



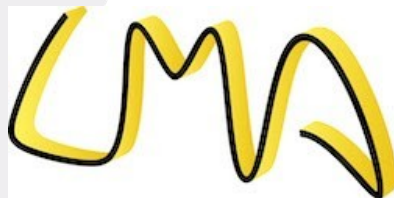
Institut supérieur de  
mécanique de Paris

## Titre du rapport

---

### RAPPORT DE STAGE STG2

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA)  
4 Impasse Nikola Tesla



Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique

**Elamine Aboudou**  
Année universitaire 2024/2025





## Sommaire

1 Introduction.....	5
1.1 Contexte et sujet du stage:.....	5
2 Présentation du cadre du stage.....	5
2.1 À propos du Laboratoire.....	5
3 Ma Mission.....	6
3.1 Sujet de mon travail.....	6
3.2 Objectifs.....	8
3.3 Déroulement.....	9
4 Travail Effectué.....	10
4.1 Modélisation du barrage.....	10
Références bibliographiques.....	14

# 1 Introduction

## 1.1 CONTEXTE ET SUJET DU STAGE:

La simulation numérique de propagation d'onde mécanique permet dans certains contextes de pouvoir analyser comment les ondes se comportent en présence de structures spécifique et inversement de pouvoir analyser le comportement de ces structures lorsqu'elles sont traversés par ces ondes. Cependant dans des milieux où l'on est susceptible d'avoir des éléments avec des tailles d'ordre de grandeur différents, on peut rencontrer certains problèmes pour mettre en œuvre des simulations. Une application concrète est l'étude des effets d'un séismes sur un barrage et la zones environnantes, ainsi le barrage vis à vis de la topographie d'une dizaines de kilomètres à une taille très petites. Le laboratoire faisant des recherches dans le domaine de la propagations des ondes mécaniques dans des milieux complexe, le développement d'un code de simulation dans ce contexte s'inscrit alors dans son activité de recherches.

## 2 Présentation du cadre du stage

### 2.1 À PROPOS DU LABORATOIRE

#### 2.1.1 Missions et domaines de recherche du laboratoire.

Le LMA est une unité mixte de recherche AMU-CNRS-Centrale Méditerranée, UMR 7031. Ses principaux domaines de compétences sont la **mécanique du solide** (structures, matériaux, interfaces) et l'**acoustique** (propagation des ondes dans des milieux fluides et solides complexes).

Le laboratoire est structuré en trois équipes de recherche. Les actions de l'équipe **Matériaux & Structures** concernent l'étude théorique des milieux solides, leur caractérisation expérimentale et l'établissement de modèles de comportement. L'équipe **Ondes et Imagerie** est spécialisée dans l'étude de la propagation des ondes mécaniques afin d'imager, caractériser et/ou contrôler de manière non invasive les milieux fluides et solides complexes. L'équipe **Sons** fédère des travaux menés sur les sons audibles, de point de vue de leur production, de leur contrôle (actif ou passif) et de leur perception (subie ou souhaitée).

Le LMA à un personnel d'environ 140 personnes et bénéficie d'un ensemble exceptionnel (plus de 5000 m<sup>2</sup>) de plateformes et centres de ressources expérimentales organisés en 5 champs disciplinaires thématiques. Il dispose alors d'infrastructure tels que **des chambres anéchoïques et réverbérantes** pour des test acoustiques , **des bancs d'essais** pour des tests mécaniques, et **des plateformes de calcul** pour faire tourner des simulations numériques.

#### 2.1.2 Équipe Ondes et Imagerie

L'équipe Ondes et imagerie est spécialisée dans l'étude de la propagation des ondes mécaniques dans les milieux complexes. Elle développe des recherches visant à modéliser, caractériser et imager de manière non invasive les milieux naturels, biologiques et manufacturés au moyen des ondes. Le spectre de ses activités de recherche est large, allant de la modélisation phénoménologique à l'étude expérimentale, en passant par le développement de codes de simulation numérique et le calcul haute performance.

Les domaines d'application concernent l'environnement (imagerie sismique, réduction de la pollution sonore sous-marine, matériaux biosourcés pour la réduction du bruit), le génie civil et nucléaire (contrôle et suivi de l'intégrité des structures), le transport (réduction des vibrations ferroviaires), la santé (imagerie diagnostique et thérapie par ultrasons) et l'archéologie (imagerie de statues antiques).

## 3 Ma Mission

### 3.1 SUJET DE MON TRAVAIL

#### 3.1.1 Sujet

Le sujet de mon stage porte sur la simulation numérique de propagation d'ondes, dans des géométries à des degrés de raffinements différents, tels que la simulation de tremblement de terre appliqué à la résistance de barrages. Le barrage étudié lors de mon stage est le barrage de tsankov en Bulgarie.



Figure 1: Vue 3D de la zone avoisinant le barrage de tsankov (Google Maps)

$$\alpha = \frac{c\Delta t^2}{\Delta h^2}, CFL$$

Ainsi alors que l'on a une zone d'étude de l'ordre d'une dizaine de kilomètre, on est obligé de prendre un petit pas d'espace du fait de la présence du barrage qui a une taille de l'ordre du mètre. Cela constitue un première « obstacle » car pour des raison de stabilité on est alors contraint de prendre un pas de temps plus petit. Le coût en ressource de calcul est alors très grand.

Pour pouvoir simuler un tremblement de Terre le laboratoire utilise un logiciel de calculs mettant en œuvre la méthode des éléments spectraux pour une discrétisation en espace et une méthode de Newmark prédicteur- correcteur en temps. La première difficultés étant que la topographie autour d'un barrage est généralement complexe. Ainsi utiliser une méthode de différences finies en espace serait beaucoup plus difficiles d'implémentation qu'en utilisant les éléments finies ou les éléments spectraux.

Le type d'équation que l'on doit résoudre :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \Delta u = f$$

En mettant en œuvre SEM et FEM on a alors :

$$M \ddot{U} + KU = F$$

Avec M la matrice de masse et K la matrice de rigidité.

Il est préférable d'utiliser la méthode des éléments spectraux car la matrice de masse est diagonale et le produit KU à une bien meilleur complexité qu'avec les éléments finies, lorsque on utilise des polynôme d'approximation d'ordre 5. Par conséquent dans un but de réduire le temps de calcul et la quantité de ressources machine on utilisera la méthode des éléments spectraux avec des polynôme d'approximation d'ordre 5.

### 3.1.2 Logiciels utilisés

Tout au long de mon stage je serai amené à utilisés différents logiciels et outil.

SEM3D : C'est l' algorithme de simulation numérique de tremblement de terre SEM3D issue d'un coopération de l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), CEA ET Central Supélec,et du CNRS.

GMSH : c'est un logiciel qui permet de générer des maillage

Paraview: logiciel permettant de visualiser certains résultats

Mésocentre AMU : Ensemble d'ordinateur pour mener des calcul haute performance

## 3.2 OBJECTIFS

### 3.2.1 Simulation

Le premier objectif est d'effectuer la simulation d'un tremblements de terre pour le barrage de tsankov pour cela il faudra :

-Dans un premier produire un maillage avec uniquement des éléments hexaédrique (polynôme de degrés 5) du barrage respectant la forme du barrage de Tsankov Kamak et la topologie avoisinante.

-Dans un seconde temps faire une simulation précise, lors d'un tremblement de terre, grâce aux logiciels de calcul SEM3D et au mésocentre.

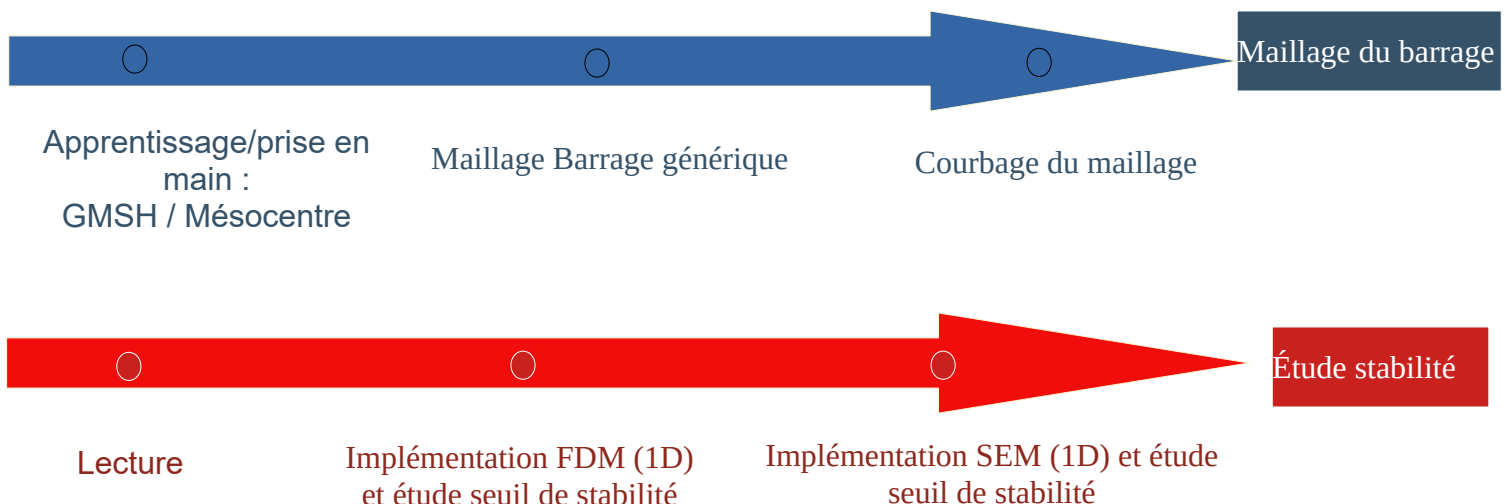
L'objectif au-delà de mon stage étant que l'on puisse réutiliser mon travail pour pouvoir réitéré le processus plus simplement pour d'autres barrages. La méthode de discrétisation en espace utilisés et la méthode des éléments spectraux (SEM), et une méthode de différence finies en temps. Les calculs vont être effectués aux mésocentre d'Aix-Marseille Université car du fait de la taille totales du domaine (une dizaines de kilomètres) les calculs ne pourront tourner assez rapidement dans un ordinateur ou un simple serveur de calcul.

### 3.2.2 Étude de stabilité pour des ordre en temps supérieurs

Le second objectif, parallèlement à cela, est d'étudier la stabilité et les performances d'autres méthodes numériques sur des cas simples (1D), principalement la méthode des éléments spectraux avec une discrétisation en temps à l'aide de l'approche par équation modifiés pour des ordres supérieurs. Le but, au-delà de mon stage, c'est de voir jusqu'à quel ordre on gagne significativement en stabilité (un CFL qui augmentent). Pour que après avoir implémenter dans SEM3D que l'on puisse ainsi augmenter le pas de temps, toujours dans un souci d'économiser des ressources de calculs.

## 3.3 DÉROULEMENT

### 3.3.1. Organisation





J'ai alors deux objectifs principaux :

- Faire un maillage hexaédrique du barrage et effectuer les calculs
- Faire une étude de stabilité avec la méthode des éléments spectraux pour des hauts degrés d'approximation en temps.

Les premières semaines j'ai consacré mon temps à apprendre en autonomie à utiliser différents logiciels

### 3.3.2 Premiers pas

J'ai consacré les premières semaines à me familiariser avec les différents logiciels que j'étais amené à utiliser, le plus important étant GMSH pour que je puisse commencer à réaliser le maillage du barrage. GMSH est un logiciel open source permettant de générer des maillages à partir de codes. Il existe différentes bibliothèques qui permettent de l'utiliser avec d'autres langages comme Python mais j'ai jugé qu'il était plus facile d'utiliser directement le langage (.geo) propre aux logiciels.

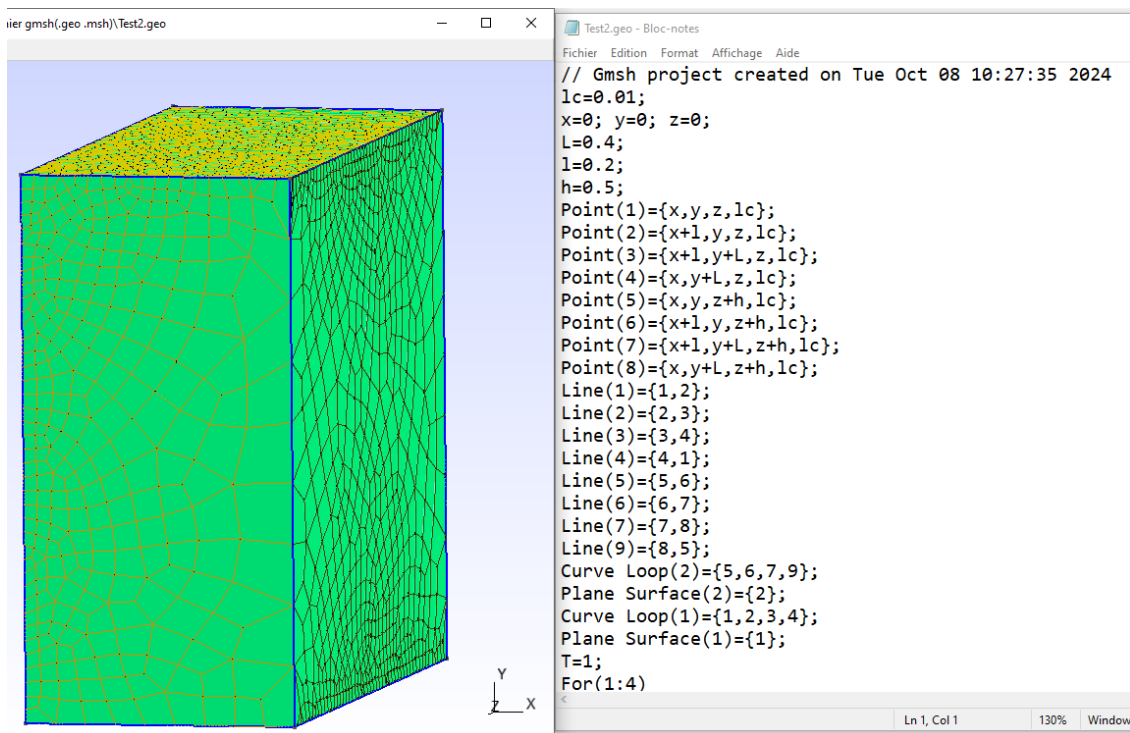


Figure 2: Maillage d'un cube et son code (maillage d'entraînement)

Voici un exemple de maillage simple que j'ai pu réaliser lors de ma phase d'apprentissage et une partie du code que j'ai écrit pour le générer. J'ai pu alors me rendre compte que le logiciel est assez fastidieux à manipuler, puisqu'il faut détailler point par point, ligne par ligne en tenant compte de l'ordre pour générer une surface ou un volume.

Parallèlement à la prise en main de GMSH, mon tuteur m'a donné à lire [1] Higher Order Numerical Method for Transient Wave Equations de Gary C. Cohen dans le but de voir et de mieux comprendre les différentes méthodes numériques utilisées pour résoudre des problèmes de propagations d'ondes, leurs avantages/inconvénients à différents niveaux (stabilité, dispersion, complexité...).

## 4 Travail Effectué

### 4.1 MODÉLISATION DU BARRAGE

#### 4.1.1 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 m<sup>3</sup> d'eau. La géométrie réalisée pour la modélisation est alors de prime abord assez simple comme on peut le voir sur cette figure

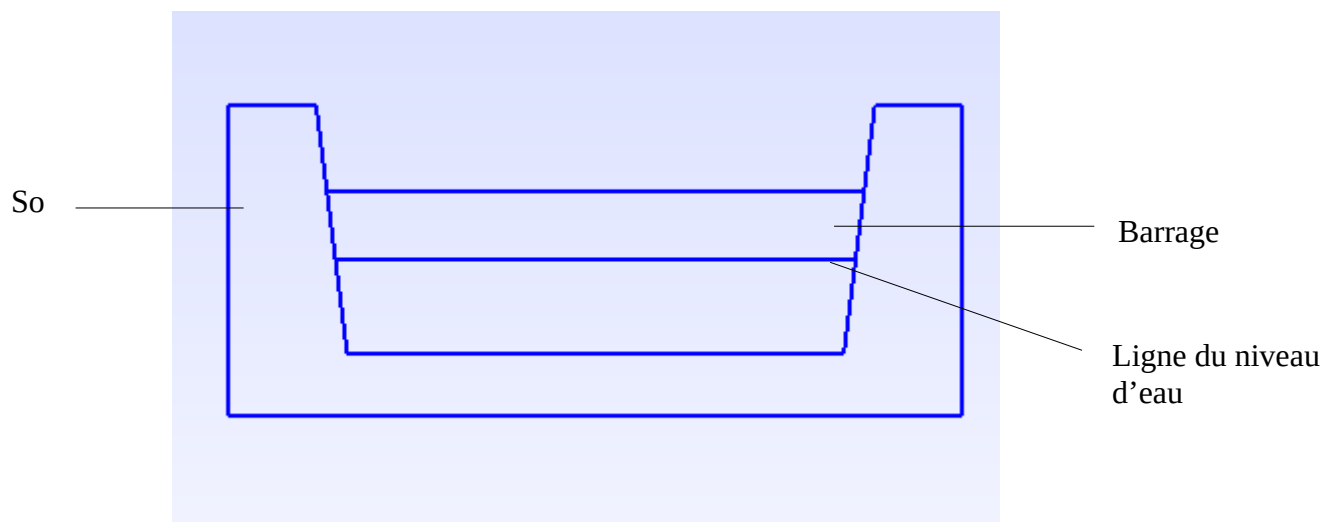


Figure 3: Modèle du domaine du barrage simple (avant extrusion)

Pour pouvoir réaliser le maillage des trois éléments, sol, barrage, eau, on trace la face du barrage puis réalise un maillage 2D de l'ensemble puis on extrude les différentes surfaces pour avoir notre maillage en 3D. Cependant, avec un tel modèle, même en utilisant les différentes fonctions de GMSH, on ne peut pas garantir que l'on puisse mailler le barrage avec des éléments hexaédriques uniquement. Il faut alors rajouter, des lignes par nous même pour pouvoir « forcer » le maillage avec des éléments hexaédriques, quitte à ce que générer des surfaces et donc des volumes supplémentaires, ce qui ne pose pas de problème car il suffira de rassembler les volumes dans des groupes correspondant à nos éléments réels (eau, barrages, sol).

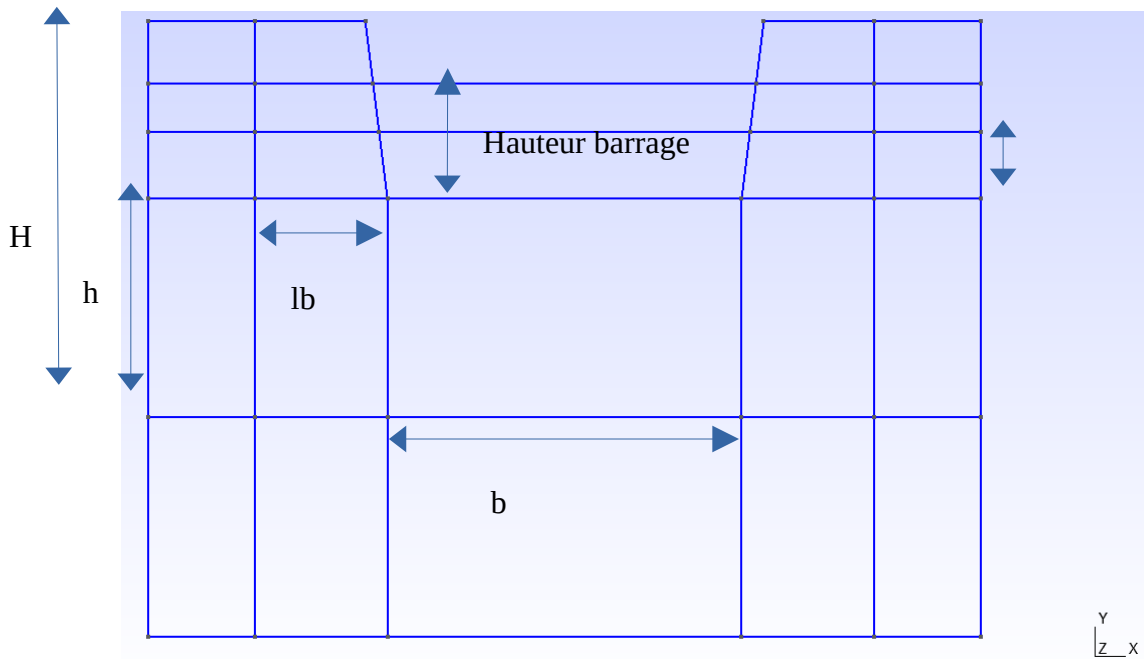


Figure 4: Modèle du domaine final

Ainsi voici le modèle final du barrage avec les nom des variables que j'ai utilisés dans mon fichier .geo. Pour fixer les valeurs des grandeurs je me suis servie du site de la Commission Internationale des Grands Barrages (ICOLD).

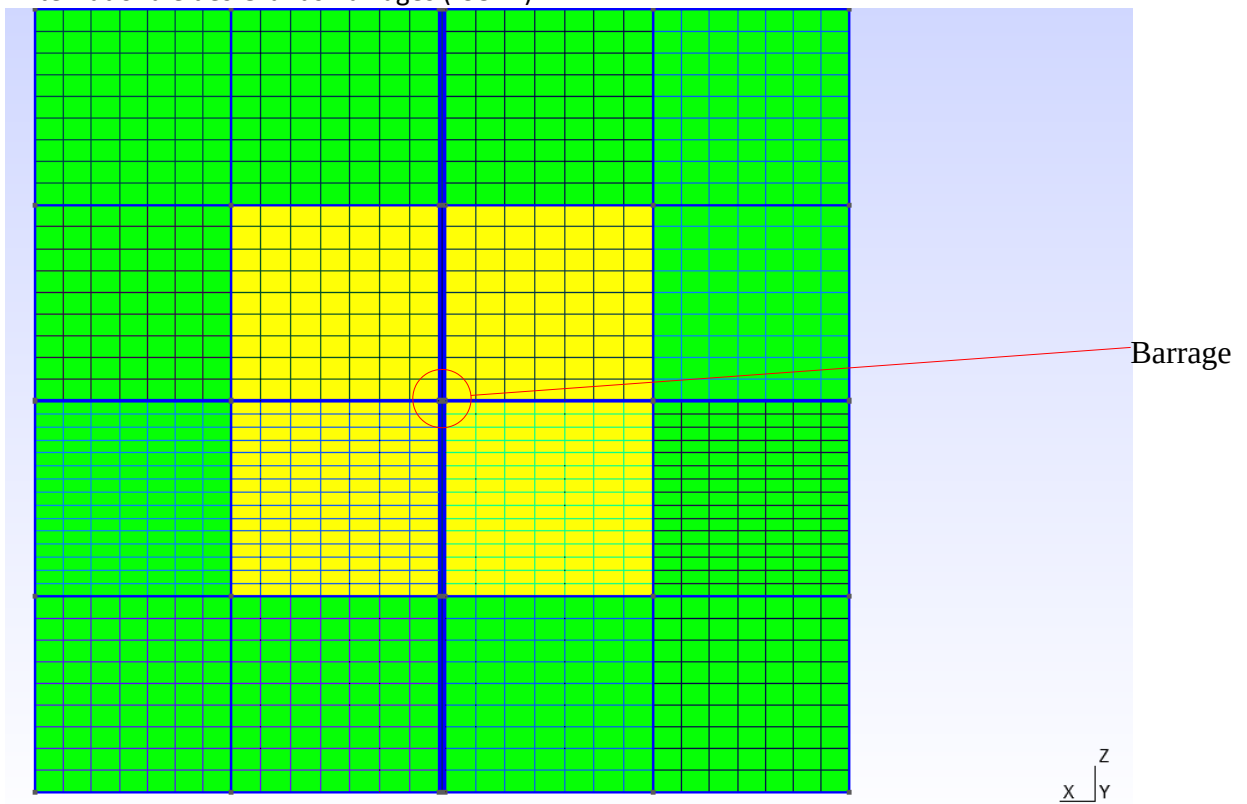


Figure 5: Vue de dessus maillage du domaine

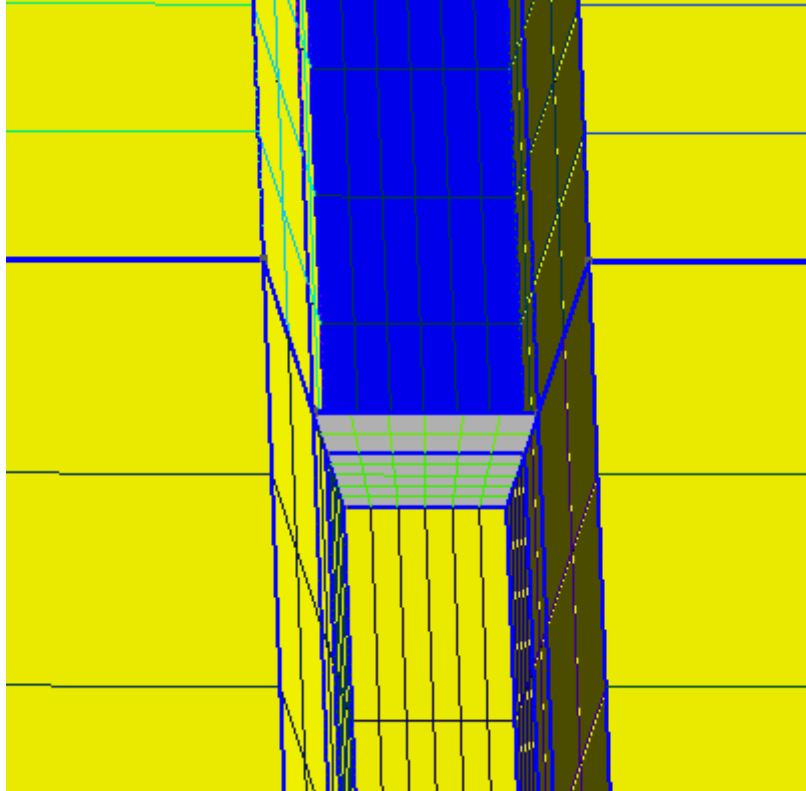


Figure 6: Vue du maillage du barrage

Sur ces vues du maillage on peut bien se rendre compte de la différences de tailles entre le barrages et du domaine. Pour déterminer un ordre de grandeur du nombre d'éléments qu'il faut pour avoir une bonne simulation (avec assez d'éléments pour la précision, sans en mettre trop pour éviter économiser des ressources de calculs).

#### 4.1.2 Ajout du PML

dd

#### 4.1.3 Importation de la courbure du barrage et de la topographie avoisinante

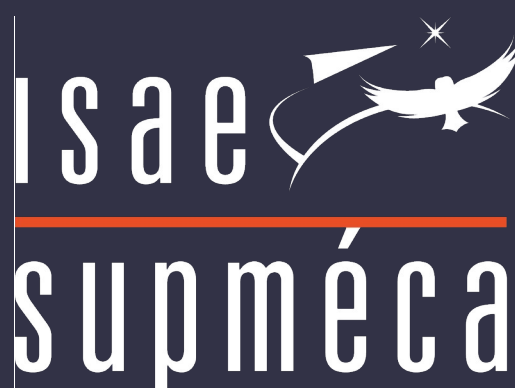
dd

## Références bibliographiques

[1] LORIENT D., 1977. *Dégradation thermique des composites dans les structures automobile*, Thèse de Docteur en Sciences, Université de Nancy I, 182 p.

[2] DUMAY E., CHEFTEL J.C., 1986. Propriétés des matériaux céramiques. *Sci. Materials*, 6, 147-176.

Sources internet : <https://www.jifuefushqsjcqsp.fr>, consulté le date et heure.



---

Institut supérieur de mécanique de Paris  
3 rue Fernand Hainaut 93407 Saint-Ouen Cedex  
tél. 01 49 45 29 00 / [www.isae-supmeca.fr](http://www.isae-supmeca.fr)

Ministère de l'Enseignement supérieur  
et de la Recherche

---

