière de sécurité des barrages et des digues." Conseil Général des Mines et Inspection Général de l'Environnement. Paris.

[6] Singh, V. P. (1996). Dam breach modeling technology, Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands.

[7] Durand, J.-M.; Royet, P.; Mériaux, P. (1999). "Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale". Editions Quae.

[8] Degoutte, G. (2002). "Petits barrages : recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi". Cemagref Editions.

[9] Chang, C. C., & Yang, H. T. Y. (2004). A correlation between pulse diagnosis of human body and health monitoring of structures. Earthquake Engineering and Engineering Vibration

[10] Aktan AE, Catbas FN, Grimmelsman KA and Tsikos CJ (2000), "Issues in Infrastructure Health Monitoring for Management,"

[11] RYTTER A., "Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures", PhD Thesis, Aalborg University, Denmark, 1993.

[12] J. E. Doherty. Nondestructive evaluation. In A. S. Kobayashi, editor, Hand- book on Experimental Mechanics, chapter 12. Society for Experimental Mechanics, 1987.

[13] Spilios D. Fassois and Fotis P. Kopsaftopoulos, Statistical Time Series Methods for Vibration Based Structural Health Monitoring. Stochastic Mechanical Systems & Automation (SMSA) Laboratory

[14] Chatzi, E., & Papadimitriou, C. (Eds.). (2016). *Identification Methods for Structural Health Monitoring*. CISM International Centre for Mechanical Sciences. doi:10.1007/978-3-319-32077-9

[15] Daniel Balageas, Claus-Peter Fritzen, Alfredo Güemes. Structural Health Monitoring.

[16] Chang, C. C., & Yang, H. T. Y. (2004). A correlation between pulse diagnosis of human body and health monitoring of structures. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 3(1), 117–125.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [17] Doebling SW, Farrar CR, Prime MB and Shevitz DW (1996), "Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review," Los Alamos National Laboratory Report, LA-13070- MS.
- [18] NATKE H.G., CEMPEL C., "Model-Aided Diagnosis of Mechanical Systems", Springer Verlag, Berlin, 1997.
- [19] Hudson, D .E. (1970a). « Dynamic tests of Full-Scale Structures, in Earthquake Engineering, (ed. by R. L. Wiegel) » Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, U. S. A
- [20] Ivanovic & al. « Ambient Vibration Tests of a Seven Story Reinforced Concrete Building in Van Nuys, California, Damaged by the 1994 Northridge Earthquake » , Soil Dynamics and Earthquakes Eng, Vol 19, No. 6, pp. 391-411
- [21] Lu, G., Chin H. and Xie, J. (1986). « Modal identification for Xiang Hong Dian Arch Dam », (in chinese), Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol. 6, No. 4, pp.71-85
- [22] Pintelon, R., & Schoukens, J. (2001). *System identification: A frequency domain approach*. New York: IEEE Press.
- [23] Maia, N. M. M., & Silva, J. M. M. (2001). Modal analysis identification techniques. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359, 29–40.
- [24] Juang, J. N., & Pappa, R. S. (1985). An eigensystem realization algorithm for model parameter identification and model reduction. *Journal of Guidance Control Dynamics*, 8(5), 620–627.
- [25] Addison PS (1992) The Illustrated Wavelet Transform Handbook, Institute of Physics Bochner S, Chandrasekharan K (1949) Fourier Transforms. Princeton University Press, New Jersey
- [26] Bracewell RN (2000) The Fourier Transform and Its Applications. McGraw-Hill, Boston Cattarius J, Inman DJ (1997) Time Domain Analysis for Damage Detection in Smart Structures. Mech Syst and Signal Process 11:409–423
- [27] Marwala T (2002) Finite Element Updating Using Wavelet Data and Genetic Algorithm. AIAA J of Aircr 39:709–711
- [28] Mottershead JE, Friswell MI (1995) Model Updating in Structural Dynamics: A Survey. J of Sound and Vib 167:347–375
- [29] Saeed Ziaei Rad. Methods for updating numerical models in structural dynamics.
- [30] Patterson DW. Artificial neural networks: theory and applications. Singapore: Prentice Hall; 1996.
- [31] Almeida LB. Section C.1.2—multilayer perceptron. Handbook of neural computation. Oxford. 1997. p. 34.
- [32] T. Marwala Finite-element-model Updating Using Computational Intelligence Techniques Applications to Structural Dynamics © Springer-Verlag London Limited 2010

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [33] Michel Chouteau Bernard Giroux "Géophysique appliquée II Méthodes sismiques" Notes de cours GLQ 3202
- [34] Bernard TARDIEU & al. Conception parasismique des barrages, parasismique design of dams. 1993
- [35] H. Z. D. A. O. O. Bernard TARDIEU, Méthode simplifiée de prédimensionnement des barrages poids en zone sismique, Saint Rémy lès Chevreuse (France), 1993
- [36] Solin P, Segeth K, Dolezel I (2004) Higher-Order Finite Element Methods. Boca Raton: Chapman & Hall / CRC Press
- [37] Smail KECHIDI, Nouredine BOURAHLA .Effective use of ambient vibration measurements for modal updating. 2014
- [38] Ji, X., Qian, J., & Xu, L. (2007). Experimental study of modal parameter identification in a simulated ambient-excited structure. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 1(3), 281–285.
- [39] Rainieri, C., & Fabbrocino, G. (2014). Output-only Modal Identification. *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures*, 103–210.
- [40] Mottershead JE, Friswell MI (1995) Model Updating in Structural Dynamics: A Survey. *J of Sound and Vib* 167:347–375
- [41] Fogel D.B., " Evolutionary Computation : A New Transactions ", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* , vol. 1, n°1, p. 1, avril 1997.
- [42] Darwin C., *The Origin of Species* , 1859.
- [43] Vincent MAGNIN. « Optimisation et algorithmes génétiques », 2006
- [44] Bäck T., Hammel U. et Schwefel H.P., " Evolutionary Computation : Comments on the History and Current State ", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* , vol. 1, n°1, p. 3-17, avril 1997.
- [45] Bäck T., *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice* . Oxford : Oxford University Press, 1996. BU : 006.3 BAC
- [46] ihsen saad, fatma tanGour, pierre Borne Application des algorithmes génétiques aux problèmes d'optimisation, 2009 **Article** in *Revue de l'Electricité et de l'Electronique* · April 2009

**ANNEXE**  
**Code Matlab de**  
**l'algorithme génétique**

### **1)La boucle :**

Il s'agit de l'algorithme principal faisant appel à des fonctions -décrites plus bas- et qui réalise chaque étape conformément à la procédure génétique décrite dans le chapitre 4.

```
%% start Sap2000 application

SapObject.ApplicationStart;

data='C:\Users\Labo\Desktop\LAST API\API';

B=['Argile' 'Enrochement' 'Filtre-sable-sec' 'Grès' 'Recharge-alluviale' 'Sol'];
ti='-';
gr=['min' 'gch' 'moy' 'drt' 'max'];
i=1;

a=1;
    % Number of modes
n_modes = 13;
% Number of steps
n_step = [];
% Time step
DT = [];
f_n = [];
fb=[1.8 2.7 4.475 ];
c=1;
n=20;
ti='-';
gr=['min' 'gch' 'moy' 'drt' 'max'];
ecumul(1,1)=0;
for i=1:n
    T= randi(5,6,1);
    j=1;

    while j<(i)
        if parents(j,1:6)==T
            T= randi(5,6,1);
            j=1;
        end
        j=j+1;
    end

    jA=T(1,1);
    jE=T(2,1);
    jF=T(3,1);
    jG=T(4,1);
    jR=T(5,1);
    jS=T(6,1);
    PropArea = NET.explicitCast(SapModel.PropArea,'SAP2000v20.cPropArea');
    ret = PropArea.SetPlane( 'Argile', 2 , ['Argile' ti gr(jA:jA+2)] , 0 , 1 , true);
    PropArea = NET.explicitCast(SapModel.PropArea,'SAP2000v20.cPropArea');
    ret = PropArea.SetPlane( 'Enrochement' , 2 , ['Enrochement' ti gr(jE:jE+2)] , 0 , 1 , true);
    PropArea = NET.explicitCast(SapModel.PropArea,'SAP2000v20.cPropArea');
    ret = PropArea.SetPlane( 'Filtre-sable-sec' , 2 , ['Filtre-sable-sec' ti gr(jF:jF+2)] , 0 , 1 , true);
    PropArea = NET.explicitCast(SapModel.PropArea,'SAP2000v20.cPropArea');
    ret = PropArea.SetPlane( 'Grès' , 2 , ['Grès' ti gr(jG:jG+2)] , 0 , 1 , true);
    PropArea = NET.explicitCast(SapModel.PropArea,'SAP2000v20.cPropArea');
    ret = PropArea a.SetPlane( 'Recharge-alluviale' , 2 , ['Recharge-alluviale' ti gr(jR:jR+2)] , 0 , 1 , true);
    PropArea = NET.explicitCast(SapModel.PropArea,'SAP2000v20.cPropArea');
```

```

ret = PropArea.SetPlane( 'Sol', 2 , ['Sol' ti gr(jS:jS+2)] , 0, 1 , true);

% Set number of modes
LoadCases = NET.explicitCast(SapModel.LoadCases,'SAP2000v20.cLoadCases');
ModalEigen = NET.explicitCast(LoadCases.ModalEigen,'SAP2000v20.cCaseModalEigen');
ModalEigen.SetNumberModes('MODAL',n_modes,1);
% Create model analysis
Analyze = NET.explicitCast(SapModel.Analyze,'SAP2000v20.cAnalyze');

% Run analysis
ret = Analyze.RunAnalysis();
AnalysisResults =ET.explicitCast(SapModel.Results,'SAP2000v20.cAnalysisResults');
AnalysisResultsSetup = ET.explicitCast(AnalysisResults.Setup,'SAP2000v20.cAnalysisResultsSetup');

% Select results cases
AnalysisResultsSetup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput;
AnalysisResultsSetup.SetCaseSelectedForOutput('MODAL');

% Create variables
[~,~,~,~,~,Frequency,~,~] =
AnalysisResults.ModalPeriod(NumberResults,LoadCase,StepType,StepNum,Period,Frequency,CircFreq,Eig
enValue);
fn=(Frequency.double);
% Create variable
% f_n(i).fn = fn;
% ret =File.Save('C:\API\DATA_BASE\a\a.sdb');
SapModel.SetModelIsLocked(false);
% xlswrite(fileExc,fn',1,'B1');

e=erreur(fn,fb) ;
parents(i,1:6)=T';
parents(i,7) =e;
Fn(i,1:n_modes)=fn';
Fn(i,(n_modes+1):(n_modes+7))=parents(i,1:7);
ecumul(1,1)=ecumul(1,1)+e;
end
parents=tri(parents);
Fn=tri(Fn);

for j=1:30
Trank=matrank(parents);
Trank=mutation(Trank);
[Tcl,Tll]=size(Trank);
[pcl,pll]=size(parents);
T(1:pcl,1:7)=parents(1:pcl,1:7);
T(pcl+1:(pcl+Tcl),1:6)=Trank(1:Tcl,1:6);
T(pcl+1:(pcl+Tcl),7)=0;
T=rept(T);
[cl,ll]=size(T);
i=1;
ecumul(j+1,1)=0;
while i<(cl+1)
if (T(i,7)==0)
jA=T(1,1);
jE=T(2,1);
jF=T(3,1);
jG=T(4,1);
jR=T(5,1);
jS=T(6,1);
PropArea = NET.explicitCast(SapModel.PropArea,'SAP2000v20.cPropArea');

```

```

ret = PropArea.SetPlane( 'Argile', 2, ['Argile' ti gr(jA:jA+2)], 0, 1, true);
PropArea = NET.explicitCast(SapModel.PropArea,'SAP2000v20.cPropArea');
ret = PropArea.SetPlane( 'Enrochement', 2, ['Enrochement' ti gr(jE:jE+2)], 0, 1, true);
PropArea = NET.explicitCast(SapModel.PropArea,'SAP2000v20.cPropArea');
ret = PropArea.SetPlane( 'Filtre-sable-sec', 2, ['Filtre-sable-sec' ti gr(jF:jF+2)], 0, 1, true);
PropArea = NET.explicitCast(SapModel.PropArea,'SAP2000v20.cPropArea');
ret = PropArea.SetPlane( 'Grès', 2, ['Grès' ti gr(jG:jG+2)], 0, 1, true);
PropArea = NET.explicitCast(SapModel.PropArea,'SAP2000v20.cPropArea');
ret = PropArea.SetPlane( 'Recharge-alluviale', 2, ['Recharge-alluviale' ti gr(jR:jR+2)], 0, 1, true);
PropArea = NET.explicitCast(SapModel.PropArea,'SAP2000v20.cPropArea');
ret = PropArea.SetPlane( 'Sol', 2, ['Sol' ti gr(jS:jS+2)], 0, 1, true);

% Set number of modes
LoadCasesNET.explicitCast(SapModel.LoadCases,'SAP2000v20.cLoadCases');
ModalEigen = NET.explicitCast(LoadCases.ModalEigen,'SAP2000v20.cCaseModalEigen');
ModalEigen.SetNumberModes('MODAL',n_modes,1);
% Create model analysis
Analyze = NET.explicitCast(SapModel.Analyze,'SAP2000v20.cAnalyze');

% Run analysis
ret = Analyze.RunAnalysis();
AnalysisResults = NET.explicitCast(SapModel.Results,'SAP2000v20.cAnalysisResults');
AnalysisResultsSetup =
NET.explicitCast(AnalysisResults.Setup,'SAP2000v20.cAnalysisResultsSetup');
% Select results cases
AnalysisResultsSetup.DeselectAllCasesAndCombosForOutput;
AnalysisResultsSetup.SetCaseSelectedForOutput('MODAL');
% Create variables
NumberResults = 0;
LoadCase = NET.createArray('System.String', 1);
StepType = NET.createArray('System.String', 1);
StepNum = NET.createArray('System.Double', 1);
Period = NET.createArray('System.Double', 1);
Frequency = NET.createArray('System.Double', 1);
CircFreq = NET.createArray('System.Double', 1);
EigenValue = NET.createArray('System.Double', 1);
% Get modal frequencies
[~,~,~,~,~,Frequency,~,~] =
AnalysisResults.ModalPeriod(NumberResults,LoadCase,StepType,StepNum,Period,Frequency,CircFreq,Eig
enValue);
fn=(Frequency.double)';
% Create variable
% f_n(i).fn = fn;
% ret =File.Save('C:\API\DATA_BASE\a\a.sdb');
SapModel.SetModelIsLocked(false);
% xlswrite(fileExc,fn',1,'B1');

e=erreur(fn,fb) ;
parents(i,7) =e;
parents(i,1:6)=T(i,1:6);
Fn(i,1:n_modes)=fn';
Fn(i,n_modes+1:n_modes+7)=parents(i,1:7);
i=i+1
ecumul(j+1,1)=ecumul(j+1,1)+e;
else
i=i+1
end
end
parents=tri(parents)
Fn=tri(Fn);

```

End

## **2)La fonction qui calcule l'erreur (fonction Objectif)**

```
function [l]=erreur(fn,fb)
l=0;
F=fn';
ha=[0.2 0.5 0.3];
mod=[2 6 13];
for i=1:3
    l=l+ha(1,i)*(abs(F(1,mod(i))-fb(1,i))/fb(1,i));
end
```

end

## **4)La fonction combinaison**

```
function [T]=rank(T1,T2)
T(1,1:3)=T1(1,1:3);
T(2,1:3)=T2(1,1:3);
T(1,4:6)=T2(1,4:6);
T(2,4:6)=T1(1,4:6);
end
```

## **3)La fonction mutation**

```
function [Trank]=mutation(Trank)
for i=1:2
k= randi(6,1,1);
s= randi(6,1,1);
j= randi(5,1,1);
Trank(k,s)=j;
end
end
```

## **4)La fonction Tri**

```
function [T1]=tri(T)
[cl,ll]=size (T);
T2=T;
k=1;
while k<(cl+1)
[C,l] = min(T2(1:cl,ll))
T1(k,1:ll)=T2(l,1:ll);
T2(l,7)=1000;
k=k+1;
end
end
```