

RAPPORT DE STAGE 2A EN LABORATOIRE

Année universitaire 2023-2024

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA)

Modélisation et visualisation d'un barrage hydrolique sous séisme

Vitaly Lysen

Tuteurs :

M. Régis Cotterau
M. Lucio De Abreau Correa

Tuteur école :

M. Thierry Désoyer

Remerciements

Je souhaiterais remercier les membres du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique pour leur accueil au sein de l'équipe et en particulier M. Régis Cotterau et M. Lucio De Abreau Correa pour m'avoir guidé lors de ce stage, répondu à mes interrogations et appris beaucoup de choses au sujet de leur travail au quotidien.

Je souhaiterais également remercier M. Thierry Désoyer, chargé du stage du côté de l'école et également chercheur au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique.

Enfin, je voudrais remercier la Direction de la Recherche de l'école Centrale Méditerranée pour l'aide qu'elle a pu me fournir en m'accordant la bourse au mérite et m'ayant permis de remplir mes missions dans de bonnes conditions.

Merci également à toutes les personnes qu'il me serait difficile de citer qui ont rendu ce stage possible et intéressant.

Table des matières

1 À propos du laboratoire	3
2 Présentation du sujet	3
2.1 Introduction	3
3 Travail effectué	4
3.1 Modélisation d'un barrage	4
3.1.1 Prise en main des outils	4
3.1.2 Visualisation des résultats	7
3.2 Choix d'un barrage	8
3.2.1 Barrage de Tsankov Kamak, Bulgarie	8
3.2.2 Géométrie du barrage	9
3.2.3 Topographie	9
3.3 Simulation	9
3.3.1 Méthode des éléments spectraux	10
3.3.2 Calcul parallèle	11
4 Résultats	12
4.1 Premières simulations	12
4.2 Ajout de Perfect Match Layers (PML)	14
4.3 Extension du domaine d'étude	15
4.4 Utilisation de la géométrie réelle du barrage	15
4.5 Simulation d'un séisme réel	17
4.6 Prise en compte de la topographie	20
4.7 Réalisation d'une vidéo	23
5 Perspectives	23
5.1 Utilisation de la paramétrisation	23
5.2 Paralléliser la création de maillage	24
5.3 Correction du maillage avec l'élévation	24
5.4 Modèle plus complexe	24
5.5 Étude d'autres barrages	24
6 Conclusion	25

1 À propos du laboratoire

Le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, souvent abrégé en LMA, est une unité mixte de recherche établie à Marseille. Ce laboratoire, qui joue un rôle clé dans la recherche scientifique en France, est sous la tutelle d'Aix-Marseille Université, du CNRS, et de l'école d'ingénieurs Centrale Méditerranée. En tant qu'institution académique de premier plan, il bénéficie également du soutien de la Fédération Fabri de Peiresc, un réseau collaboratif dédié à l'innovation scientifique.

Le LMA est un centre de recherche multidisciplinaire, spécialisé principalement dans les domaines de la mécanique du solide et de l'acoustique. Sa structure interne est organisée en trois équipes de recherche distinctes mais complémentaires. La première équipe, "matériaux et structures", se concentre sur l'étude des matériaux et des structures complexes. La seconde, "ondes et imagerie", se spécialise dans l'analyse des ondes et les techniques d'imagerie avancées. Enfin, la troisième équipe, "sons", explore les aspects liés aux phénomènes acoustiques et à leur application dans divers contextes.

Avec une équipe de près de 150 personnes, le LMA regroupe une variété de professionnels, allant des chercheurs et enseignants-chercheurs aux ingénieurs, doctorants et personnel administratif. Cette diversité de compétences permet au laboratoire de mener des projets de recherche ambitieux et innovants, tout en offrant une formation de qualité à ses étudiants et jeunes chercheurs.

Le laboratoire est basé sur le campus de Château-Gombert à Marseille, un site moderne qui favorise les collaborations interdisciplinaires. Il dispose également d'une antenne à Aix-en-Provence, ce qui lui permet d'étendre son réseau de recherche et de renforcer ses collaborations avec d'autres institutions académiques et industrielles de la région.

Le LMA joue un rôle crucial dans le développement de nouvelles connaissances et technologies dans ses domaines d'expertise. Par son organisation et ses équipes de recherche spécialisées, il contribue activement à l'avancement scientifique et technique, tout en maintenant un lien fort avec le tissu universitaire et industriel local et international avec des partenaires comme Yamaha.

2 Présentation du sujet

2.1 Introduction

Imaginez, vous êtes chef d'exploitation sur le site d'un barrage hydraulique. Lors d'un contrôle de routine, on vous fait remarquer des fissures dans la structure du barrage que vous maintenez. En tant qu'ingénieur, quelle serait la meilleure solution pour prévenir un effondrement potentiel du barrage dans les années à venir ?

La solution la plus logique au premier abord consisterait à réduire la charge du barrage, à savoir l'eau contenue dans le réservoir pour éviter aux ruptures de se propager sous les très fortes contraintes que peut exercer le fluide sur le mur en béton. C'est ce qu'a pu faire une société qui exploitait le barrage du Vajont en Italie du Nord durant les années 1960. Confrontés au problème de fissuration de leur barrage, le gouvernement et la société d'exploitation ont décidé de drastiquement diminuer le niveau de l'eau contenue dans le barrage. Ce qui a suivi est l'un des plus grands accidents d'exploitation de l'histoire, engendrant près de 2000 morts

dans la vallée en aval du barrage. La nappe phréatique dans le sol entourant le réservoir créait un équilibre instable qui permettait à la roche de rester figée. Baisser le niveau de l'eau du barrage a entraîné un dessèchement qui a rompu cet équilibre et provoqué un glissement de terrain dévastateur. L'effondrement du réservoir a provoqué une vague de plus de 100 m qui s'est déversée dans la vallée, emportant avec elle maisons et habitants. Il s'agit à ce jour de l'un des accidents de barrages les plus meurtriers en Europe. [1]

De ce fait, l'étude des barrages et de leur environnement est un enjeu majeur dans un monde où l'énergie hydraulique qu'ils produisent pourrait être une réponse efficace à la décarbonation de l'électricité mondiale. [2]

3 Travail effectué

Durant les deux mois de stage, j'ai eu l'occasion de prendre en mains différents outils que je n'avais jamais eu l'occasion d'essayer. J'ai aussi pu réaliser des premiers modèles de barrages et lancer des simulations sur des super-calculateurs. Ce stage a été une excellente occasion de me remettre en tête les différents cours de mécanique et de physique que j'ai pu suivre à l'école Centrale.

3.1 Modélisation d'un barrage

Comme pour toute méthode reposant sur l'intégration et la propagation de propriétés physiques dans le temps et l'espace, il faut créer un objet qui pourrait être interprété comme un maillage afin de discrétiser les propriétés et ne pas se retrouver à réaliser une infinité de calculs.

L'outil utilisé est SEM3D¹ (Spectral Elements Method 3D) qui permet à partir d'un maillage particulier de simuler la propagation d'une onde dans le temps et l'espace. Il a été développé par l'Institut de Physique du Globe de Paris, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, CentraleSupélec (FKA École Centrale Paris) et le Centre national de la recherche scientifique en tant qu'alternative à des logiciels comme Abaqus ou autres solveurs.

La géométrie du barrage et les contraintes de la méthode de simulation rendent le travail complexe. Lorsqu'on modélise un objet 3D de façon informatique on a recours à des triangles pour lesquels les cartes graphiques sont largement optimisées. Néanmoins, ici, nous avons besoin d'éléments hexaèdriques, menant à des problèmes de taille d'éléments trop petite pour assurer la précision pour des formes complexes ou des difficultés de modélisation 3D.

3.1.1 Prise en main des outils

Le différent travail qui a pu être réalisé pendant le stage tournait autour de **quatre** logiciels.

GMSH Un outil open source (et Made in France) permettant entre autre la création de maillages à partir de code. L'outil est extrêmement complet mais je me suis principalement concentré sur l'aspect création de maillages conformes. Il est possible de coder le maillage dans un langage propre au logiciel (.geo) mais une bibliothèque Python est aussi disponible, simplifiant grandement le développement car elle s'intègre particulièrement bien aux outils et IDE dont je disposais déjà.

1. <https://github.com/sem3d/SEM>

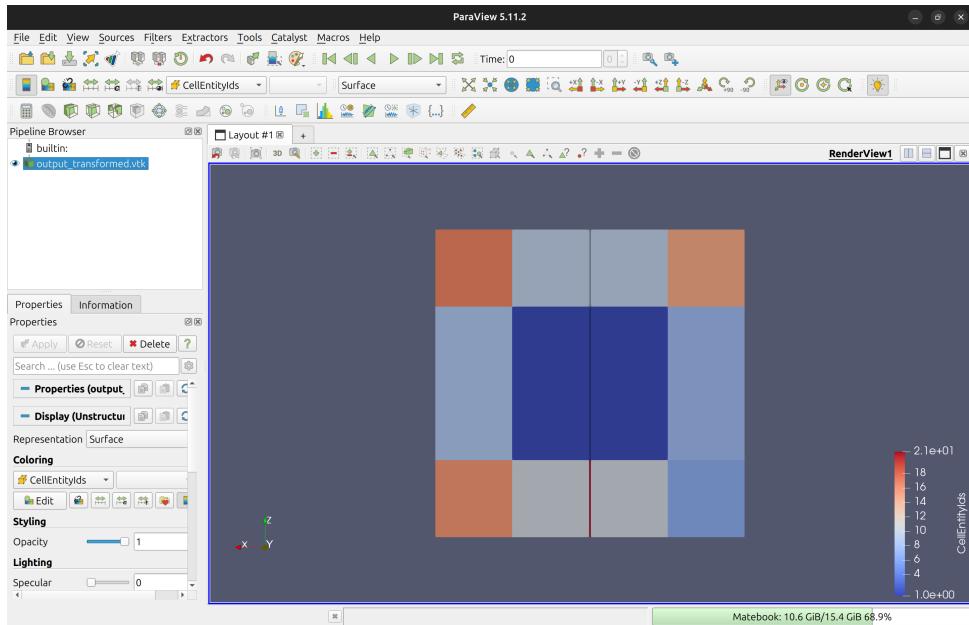


FIGURE 1 – Interface de ParaView

ParaView Un logiciel open source permettant de visualiser et traiter les résultats des calculs. Il est possible d'appliquer des formules aux résultats spatiaux, créer des animations et rendre les résultats de simulations plus intuitifs.

MatLAB MatLab est un logiciel puissant pour le traitement de données. Il permet notamment l'accès aux données des **capteurs**, qui ont pu être placés programmatiquement à divers endroits du barrage afin de suivre plus précisément les valeurs.

Terminal Le terminal permet l'accès à l'environnement de travail sur le super-calculateur. Une connaissance de Linux était nécessaire pour pouvoir naviguer et utiliser le serveur librement. L'utilisation des outils comme `sbatch` ou `sem` m'a été montrée par mon tuteur afin de me permettre une plus grande autonomie.

Afin de commencer les calculs, il était dans un premier temps nécessaire de créer une première géométrie sur laquelle effectuer les tests.

C'était donc ma première occasion de prendre en main GMSH et sa librairie Python. Par exemple, pour ce premier barrage, il suffit de 80 lignes de code.²

Néanmoins, j'ai rapidement été confronté aux limites d'une modélisation aussi simpliste. Le premier modèle de barrage³ est uniquement un ensemble de points et de lignes et ne permet pas encore d'être "meshé" ou maillé. Il ne peut donc pas encore être utilisé pour effectuer des calculs.

Il a donc fallu revoir le modèle afin de le rendre compatible avec le principe d'élément **transfinis**³.

Le modèle⁴ est cette fois-ci maillé. Néanmoins, il ne respecte pas la condition de conformité nécessaire à la simulation. Ainsi, il n'est pas non plus utilisable pour les calculs.

2. Tout le code qui a pu servir pendant le stage est disponible sur mon [GitHub](#).

3. Un élément transfini est un moyen pour GMSH de créer une répartition régulière (ou géométrique) de points afin de par la suite générer un maillage à partir de ces points.

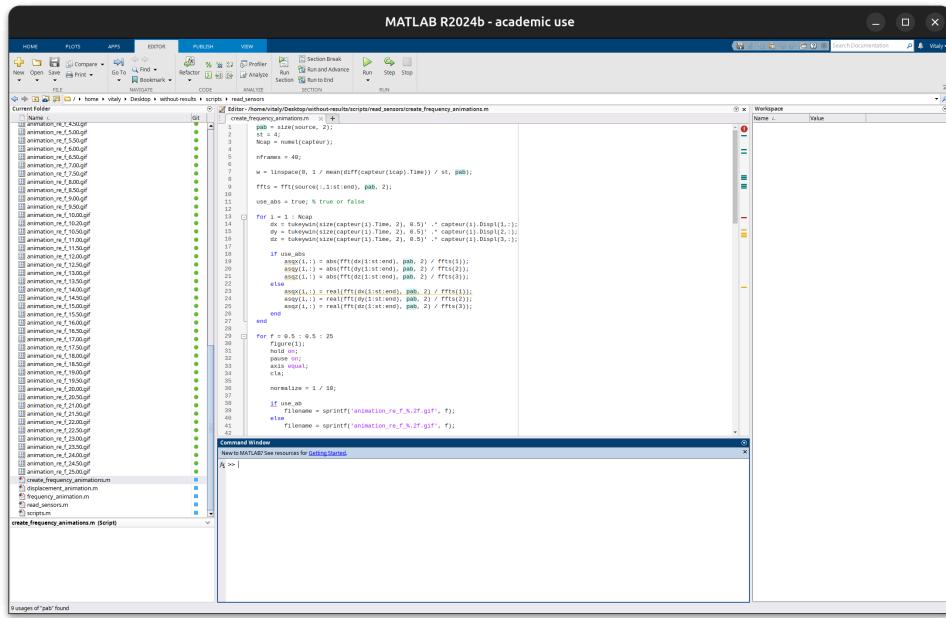


FIGURE 2 – Interface de MATLAB

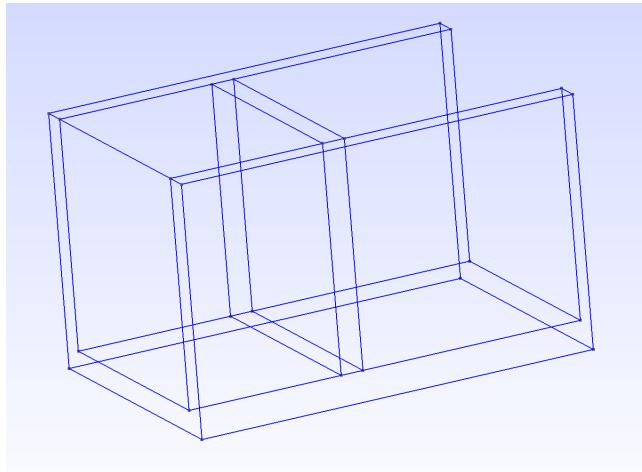


FIGURE 3 – Premier modèle de barrage

Ayant compris que je devrais créer beaucoup de points, de surfaces et de volumes j'ai, en parallèle de la création des différents modèles de barrages, profité de l'utilisation de Python pour me créer mon propre ensemble d'outils que j'ai fini par utiliser durant toute la suite du stage.

Ces outils m'ont donc rapidement permis de créer mon premier modèle de barrage conforme.

Ce premier barrage 5 a donc pu servir à une première exécution de SEM sur le calculateur parallèle. Les premiers résultats seront abordés dans la partie 3.1.2.

Les premiers jours du stage étaient donc une itération sur des modèles simples de barrage afin d'arriver à faire tourner un premier calcul sur le calculateur. J'ai aussi pu commencer à prendre en main les fonctionnalités les plus basiques du logiciel de simulation et des commandes

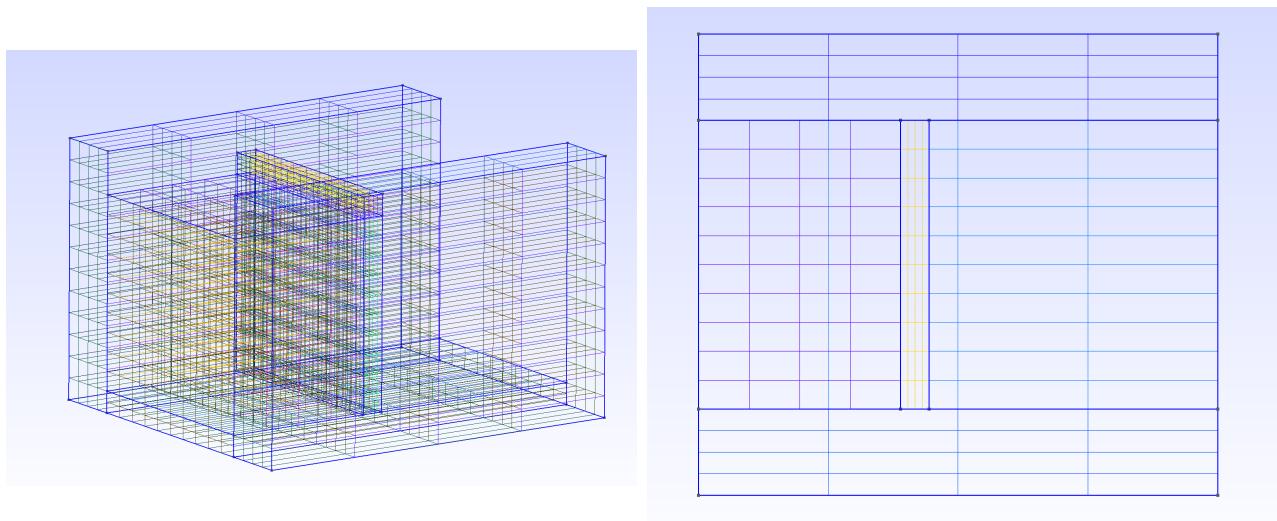


FIGURE 4 – Second modèle de barrage, maillé

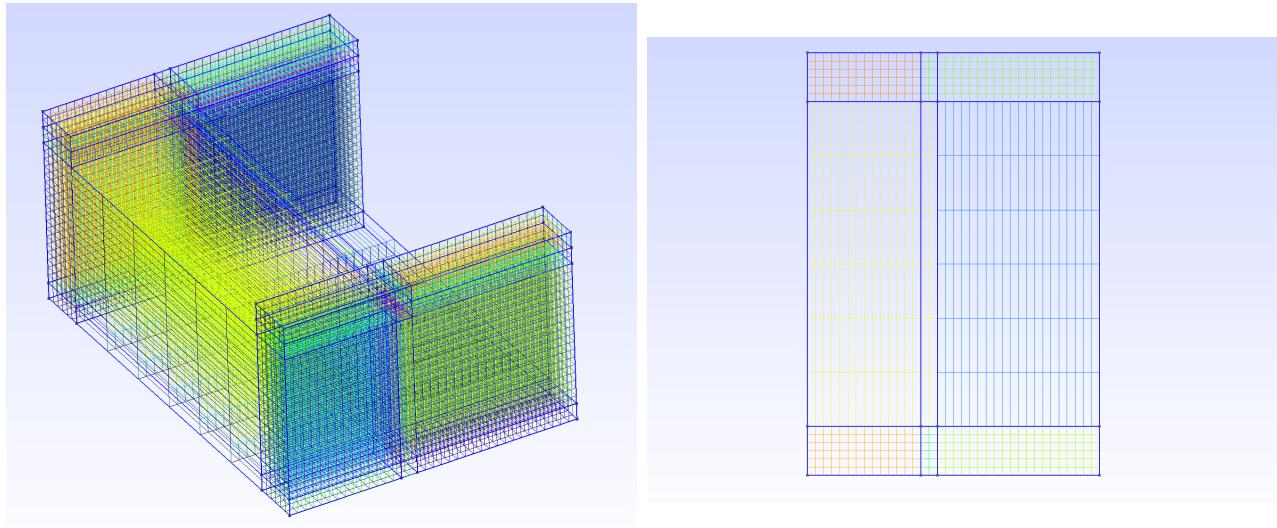


FIGURE 5 – Troisième modèle de barrage, maillé et conforme

associées.

3.1.2 Visualisation des résultats

Afin de voir les résultats des simulations, il a fallu prendre en main ParaView et MatLAB, deux outils de traitement de données très puissants.

En l'occurrence ParaView permet de visualiser les données 3D ainsi que les résultats des calculs sur la structure ainsi que produire des vidéos de ces résultats si ces derniers sont temporels⁴.

MatLAB quant à lui permet de traiter les données des *capteurs*, qu'il est possible d'ajouter à notre modèle sous forme de "noeuds d'intérêt" auquel le programme va enregistrer les différentes

4. Ce qui est notre cas ici

données de façon un peu plus détaillées. Il est par la suite possible de les traiter, avec par exemple des analyses spectrales.

3.2 Choix d'un barrage

Afin de rendre l'étude plus intéressante, mon tuteur de stage m'a conseillé de m'orienter vers un barrage existant dont on pouvait récupérer la géométrie réelle afin de comparer les différents résultats que l'on pourrait obtenir.

3.2.1 Barrage de Tsankov Kamak, Bulgarie

Du 9 au 12 avril 2025, la Commission Internationale des Grands Barrages (ICOLD) organisera son 17e Benchmark à Sofia en Bulgarie⁵. Il s'agit d'un congrès regroupant scientifiques et experts du domaine des infrastructures hydrauliques. Le sujet de cette année se concentre sur l'étude numérique des structures de la plus haute importance que soit le barrage et notamment leur réponse aux effets de séismes.

Cette année, quatre thèmes dont un thème libre ont été proposés par différentes entités gouvernementales ou privées. Ce stage a eu pour but de se concentrer sur l'étude d'un de ces thèmes, à savoir la modélisation numérique du barrage de Tsankov Kamak, situé au sud de la Bulgarie sur la rivière Devin. Sa construction a débuté en 2004 et s'est terminé en 2011 nécessitant un budget de près d'un demi milliard d'euros.

Ce barrage est intéressant car il se trouve sur une cascade de barrages couvrant tout le canal du Devin et produisant un total de 500MW de puissance électrique pour l'état bulgare. Le barrage étudié produit quant à lui près 200 GWh d'énergie annuellement.



FIGURE 6 – Plan du barrage (Source : BUNCOLD)

5. <https://www.buncold.bg/en/news1.html>

3.2.2 Géométrie du barrage

Le barrage de Tsankov Kamak est un barrage-voûte à double courbure, c'est à dire arqué selon le plan horizontal et le plan vertical. Le barrage de rétention a une hauteur de 130 m et une longueur de près 400 m. Il permet, grâce à la topographie du terrain et la taille imposante du mur de rétention de contenir plus de 111 000 000 m³ d'eau. [3]

La géométrie du barrage a été fournie par le comité d'organisation au travers d'un fichier Mesh (maillage)⁶. Un fichier de ce type comporte la position de tous les points d'un modèle, ainsi que les liens entre différents éléments, formant dans notre cas des hexaèdres. La contrainte hexaèdrique sera discutée dans la partie 3.3.1.

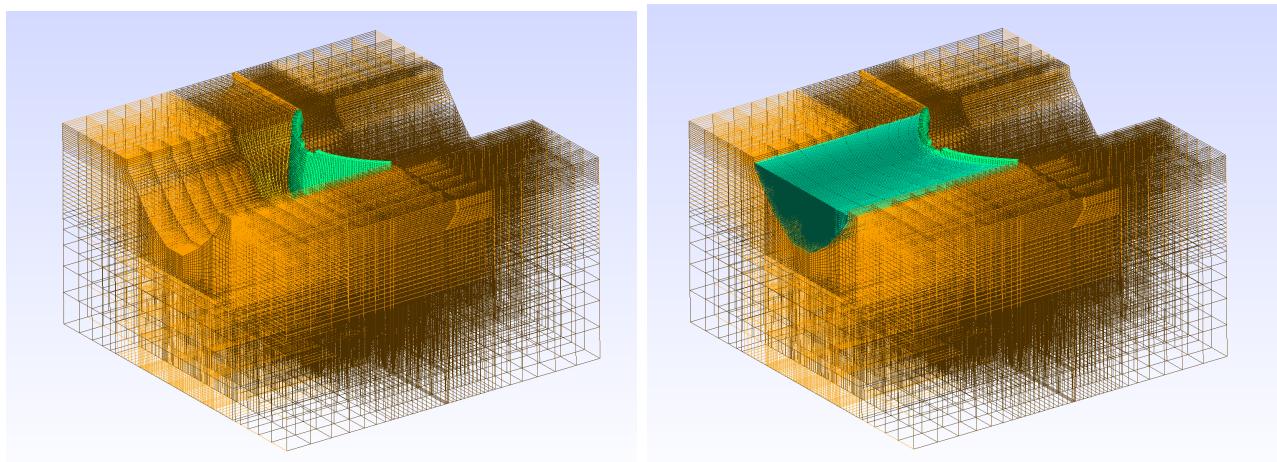


FIGURE 7 – Fichiers de maillage fournis par le comité

3.2.3 Topographie

Actuellement, les études menées sur les barrages sont extrêmement simplistes. Outre la géométrie grossière du barrage et parfois une partie du réservoir d'eau, quasiment aucun aspect n'est simulé. Par exemple, la topographie du terrain avoisinant ou le couplage avec le sol sont ignorés afin de grandement simplifier les calculs.

Il s'agit de pratiques standard. Pour preuve, le modèle fourni par le comité d'organisation pour le barrage n'est constitué que d'un modèle simple du barrage ainsi qu'une petite partie du réservoir d'eau.

Les figures 8 et 9 permettent d'observer la topographie complexe du terrain avoisinant et la première approximation (très grossière) qui a pu être faite pour la simulation avec la topographie.

3.3 Simulation

La simulation du barrage est réalisée par le logiciel SEM3D sur les ordinateurs de l'AMU. Ce logiciel repose sur l'utilisation des méthodes spectrales abordées dans le paragraphe suivant.

6. D'autres formats sont aussi disponibles mais le format mesh est le plus facile à exploiter

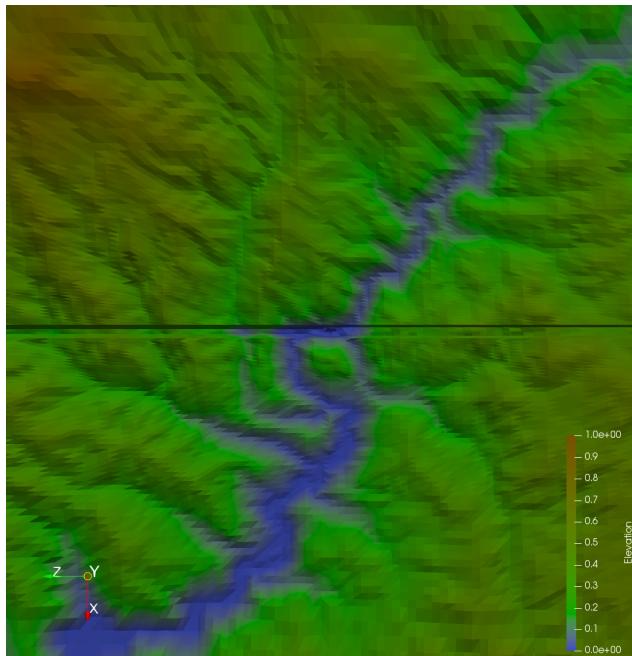


FIGURE 8 – Carte d’élévation du terrain autour du barrage (normalisé)



FIGURE 9 – Vue 3D de la zone avoisinant le barrage (Google Maps)

3.3.1 Méthode des éléments spectraux

La méthode des éléments spectraux (SEM, ou Spectral Element Method) est une technique numérique avancée utilisée pour résoudre des équations différentielles partielles (EDP) dans divers domaines de la physique et de l’ingénierie. Elle combine les avantages de la méthode des éléments finis (FEM) et des méthodes spectrales, offrant une grande précision tout en permettant une certaine flexibilité dans la modélisation de géométries complexes. Contrairement à la FEM, qui utilise des fonctions d’interpolation de faible degré dans chaque élément, la SEM utilise des polynômes de haut degré, jusqu’à 7 dans notre cas, pour approcher les solutions. Cette approche permet d’obtenir une meilleure précision avec moins de points de discréttisation, tout en conservant la possibilité de modéliser des formes complexes comme avec la FEM. La précision des modélisations reste néanmoins limitée par les propriétés intrinsèques de la SEM.

Une des principales caractéristiques de la SEM est sa capacité à atteindre une convergence exponentielle, ce qui signifie que l’erreur diminue très rapidement avec l’augmentation du nombre de points de discréttisation. Cela contraste avec les méthodes traditionnelles, qui ne connaissent qu’une convergence algébrique (c’est-à-dire que l’erreur diminue de manière polynomiale). La méthode des éléments spectraux est particulièrement utile dans les situations où des solutions très précises sont nécessaires, par exemple dans les simulations d’ondes, la mécanique des fluides, ou les problèmes de dynamique des structures. En raison de cette précision, elle est largement utilisée dans les domaines comme la sismologie, l’aérodynamique ou encore l’électrodynamique.

En termes de mise en œuvre, la SEM s’appuie généralement sur des maillages structurés où chaque élément est associé à un système de coordonnées locales, facilitant ainsi l’application de polynômes de Chebyshev ou de Legendre comme fonctions de base. En dépit de ses avantages, la SEM peut présenter certaines limitations, notamment en termes de coût computationnel,

surtout lorsque les maillages deviennent très fins ou que la géométrie à modéliser est très complexe. Cependant, grâce aux avancées technologiques et à l'optimisation des algorithmes, cette méthode continue de se développer et de s'imposer comme une référence pour la résolution de problèmes scientifiques de haute précision.

La majorité des calculs sont en fait des résolutions de systèmes sous forme matricielle. Une résolution d'un système sous forme de matrice $N \times N$ possède une complexité algorithmique en $O(N^3)$, une résolution classique prendrait donc beaucoup trop de temps, surtout lorsque les éléments sont comptés par millions. L'utilisation des méthodes spectrales permet en outre de se réduire à la seule diagonale de la matrice, permettant de réaliser des calculs bien plus efficacement tout en minimisant l'erreur de façon exponentielle et non quadratique.

L'implémentation d'une telle méthode va bien au delà de mes compétences, j'ai donc eu recours au logiciel SEM3D sur lequel ont pu travailler mes tuteurs et par conséquent me guider dans les tâches que j'ai eu à accomplir.

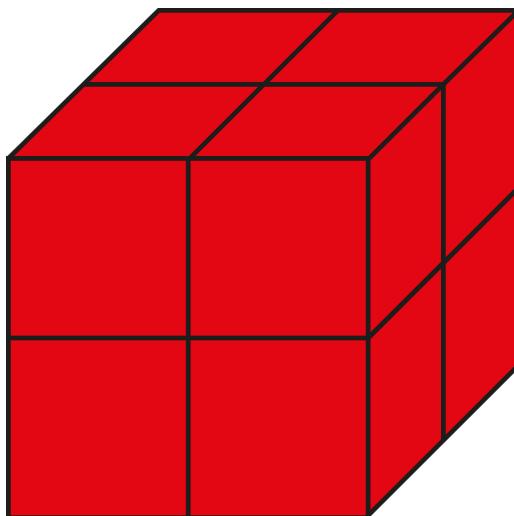


FIGURE 10 – Élément hexaèdrique

3.3.2 Calcul parallèle

Le calcul parallèle est une branche de l'informatique utilisée pour la résolution de problèmes de nature calculatoire, notamment la simulation de milieux nécessitant une grande quantité de calculs pouvant être découplés les uns des autres.

Pour simplifier, un calculateur parallèle est un ordinateur contenant un grand nombre d'unités de calcul (UC) qui sont souvent des processeurs ou des cartes graphiques. Il est possible de lancer une tâche en parallèle sur les différents UC en la séparant en amont en plusieurs parties (souvent le nombre de processeurs, ou coeurs de processeurs sur lesquels on souhaite réaliser les calculs).

En l'occurrence, les maillages de barrages qui ont pu être créés comptaient près d'un million d'éléments. L'ordre de grandeur donné est aux alentours de 30 000 éléments par UC, ce qui revient donc à des calculs sur 32 coeurs soit une machine entière du super-calculateur Copernicus de l'Aix-Marseille Université.⁷

7. Le super-calculateur compte plusieurs dizaines de machines similaires, utilisées en parallèle par d'autres

Au final, c'est plus de 50000 heures de calcul qui ont pu être réalisées au terme de ces 2 mois de stage. Il ne serait évidemment pas possible de les réaliser sur un ordinateur classique où l'exécution prendrait plus de 5 ans.

Les calculs génèrent aussi beaucoup de données, surtout sur les plus grands modèles qui ont pu être testés. Ainsi au terme du stage, les fichiers de résultats par la suite nécessaires à la réalisation de visuels comptaient pour près de 1 To de données, soit l'équivalent d'un disque dur moderne complètement rempli de valeurs de quantités physiques en chaque point du barrage.

Au vu de la quantité des données, il est impossible de les traiter de façon locale sur mon ordinateur, il a donc fallu utiliser le serveur de visualisation de l'AMU qui s'est avéré pas assez puissant pour générer des vidéos en prenant compte de toutes les données. Les vidéos qui ont pu être réalisées l'ont donc été sur des modèles très réduits, avec très peu d'éléments pour pouvoir faire le rendu sur ma machine personnelle.⁸

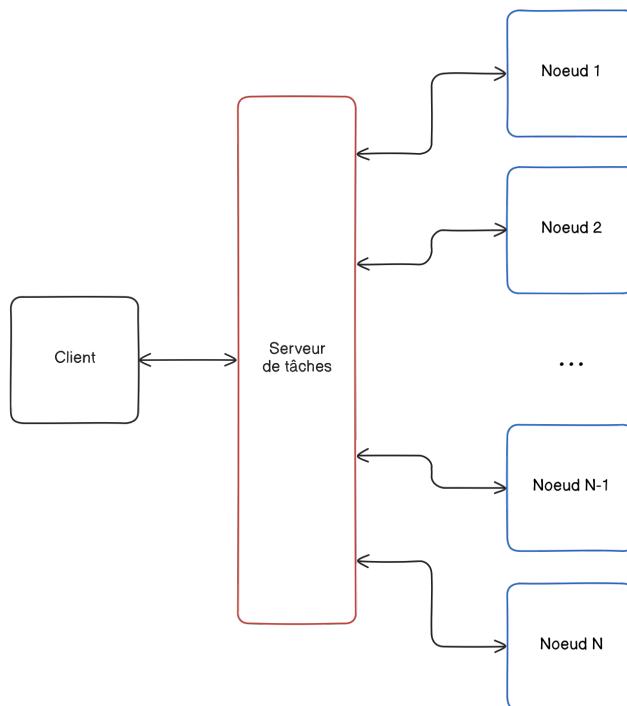


FIGURE 11 – Diagramme calcul parallèle

4 Résultats

4.1 Premières simulations

Afin de réaliser une étude précise du barrage, il faut connaître les propriétés physiques à simuler. Ces dernières seront utilisées pour toute la suite de l'étude.

chercheurs pour leurs problèmes et études.

8. Il a été question d'avoir recours à des machines plus puissantes mais malheureusement par manque de temps, cette idée n'a pas abouti.

Le sujet donne les propriétés physiques du béton utilisé dans le barrage. On a un module de relaxation $E_d = 34 \times 10^9$ Pa, un coefficient de Poisson $\nu = 0.2$ et une densité $\rho = 2370$ kg m⁻³.

À partir de là, il est possible de calculer les vitesses v_p et v_s des ondes se propageant dans les différents matériaux constituant le barrage.

$$v_p = \sqrt{\frac{E_d(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (1)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1 + \nu)}} \quad (2)$$

Afin de simplifier l'étude pour le matériau du sol, j'ai pris une valeur moyenne des propriétés physiques de la croûte terrestre en Europe du Sud-Est.

Enfin, pour l'eau, les valeurs sont celles à pression et température standard. Les fluides n'ont pas de vitesse de cisaillement, ou v_s .

On obtient finalement le tableau suivant qui résume les propriétés utiles à la simulation :

Matériau	v_p (m s ⁻¹)	v_s (m s ⁻¹)	ρ (kg m ⁻³)
Béton	3992	2444	2370
Sol	6000	3400	2650
Eau	1400	0	1000

TABLE 1 – Propriétés physiques des matériaux

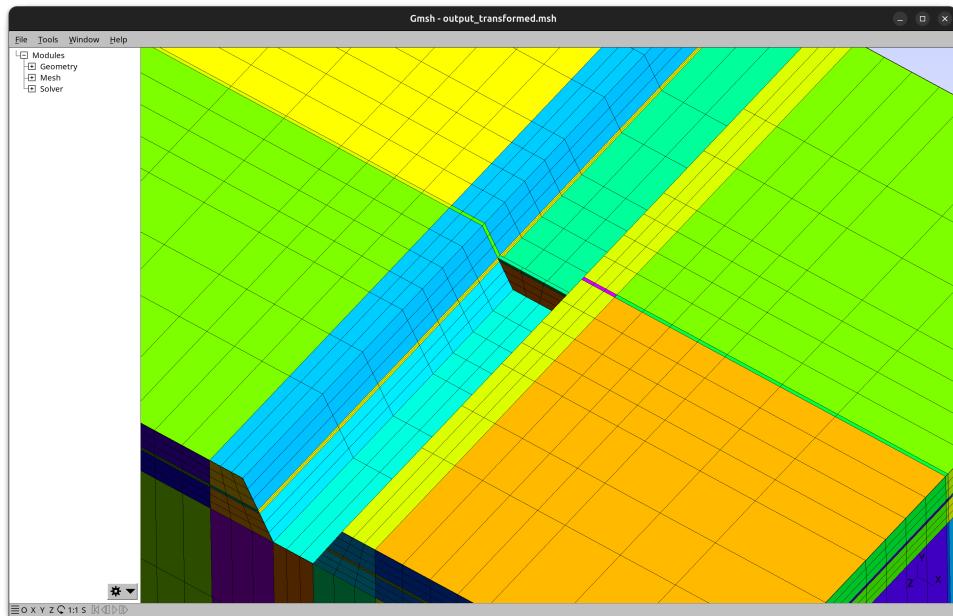


FIGURE 12 – Maillage de barrage simple après plusieurs itérations

La géométrie du problème étant dans un premier temps très simple, ce genre de modèle peut tourner sur mon ordinateur et ne requiert pas de supercalculateur. La version réduite, de faible précision est très pratique pour faire des tests.

4.2 Ajout de Perfect Match Layers (PML)

Par défaut, les ondes vont se réfléchir sur les différentes surfaces du modèle et ainsi fausser les résultats. On se retrouverait avec des ondes parasites qui viennent perturber le barrage après le passage des ondes P et S initiales.

Afin de palier à ce problème, SEM3D fait usage de Perfect Match Layers ou PML. Il s'agit de couches absorbantes qui vont atténuer exponentiellement les ondes arrivant sur ces dernières et ainsi, si elles sont bien dimensionnées, éviter complètement les effets de réflexion.⁹

Contraintes des PML

Bien que les Perfect Match Layers soient très utiles et puissantes pour permettre la simulation, elles apportent avec elles un lot de contraintes.

Taille d'élément Si l'élément PML est trop fin dans la direction de propagation, l'absorption sera incomplète et on assistera à des réflexions.

Orientation des éléments Lorsqu'on déforme le maillage pour lui appliquer la topographie du terrain, il était nécessaire de trouver un moyen de garder les PML horizontales. L'algorithme qui permet leur fonctionnement décompose les ondes incidentes sur les axes X, Y et Z. La moindre face qui ne serait pas orientée perpendiculairement à ces axes provoquerait des réflexions qui finiraient par faire exploser la simulation.

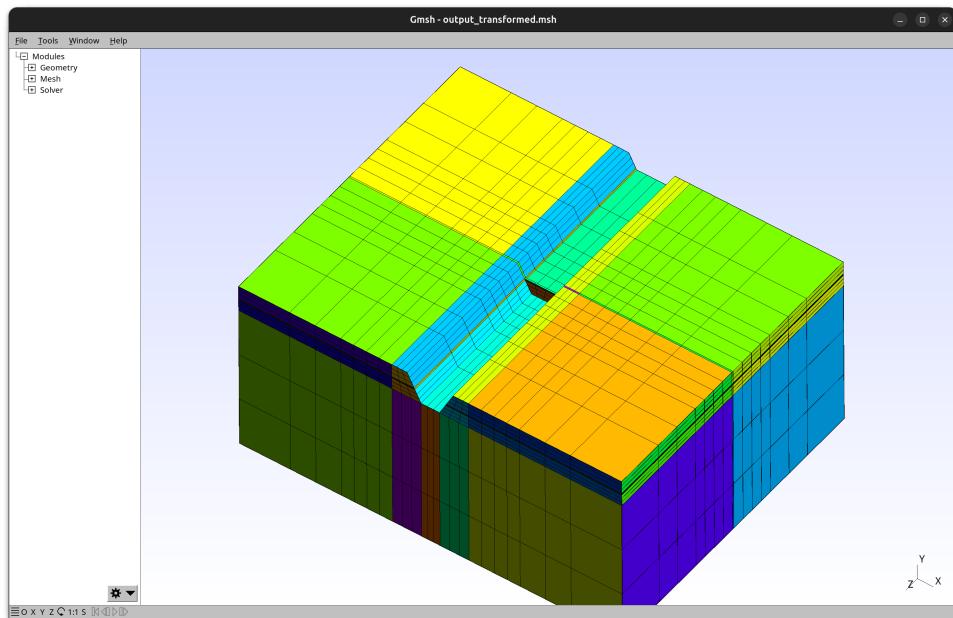


FIGURE 13 – Barrage simple sans PML

Les deux figures 13 et 14 sont très similaires ne se différenciant que par la présence d'une extrusion (qui a été plus complexe à réaliser que ce qui était initialement prévu) d'une couche d'un élément d'épaisseur. C'est cette couche qui se chargera d'absorber les ondes incidentes

9. Les PML sont néanmoins très instables et sont soumises à énormément de contraintes qui m'ont notamment posé problème au moment d'ajouter la topographie du terrain au modèle

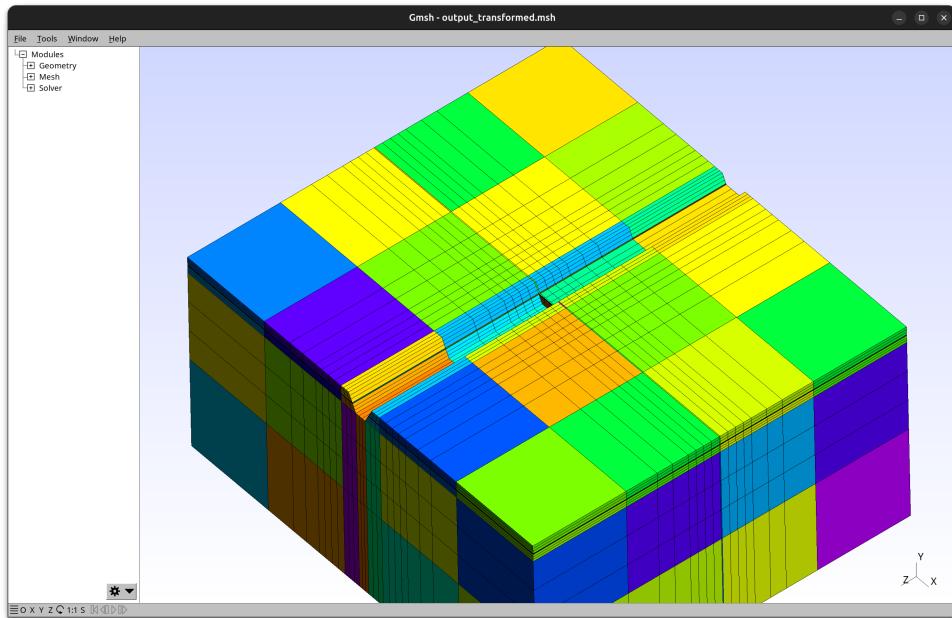


FIGURE 14 – Barrage simple avec PML

pour éviter les réflexions. Son matériau a été défini dans les paramètres de simulation pour se conformer aux propriétés physiques de ses éléments avoisinants.

Il existe deux types de PML, une pour les fluides et une pour les solides. Qui permettent donc de les utiliser dans notre modèle de barrage avec réservoir.

Dans un premier temps, je ne tenais pas compte des calculs que nous avons pu faire précédemment afin de pouvoir développer un outil me permettant de faciliter la création de barrages à l'avenir. Au final, l'intégralité des dimensions de mon barrage est paramétrique.

4.3 Extension du domaine d'étude

Afin de mieux simuler l'impact du séisme sur le barrage, notamment pour tenir compte de l'effet de propagation et d'atténuation de l'énergie sismique, il a été décidé d'éteindre le domaine d'étude à une zone de 25×25 km.

Comme le code de génération reposait sur un ensemble de variables, dont une correspondant à différentes tailles dans les directions X, Y, Z du domaine, ce changement a été très rapide à mettre en place. Il a par ailleurs permis de réduire la précision du maillage à une certaine distance du barrage accélérant les calculs.

Cette augmentation a aussi été nécessaire pour se conformer aux tailles minimales des éléments que nous avons calculé dans le tableau 1.

4.4 Utilisation de la géométrie réelle du barrage

Les données fournies par le BUNCOLD ne permettent pas d'incorporer le barrage au modèle directement. Dans un premier temps, je pensais réaliser un nouveau modèle de barrage double voute, mais après plusieurs essais la tâche s'est avérée bien trop complexe. En se souvenant que la création de ce barrage impliquait d'écrire des lignes de code pour chaque élément, il semblait

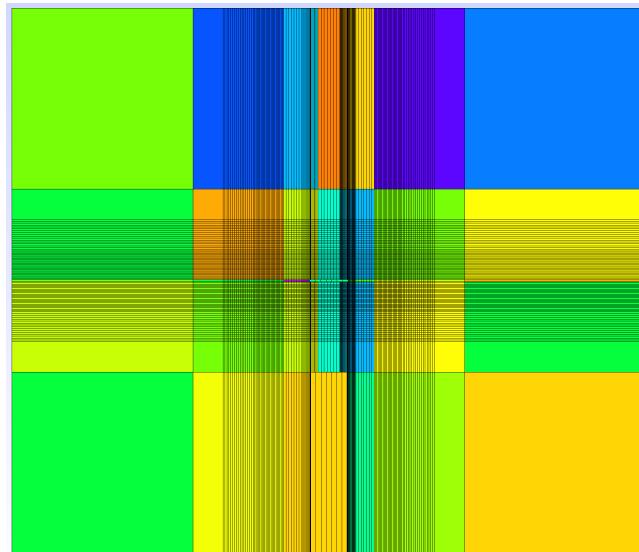


FIGURE 15 – Maillage de barrage droit avec un petit domaine simulé (environ 1km × 1km)

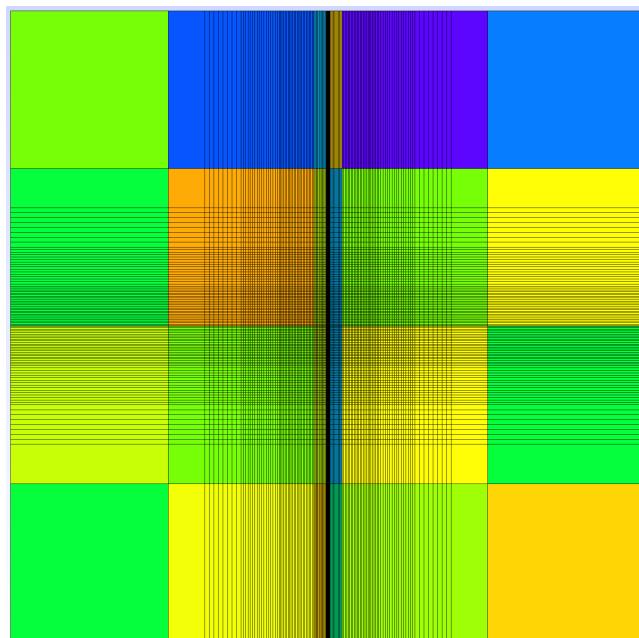


FIGURE 16 – Maillage de barrage droit avec un grand domaine simulé (environ 25km × 25km)

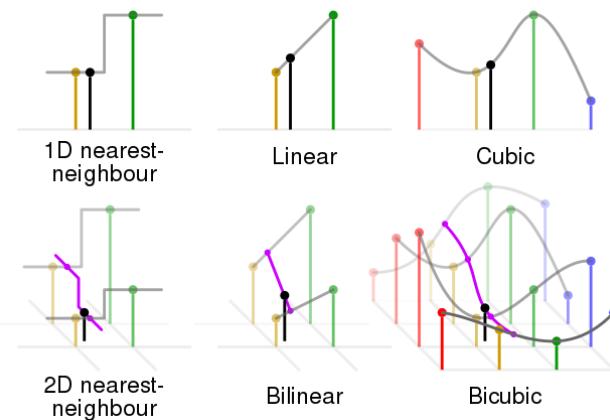


FIGURE 17 – Interpolation au plus proche voisin, linéaire et cubique en 1D et en 2D

quasiment impossible de créer un maillage de façon efficace avec la contrainte de temps qui m'était imposée par la durée du stage.

Mon tuteur m'a alors proposé une technique que nous utiliserons aussi pour appliquer la topographie à notre maillage. Si l'on parvient à trouver une fonction qui, à partir d'une position X, Y dans le "plan du barrage" permet de trouver la déformée de la courbure, on pourra l'appliquer aux différentes faces de notre barrage droit et par conséquent lui donner la forme souhaitée.

La création de cette fonction a nécessité de sélectionner les points sur les deux faces extérieures des maillages fournis sur la figure 7. Pour cela, nous utilisons la propriété d'encodage des fichiers Mesh accompagné d'un calcul des voisins de chaque noeud. Comme le maillage est conforme, chaque noeud à la surface du modèle fourni possède au plus 5 voisins, contre 6 pour les points internes que nous pouvons donc ignorer. L'utilisation du fichier Mesh permet de savoir s'il s'agit de la face des X positifs ou X négatifs, soit la face avant ou la face arrière du barrage.

À partir de ces deux ensembles de points, il est possible, grâce au module Scipy de Python de créer deux fonctions d'interpolation qui vont nous permettre de récupérer la quantité dont il faut déplacer chaque point du barrage selon un axe pour lui donner la forme et la courbure souhaitée.

La fonction utilisée est néanmoins un peu particulière car elle a été couplée à une interpolation au plus proche voisin pour les zones extrapolées afin de ne pas créer de sauts trop brusques dans l'espacement des points et éviter des extrapolations polynomiales pouvant parfois être trop imprécises. Plusieurs méthodes existantes sont explicitées sur la figure 17.

La figure 18 a été créé à partir d'une version plus haute résolution du barrage droit. Grâce à la paramétrisation, il est très facile de la changer afin de permettre une courbure plus douce au nouveau modèle de barrage. Néanmoins, à cause de la contrainte hexaèdrique, cela revient à aussi augmenter la qualité du reste du barrage.

4.5 Simulation d'un séisme réel

Le sujet de l'étude fournit des données d'un séisme enregistré à quelques centaines de kilomètres de la localisation du barrage. Il est possible de réaliser un calcul de propagation

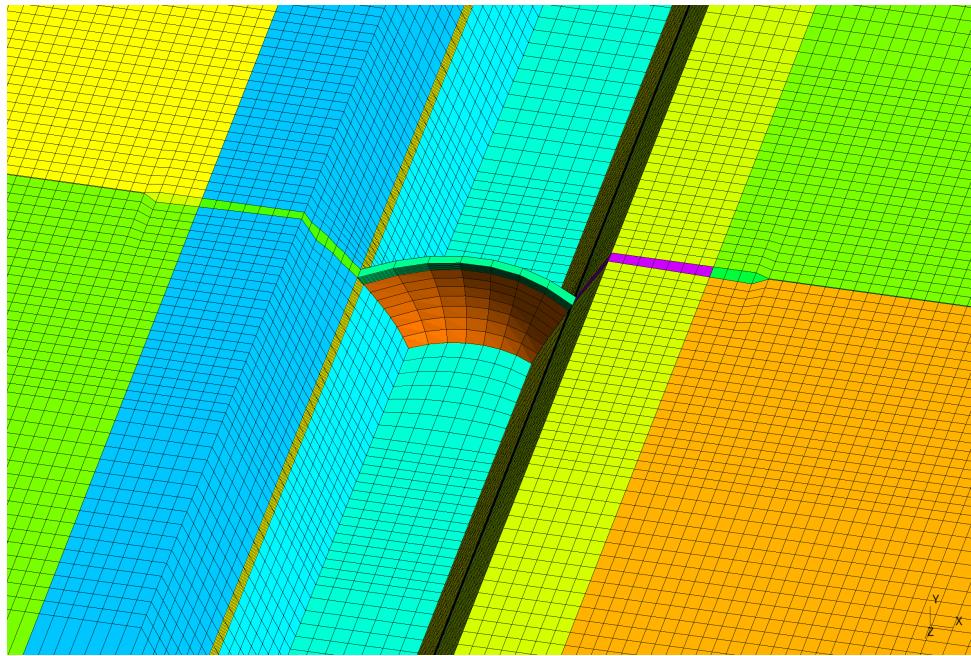


FIGURE 18 – Maillage avec le barrage déformé

afin d'amener la source du séisme dans notre domaine d'étude de simulation sans pour autant l'agrandir à des proportions démesurées rallongeant inutilement les temps de calcul. Néanmoins, par soucis de simplicité, nous avons simplement placé la source dans le domaine étudié, à une dizaine de kilomètres pour observer le comportement.

La différence la plus importante se trouve alors dans l'énergie apportée au barrage. Comme le problème est linéaire, on ne s'intéresse pas à la valeur absolue de l'énergie ou du déplacement du barrage mais bien de l'écart relatif entre les valeurs.

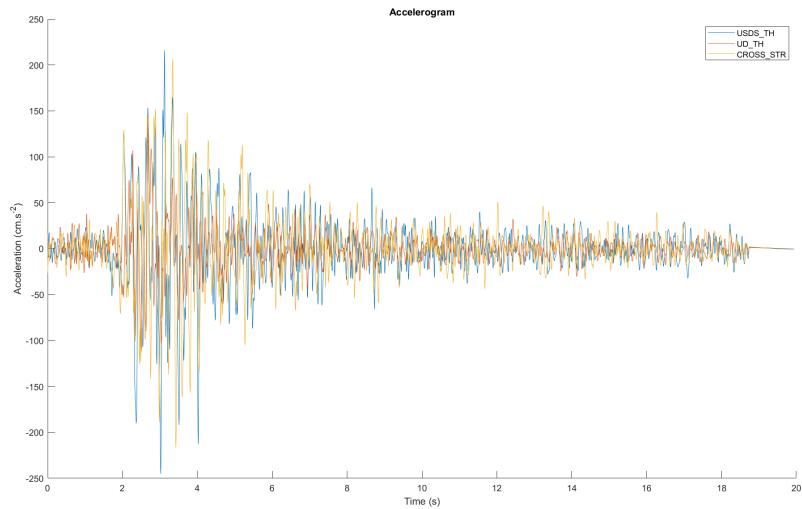


FIGURE 19 – Accélélographie du séisme de l'étude

L'extrait d'un des trois fichiers fournis par le comité permet d'être utilisé comme signal

d'entrée lors de la simulation. On observe alors une réponse bien plus intéressante que lorsqu'on utilisait un simple Ricker pour la distribution des fréquences/amplitudes de la source du séisme.

Dans la figure 19, USDS_TH signifie la direction Upstream-Downstream, ou dans la direction de propagation du séisme. UD_TH signifie Up-Down, ou dans la direction verticale. Enfin, CROSS_STR signifie Cross-Stream, ou perpendiculairement à la direction de propagation.

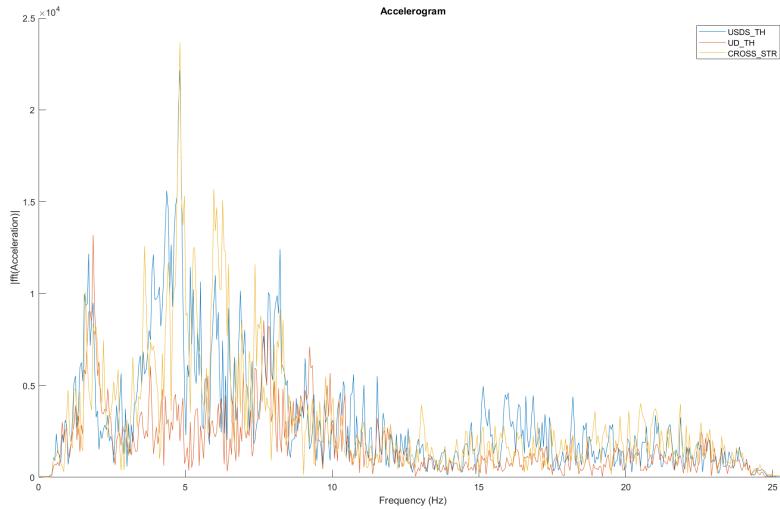


FIGURE 20 – Analyse en fréquence du séisme selon les 3 composantes

Cette étude fréquentielle nous permet de définir les contraintes sur la taille des éléments pour le maillage final.

On peut voir sur la figure 20 que les fréquences émises par la source se situent entre 0 et 25 Hz. Dans l'analyse des résultats des capteurs, nous allons donc pouvoir nous concentrer sur cette gamme de fréquences.

Calcul des contraintes sur le maillage

On peut donc définir les fréquences minimales et maximales $f_m = 1$ Hz et $f_M = 25$ Hz à partir desquelles il est possible de calculer des tailles d'élément maximales et minimales selon le matériau étudié.

Dans un premier temps il faut calculer les longueurs d'ondes minimales et maximales dans les différents matériaux i .

$$\lambda_{m,i} = \frac{\min\{v_{p,i}, v_{s,i}\}}{f_{\max}} \quad \lambda_{M,i} = \frac{\max\{v_{p,i}, v_{s,i}\}}{f_{\min}}$$

Matériau	λ_m (m)	λ_M (m)
Béton	100	4000
Sol	136	6000
Eau	56	1400

TABLE 2 – Longueurs d'onde dans les différents milieux du modèle

À partir de ce tableau, il est possible de voir que selon le matériau traversé, il n'est pas obligatoire d'avoir la même précision de maillage. De plus, il est en réalité inutile de considérer des éléments plus petits que 50 m. Par ailleurs, si un élément se trouve être plus grand que 6000 m on aura affaire à des imprécisions de calcul importantes.

Nous obtenons donc nos différentes contraintes sur la taille des éléments qui seront par la suite utilisée pour la paramétrisation du barrage.

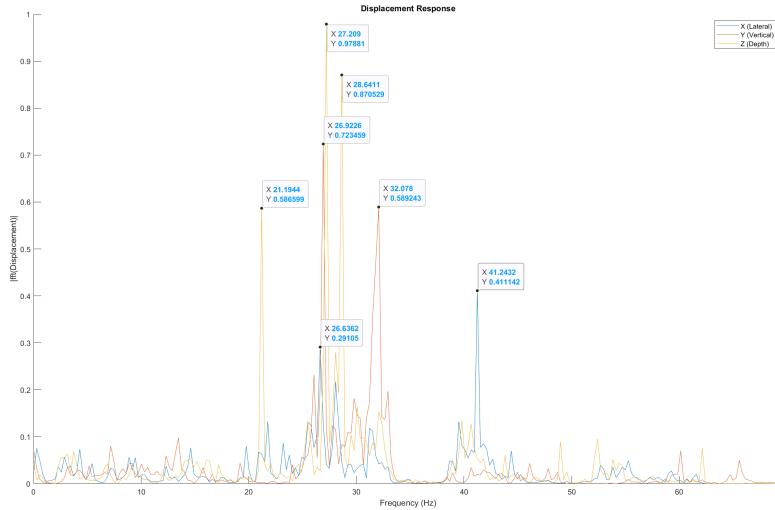


FIGURE 21 – Réponse du capteur $N = 100$ en déplacement (normalisé)

Après avoir vérifié que le critère de Shannon s'appliquait à notre mesure et avoir repéré le Nyquist de notre analyse en fréquence, on peut tracer la transformée de Fourier de n'importe quelle mesure de capteur sans craindre de repliement spectral.

La figure 21 nous permet d'apercevoir différents pics sur les axes X, Y, et Z d'un capteur choisi au hasard (ici, le capteur 100). On a donc accès aux fréquences de résonance du barrage. Cependant, il serait précipité de considérer qu'il s'agisse des seules fréquences. Nous avons déjà vu que les fréquences à étudier sont comprises entre 0 et 25 Hz mais le capteur étudié peut aussi se trouver dans un ventre d'oscillation d'une autre fréquence qui ne sera donc pas répercutee sur la figure.

Pour pallier à ce problème, on peut tracer un graphique des maxima locaux de quelques 200 capteurs visibles sur la figure 22. On constate donc une multitude de résonances à différentes fréquences

Sur cette figure, on repère différentes fréquences de résonance du barrage. Celles-ci sont répertoriées dans le tableau

Chacun de ces modes propres a un coefficient plus ou moins important pour la déformation.

4.6 Prise en compte de la topographie

Un aspect intéressant de l'étude du barrage de Tsankov Kamak a été la prise en compte de la topographie réelle avoisinant le barrage qui permet de prendre en compte différents phénomènes comme la réverbération sur les surfaces de la chaîne de montagne.

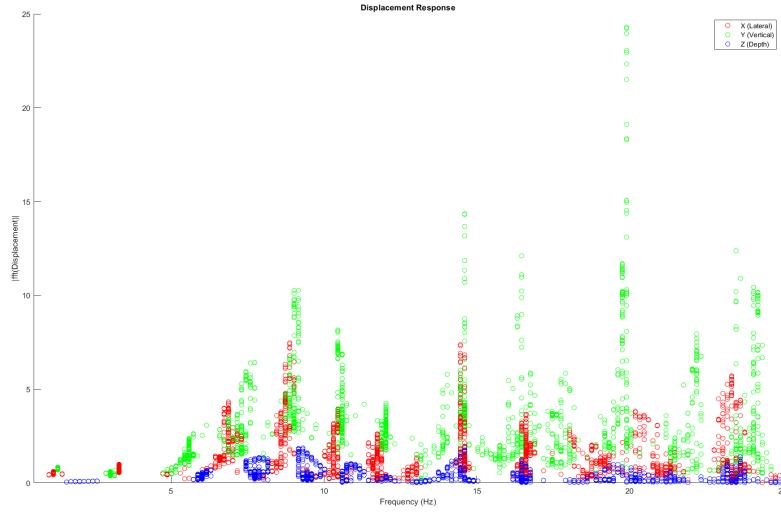


FIGURE 22 – Pics de résonance de 200 capteurs choisis selon une loi uniforme (parmi 1361 capteurs sur l'ensemble du barrage)

$f_{X,i}$	$f_{Y,j}$	$f_{Z,k}$
1.1	5.6	6.1
3.3	7.3	7.7
6.9	9.0	9.3
8.9	10.5	10.7
10.5	12.0	12.0
11.7	14.6	14.6
12.9	16.5	16.5
14.5	17.8	19.5
16.6	19.9	21.3
18.0	22.2	23.6
18.8	24.2	
20.2		
23.3		

TABLE 3 – Fréquences de résonance du barrage arqué selon les différents axes en Hz (± 0.2 Hz)

Dans un premier temps, mon travail a consisté en la récupération de données d’élévation pour la zone concernée. Le package MatLAB `readhgt`¹⁰ permet de télécharger rapidement les données d’élévation pour une tuile (longitude, latitude) en utilisant les données satellites SRTM de la NASA. À nos coordonnées, la précision est aux alentours de 30 m.

Par la suite, comme le code de génération du maillage est écrit en Python il faut convertir le fichier `.hgt` en données exploitables.

Pour cela il est possible d’utiliser le code suivant :

Le tableau `z` contiendra alors l’écart à la moyenne de l’élévation. Afin de le rendre utilisable,

10. [Lien du module](#)

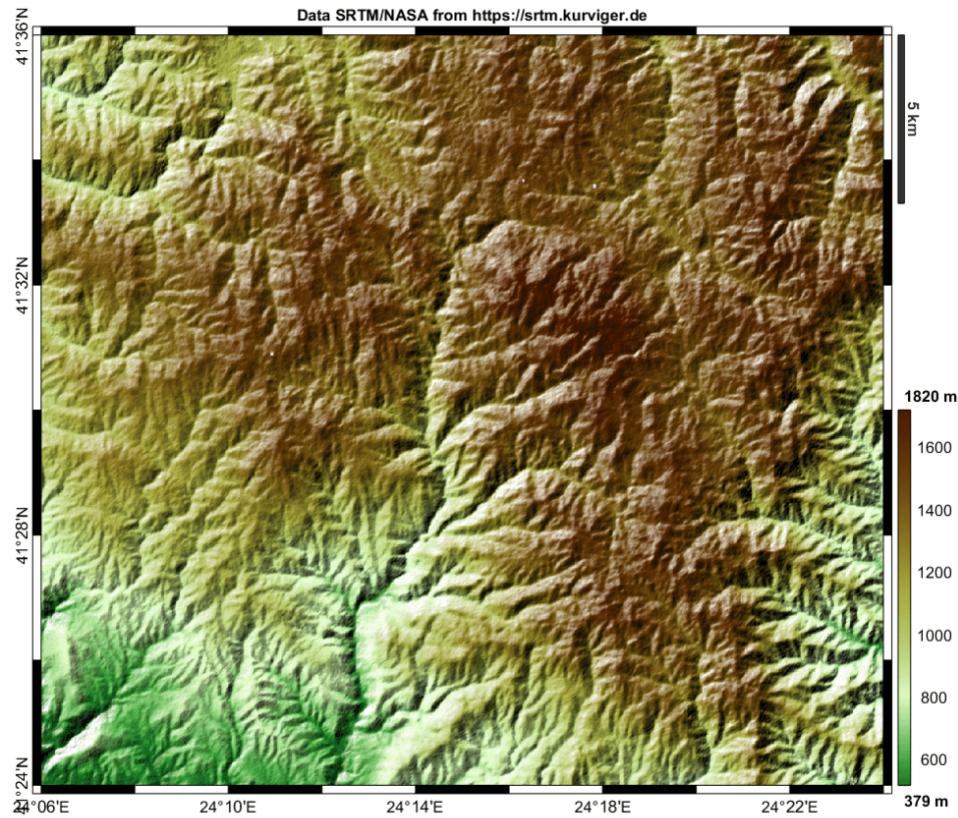


FIGURE 23 – Plot d'un fichier .hgt généré par le package (tronqué)

```

1 import os
2 import numpy as np
3 import math
4
5 fn = os.path.join(dirname, "N41E024.hgt")
6
7 siz = os.path.getsize(fn)
8 dim = int(math.sqrt(siz / 2))
9
10 assert dim * dim * 2 == siz, "Invalid file size"
11
12 data = np.fromfile(fn, np.dtype(">i2"), dim * dim).reshape((dim, dim))
13
14 lat = np.linspace(42, 41, dim)
15 lon = np.linspace(24, 25, dim)
16 z = data - np.average(data)
17

```

FIGURE 24 – Code de conversion d'un fichier d'élévation

on convertit le tableau en fonction à l'aide d'un interpolateur du module `scipy`. J'ai eu l'occasion de tester deux interpolateurs différents, à savoir **l'interpolateur linéaire par morceaux** et **l'interpolateur de Clough-Tocher**. Le second permet d'avoir une interpolation continue. Le

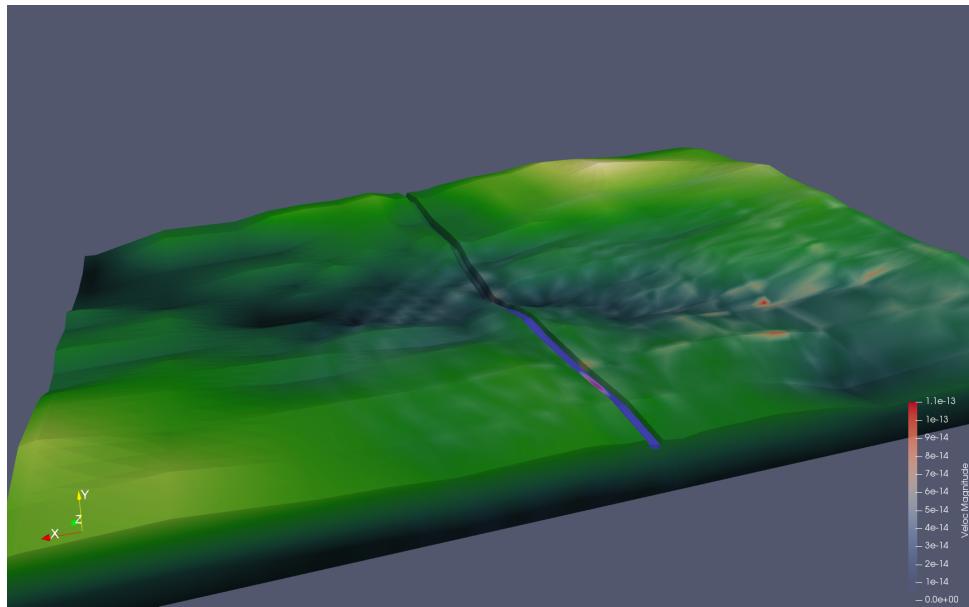


FIGURE 25 – Capture d'écran d'une vidéo réalisée avec une qualité de maillage très réduite

calcul de l'interpolateur est autour de 50% plus long avec la deuxième méthode. Au vu du gain de temps apporté par le premier calcul, j'ai décidé de l'utiliser pour la suite. L'intégralité des interpolations se font donc de façon linéaire, ce qui est suffisant pour une bonne approximation compte tenu de la précision initiale des données de l'ordre de 1 arc-seconde ou 30m.

Après calcul, la fonction d'interpolation prend plus d'1Go en mémoire, l'appliquer aux plusieurs centaines de milliers de points du maillage initial peut donc prendre beaucoup de temps. Avec mon ordinateur, la compilation d'un maillage pouvait prendre de 10 à 30 minutes et aller jusqu'à plusieurs heures en fonction de la précision souhaitée.

4.7 Réalisation d'une vidéo

La vision ultime du stage était la réalisation d'une vidéo de propagation du séisme et la réaction du barrage au passage de celui-ci. Néanmoins, par soucis de temps et de moyens matériels, il ne m'a été possible de réaliser qu'une ébauche à partir d'une petite partie de la simulation, très simplifiée, sur laquelle j'ai pu réaliser la vidéo. Il m'était impossible d'exploiter mes plusieurs centaines gigaoctets de données car ni mon ordinateur, ni le serveur de visualisation de l'AMU, ne disposaient d'une puissance suffisante.

5 Perspectives

5.1 Utilisation de la paramétrisation

Le maillage que j'ai eu l'occasion de créer reposait sur une multitude de variables. Il m'était donc facile de tester le barrage dans différentes configurations. Par exemple, je pense qu'il aurait été intéressant de le simuler avec un réservoir plus ou moins rempli pour voir l'impact sur les fréquences de résonance. Il aurait aussi été possible de simuler des barrages plus ou moins épais,

larges ou hauts. La contrainte de temps étant trop forte, je n'ai finalement pas réussi à réaliser l'intégralité des projets que j'avais pour mon modèle.

5.2 Paralléliser la création de maillage

Le stage ne durant que quelques semaines, je n'ai pas eu le temps de me concentrer sur un aspect très intéressant sur lequel je voulais me pencher pour rendre ma méthode de génération de maillages bien plus rapide afin de pouvoir itérer plus rapidement dessus et ne pas attendre 30 minutes à chaque fois que je souhaitais faire une modification de mon barrage le plus complexe (le calcul de la fonction d'élévation et son application sur les millions d'éléments est ce qui prenait 90% du temps de création du barrage lorsque la topographie était activée). Un moyen relativement simple de pallier ce problème, en s'inspirant de ce qui se fait sur le super-calculateur, est de paralléliser l'exécution de la fonction, à savoir appliquer la fonction non pas de façon séquentielle sur un seul cœur de ma machine mais sur les 8 qui sont à ma disposition. Le gain de temps ne sera pas linéaire, mais on peut facilement s'attendre à des performances 6 fois supérieures, ce qui aurait permis d'atteindre des temps de génération de près de 5 minutes.

Un autre bénéfice, dont je n'ai jamais pu profiter, aurait été d'exécuter les scripts de génération sur le calculateur directement, ce qui m'aurait permis de laisser ma machine utilisable pour une autre tâche.

5.3 Correction du maillage avec l'élévation

L'introduction de l'élévation dans le maillage a entraîné des problèmes qui m'ont bloqué plusieurs semaines. Lorsqu'on appliquait la fonction d'élévation au maillage, pour une raison inconnue¹¹, certains éléments avaient tendance à s'inverser, menant à des Lagrangiens négatifs et entraînant une divergence très rapide du système.

5.4 Modèle plus complexe

Par manque de temps, il n'a pas été possible de proposer un modèle plus intéressant du barrage, à savoir utiliser la topographie réelle du terrain avoisinant, comme la vallée ou la forme réelle du réservoir, plutôt en V qu'en ligne droite. Il aurait été possible de créer une fonction d'interpolation du lit de la rivière afin de réaliser une déformation réaliste du terrain avoisinant, augmentant la précision de la simulation.

5.5 Étude d'autres barrages

La méthode utilisée ici peut être transposée à peu près n'importe quel barrage. Il suffit de disposer des données topographiques ainsi que d'une fonction ou d'un nuage de points représentant la géométrie du barrage afin de générer un maillage exploitable pour la simulation de la réponse à des ondes sismiques.

11. J'ai eu l'occasion d'essayer énormément de façons de régler le problème sans réel succès au cours des plusieurs semaines où j'étais coincé, même avec l'aide de mon tuteur.

6 Conclusion

Pour conclure, j'ai beaucoup apprécié ce stage au sein du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique. Même si je ne savais pas forcément à quoi m'attendre lors d'un stage orienté "recherche" et laboratoire plutôt qu'entreprise, mes tuteurs ont su me guider dans l'exploration de mon sujet pour que je ne m'ennuie pas.

C'était une très belle expérience pour essayer différents nouveaux outils que je n'aurai jamais eu l'idée d'essayer auparavant.

Je suis néanmoins un peu déçu d'avoir manqué de temps, ou plutôt d'en avoir beaucoup perdu à cause de problèmes que je n'ai finalement jamais réussi à résoudre de façon optimale.

En outre ce stage m'a permis de concilier les sciences et le code, deux choses que j'apprécie grandement tout en me faisant effleurer un peu le monde des grands ouvrages en Génie Civil.

Ce stage a été aussi l'occasion de rencontrer des personnes extraordinaires du laboratoire, que je remercie une nouvelle fois pour cette expérience.