

Modèle elastodynamique pour les cuves nucléaires

Méthodes et algorithmes

Sacha

August 28, 2024

Overview



1. Introduction

2. Méthodes

3. Résultats

4. Conclusion

The background of the slide is composed of two large, overlapping geometric shapes. A teal-colored shape occupies the top-left corner, while a light gray shape occupies the bottom-left corner. The rest of the slide is white. The word "Introduction" is centered in the white area.

Introduction

Introduction

À propos de l'entreprise



Avnir Energy aides les industriels de l'énergie dans les problèmes d'ingénierie mécanique

Le projet prend place dans l'équipe R&D

Projet SINUDYN



Projet de R&D en collaboration avec SONORHC

Objectif: Développer une méthode de surveillance des cuves de réacteurs avec le "retournement temporel"

Retournement temporel

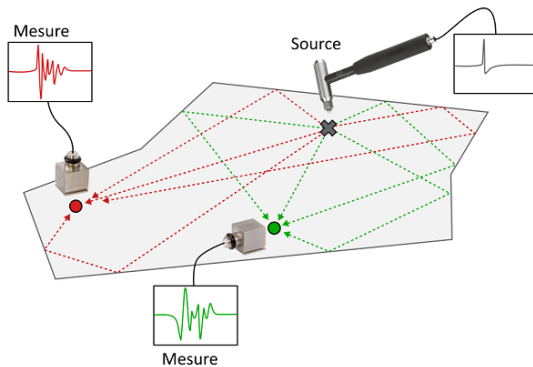


Figure 1: Phase d'apprentissage

Phase de focalisation

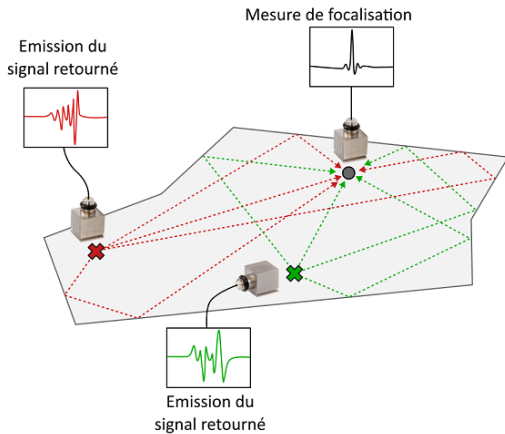


Figure 2: Phase de focalisation

Détection de défaut

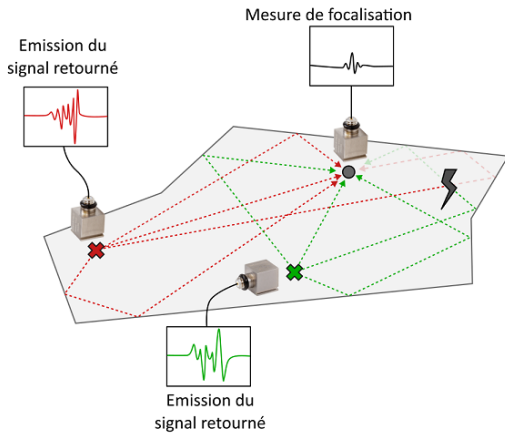


Figure 3: Comment détecter un défaut

Contraintes



- ▶ Capteurs immergés dans un liquide à haute température (Complicqué)
- ▶ Appliquer un choc dans ce même liquide (Impossible)
- ▶ Simulation nécessaire $\implies$ taille d'élément petite pour observer une flexion de la structure $\implies$ calcul couteux

Objectifs



- ▶ Développer une méthode numérique rapide et précise pour la propagation des ondes sur le jumeau numérique de la cuve (Spectral Element Method)
- ▶ Comparer les résultats avec les autres méthodes numériques (FEM,IGA)

The background of the slide is composed of two large, overlapping geometric shapes. A teal-colored shape occupies the top-left corner, while a light beige shape occupies the bottom-left corner. The rest of the slide is white. The word 'Méthodes' is centered in the white area.

Méthodes

Méthodes des éléments spectraux



- ▶ SEM = Spectral Element Method
- ▶ Utiliser des polynômes de degré élevés comme fonction de base

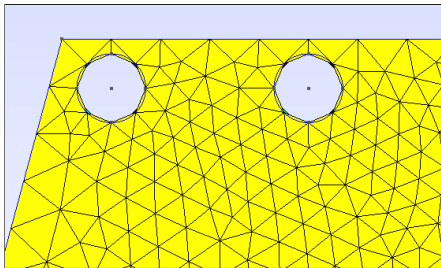
Intérêts de la SEM



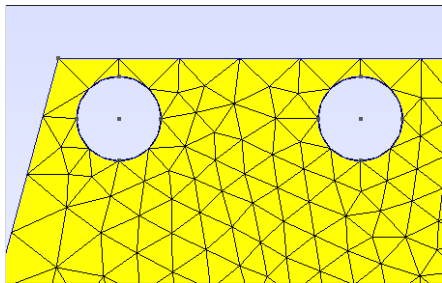
- ▶ Geometrie du maillage plus précise
- ▶ Déformée des éléments plus fidèles à la réalité

Méthodes

Méthodes numériques



Maillage utilisé en FEM



Maillage utilisé en SEM

Discrétisation en temps

Méthode de Newmark



Assure la stabilité du schéma numérique

Utile pour les équation aux dérivées d'ordre 2 en temps

Équations

Équations d'élasticité



$$\left\{ \begin{array}{ll} \rho \partial_t^2 u - \nabla \cdot \sigma(u) = f & \text{dans } \Omega \times (0, T) \\ u = 0 & \text{sur } \Gamma_D \times (0, T) \\ u = h(t) & \text{sur } x_0 \times (0, T) \\ u = u_0 & \text{dans } \Omega \times \{0\} \\ \partial_t u = v_0 & \text{dans } \Omega \times \{0\} \end{array} \right. \quad (1)$$

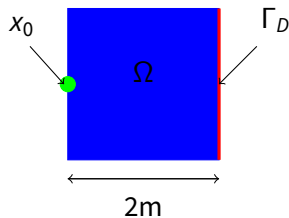


Figure 5: Illustration du cas 2D

Tenseur des contraintes



$$\begin{aligned}\sigma &= \lambda \cdot u \, I + 2\mu \varepsilon(u) \\ &= \lambda \cdot u \, I + 2\mu (\nabla u + \nabla u^T)\end{aligned}$$

λ et μ sont les coefficients de Lamé (dépendent des propriétés du matériau)

Effort appliqué sur x_0



$$\begin{cases} h(t) = \sin(2\pi f_c t) e^{-5(f_c t - 2)^2} \\ f_c = 20000 \text{ Hz} \end{cases}$$



- ▶ Feel++ est une librairie pour la résolution d'EDP contenant des méthodes numériques avancées (SEM)
- ▶ J'ai utilisé Feel++ pour résoudre des cas 2D et 3D.

The background of the slide is composed of two large, overlapping geometric shapes. A teal-colored shape occupies the top-left portion, while a light beige shape occupies the bottom-left portion. The rest of the slide is white. The word 'Résultats' is centered in the white area.

Résultats

Cas 2D



- Pour s'assurer de la convergence en maillage de la méthode, il faut une solution de référence u
- La solution de référence est une solution numérique obtenue sur un maillage fin (1mm) avec des polynômes de degré 4.

Résultats à comparer



On extrait les valeurs de la solution sur trois points de la plaque $(u(S1), u(S2), u(S3))$.

Emplacement des capteurs

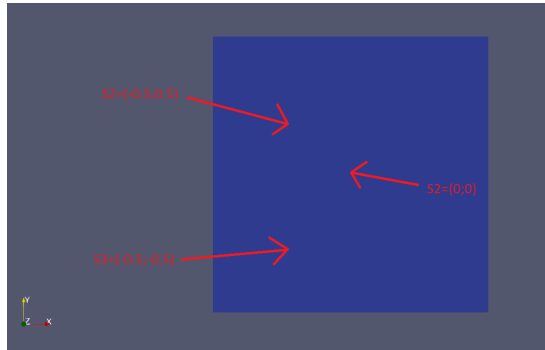


Figure 6: Emplacement des capteurs

Calculer l'erreur



Soit u_h la solution numérique et $j \in \{1, 2, 3\}$

$$\|u(Sj) - u_h(Sj)\| = \sum_{i=0}^N \frac{u_i(Sj) - u_{h,i}(Sj)}{\max_{t \in (0,T)} u(t)} \quad (2)$$

Résultats sur Paraview



Étude de convergence

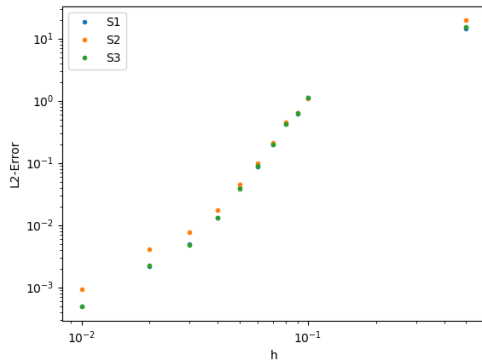


Figure 7: Erreur 2 entre la solution de référence et la solution numérique

Comparaison avec la méthode FEM



- ▶ J'ai comparé les résultats obtenus avec des éléments finis
- ▶ Méthode FEM avec Feel++ et Code_Aster

Comparaison avec la méthode FEM

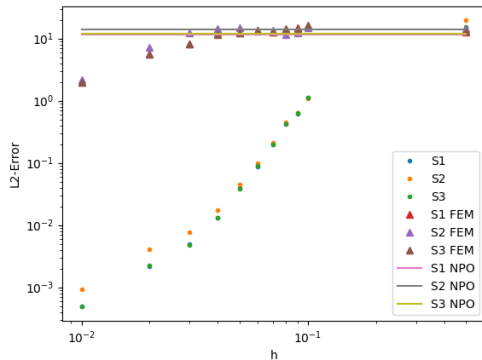


Figure 8: Comparaison entre la méthode des éléments finis et spectraux

Comparaison temps de calcul



- ▶ Comparer le temps de calcul entre SEM et FEM $\implies$ Comparer avec la même erreur

Comparaison temps de calcul



Table 1: Comparaison des temps de calcul entre les éléments finis et spectraux (10^{-1})

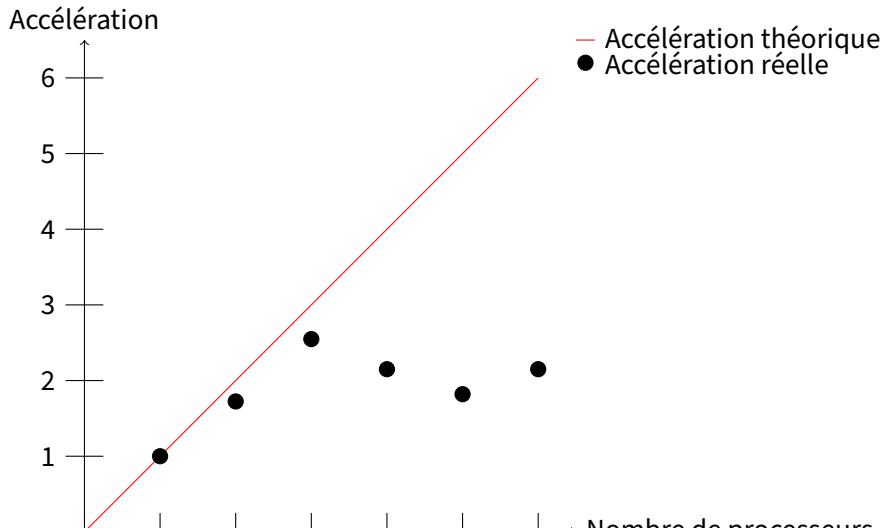
Computation time	
T	
[s]	
FEM	629
SEM	614

Optimisation du temps de calcul



Pour optimiser le temps de calcul, on utilise la librairie MPI qui permet de lancer des calculs en parallèle.

Optimisation du temps



Applications

Retournement temporel



- ▶ J'ai inversé les déplacements de S1, S2 et S3 dans le temps
- ▶ J'ai réinjecté ces déplacements dans la plaque 2D

Applications

Video du retournement temporel



Applications

Signal obtenu

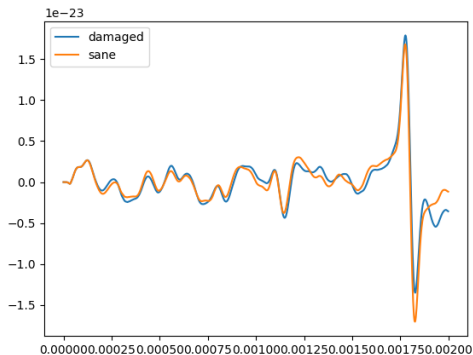


Figure 10: Signal obtenu durant la phase de focalisation

Applications

Application au cas 3D



- ▶ Résolution équations d'élasticité sur le cylindre 3D
- ▶ Plaque qui vient d'une maquette de réacteur nucléaire

Applications

Resultats



The background consists of two large, overlapping geometric shapes. A teal-colored shape is in the upper-left corner, and a light beige shape is in the lower-left corner. They meet at a diagonal line that runs from the top-left towards the bottom-right. The rest of the background is white.

Conclusion

Prochaines étapes



Travail à l'issue du stage repris par un employé d'Avnir

Par ordre de priorité

- ▶ Cas coque: Réduire dimension du maillage en prenant en compte l'épaisseur
- ▶ Prise en charge température et gravité
- ▶ Couplage fluide-structure
- ▶ Prise en compte poussée d'Archimède

Bilan



La méthode SEM a montré des résultats intéressants de par:

- ▶ Précision de calcul
- ▶ Efficacité

References I



C Prud'homme, Sacha, Pascal Voyané, Thomas Legall.
Notes on Avnir / Cemosis collaboration - June 2024.



M. Cenanovic.

Finite element methods on surfaces.

Jönköping University, School of Engineering, Jönköping, 2015.



M. Cenanovic, P. Hansbo, and M. G. Larson.

Cut finite element modeling of linear membranes.

Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 310:98–111, Oct. 2016.
arXiv:1511.02327 [math].