

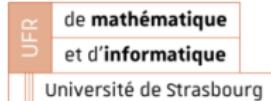


Simulation et benchmarking de méthodes numériques de propagation d'ondes sur la paroi d'une maquette de cuve nucléaire

Rayen Tlili

Encadrant en entreprise : Thomas Legall

Encadrant à l'université : Christophe Prud'homme



Introduction

Présentation de l'entreprise

Retournement temporel

Projet SINUDYN

Méthodologie

Outils et méthodes numériques

Modélisation

Modèle physique

Modèle géométrique

Mesures expérimentales sur la cuve

Implémentation avec Feel++

Ressources de calculs et usage mémoire

Résultats et Benchmarking

Résultats numériques

Benchmarking

Conclusions

Présentation de l'entreprise

- ▶ Fondée en 2015, spécialisée énergie et génie civil
- ▶ Surveillance : vibrations, acoustique, ultrasons, sismique
- ▶ 30 employés, R&D, Opérations, Commercial
- ▶ Clients : EDF, CEA, Sonorhc, partenaires académiques

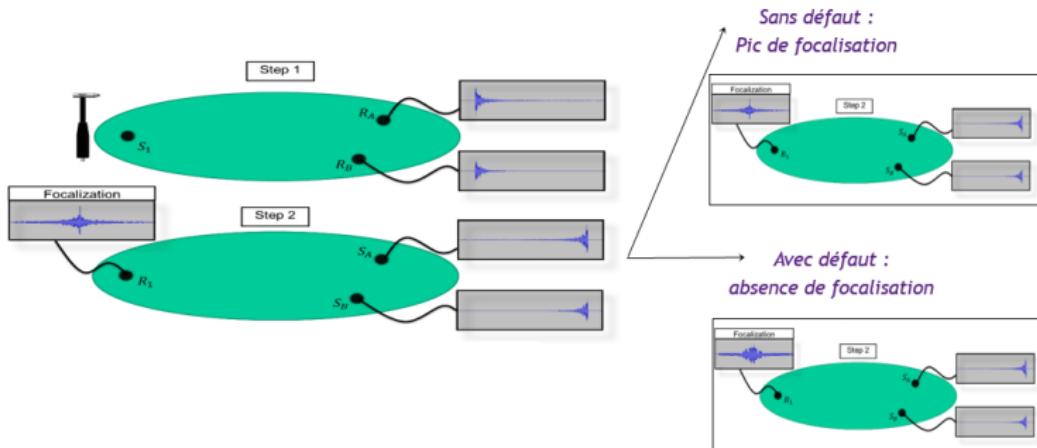


Technique de surveillance

Retournement temporel — principes et applications industrielles

On enregistre les ondes sur un réseau de capteurs, on *renverse* ces signaux dans le temps puis on les réémet : en milieu peu dissipatif, l'énergie **refocalise** sur la source initiale.

- ▶ Principe adapté aux ultrasons initié dans les années 80
- ▶ Contrôle de santé intégré (SHM), CND, localisation d'impacts
- ▶ Technique 3S (Structural Survey System, brevet Sonorhc)



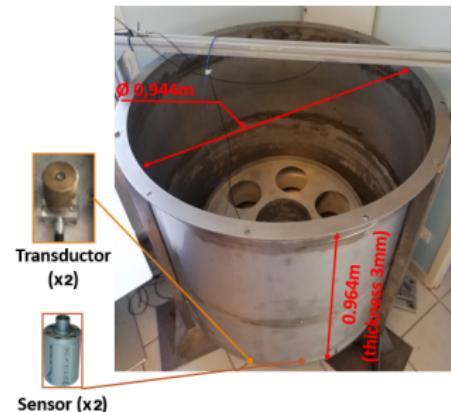
Réf. M. Fink, *Time Reversal of Ultrasonic Fields*, IEEE TUFFC 39(5), 1992; M. Fink, *Les miroirs à retournement temporel*, 2001.



- ▶ Collaboration Avnir Energy – Sonorhc – Cemosis
- ▶ Problématique: Structures industrielles inaccessibles (haute température, radiations) où les mesures directes sont impossibles.
- ▶ Objectif : simulation numérique de la surveillance
- ▶ Cas d'étude : cuve de réacteur nucléaire (maquette expérimentale)

Cuve — géométrie & dimensions

- ▶ Hauteur : **0.964 m**
- ▶ Diamètre : **0.944 m**
- ▶ Épaisseur paroi : **3 mm**
- ▶ Support : 3 poutres vissées sur collarette
- ▶ Encastrement prévu : collarette (surface fixée)



Maquette de la cuve

But : modéliser la propagation d'ondes fluide/solide et évaluer la méthode numérique (cas de la cuve).

- ▶ Chaîne de simulation multiphysique (Feel++)
- ▶ Étude paramétrique : ordre polynomial, maillage (taille/ordre), Δt ,
- ▶ Couplage entre domaines
- ▶ Validation et Benchmarking des simulations

Méthodologie

Feel++ (Finite Element Embedded Language in C++)

- ▶  **Gmsh** : maillages 1D/2D/3D avec balises physiques
- ▶  **ParaView** : visualisation et analyse
- ▶  **GitHub** : gestion de versions, communication
- ▶  **Docker** : environnements reproductibles

Méthode des éléments finis (FEM)

Idée. Discréteriser Ω (triangles/tétra/héxa) et approximer la solution par morceaux.

Forme faible (générique). Trouver $u \in V = H_0^1(\Omega)$ tel que

$$a(u, v) = l(v) \quad \forall v \in V.$$

- ▶ Approximation : $u_h(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N U_i \phi_i(\mathbf{x})$.
- ▶ Assemblage \Rightarrow système $A U = b$.
- ▶ Bases de Lagrange P1 (linéaire), P2 (quadratique), ordres supérieurs possibles selon précision/coût.

SEM (éléments spectraux) — pour la propagation d'ondes

- ▶ Réduction de la dispersion.
- ▶ Bases de Lagrange sur **points Gauss–Lobatto–Legendre (GLL)** ; quadrature GLL \Rightarrow **matrice de masse diagonale** ($M \approx \text{diag}(w_i)$) \Rightarrow explicite rapide.

Modèle physique - domaines, équations, contraintes

Domaines/notations : Ω_s , Ω_f , $\Gamma_{fsi} = \partial\Omega_s \cap \partial\Omega_f$; $\mathbf{u}_s(\mathbf{x}, t)$, $p(\mathbf{x}, t)$;
 \mathbf{n}_s , \mathbf{n}_f normales sortantes (solide/fluide).

Solide (élastodynamique) : Acier inoxydable: $E = 2.1 \times 10^{11}$ Pa, $\nu = 0.3$, $\rho_s = 7870$ kg/m³.

$$\rho_s \partial_{tt} \mathbf{u}_s - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}_s) = \mathbf{f}_s$$

$$\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}_s) = \lambda(\nabla \cdot \mathbf{u}_s)\mathbf{I} + 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}_s), \quad \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}_s) = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u}_s + \nabla \mathbf{u}_s^T).$$

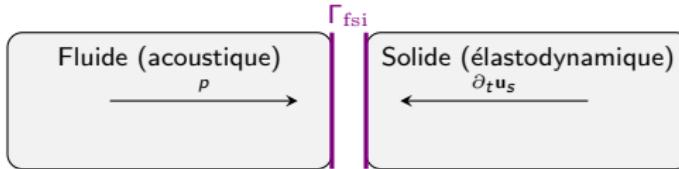
Fluide (acoustique) : Eau: $\rho_f = 1000$ kg/m³, $c = 1480$ m/s.

$$\partial_{tt} p - c^2 \Delta p = f_f.$$

Conditions initiales (repos) : $\mathbf{u}_s(\cdot, 0) = \mathbf{0}$, $\partial_t \mathbf{u}_s(\cdot, 0) = \mathbf{0}$, $p(\cdot, 0) = 0$.

Conditions limites : $\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u}_s = \mathbf{0} \text{ sur } \Gamma_{s_fixed} \subset \partial\Omega_s, \\ p = 0 \text{ sur } \Gamma_{top} \subset \partial\Omega_f, \end{array} \right.$

Couplage sur Γ_{fsi} : $\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{f}_N(t) \mathbf{n}_s \text{ sur } \Gamma_N \subset \partial\Omega_s, \quad f_N(t) = \sin(2\pi f_c t) e^{-5(f_c t - 2)^2}, \quad f_c = 5 \text{ kHz}. \\ \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}_s) \mathbf{n}_s = -p \mathbf{n}_s \text{ (équilibre dynamique)}, \\ \partial_t \mathbf{u}_s \cdot \mathbf{n}_s = -\frac{1}{\rho_f} \partial_{\mathbf{n}_f} p \text{ (continuité de la vitesse normale)}. \end{array} \right.$



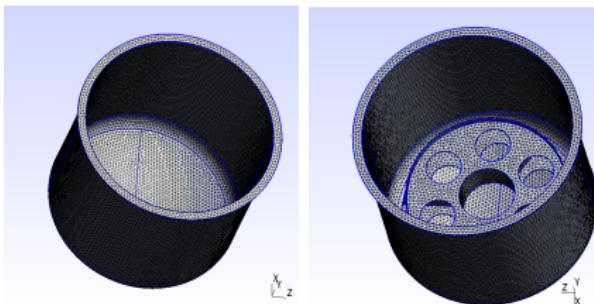
Régions physiques et stratégie de maillage

STEP import (merge) :

- ▶ Cuve simplifiée (FSI)
- ▶ Cuve complète (structure)

Régions physiques sur GMSH :

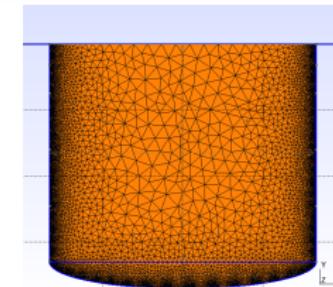
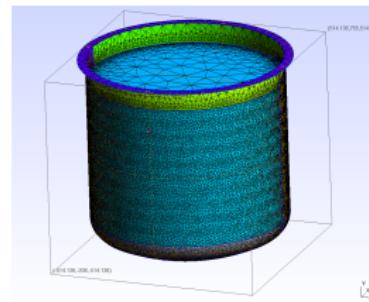
- ▶ Volumes : "Omega_f", "Omega_s"
- ▶ Surfaces : "Gamma_s",
"Gamma_s_fixed", "Gamma_N",
"Gamma_fsi", "Gamma_top"



Simplifiée (gauche) vs complète (droite)

Adaptation :

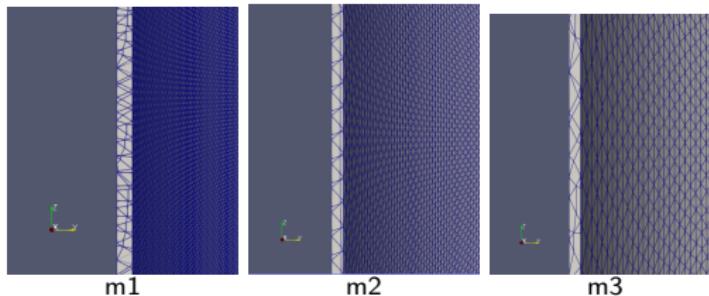
- ▶ FSI : raffinement près de Gamma_fsi



Raffinement adaptatif 3D / coupe 2D

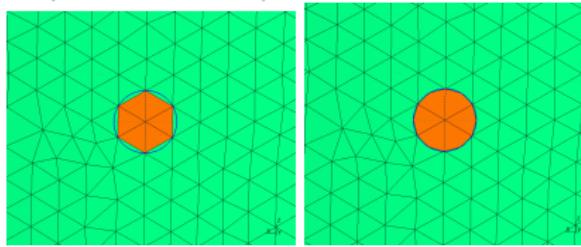
Tailles et ordre des éléments du maillage

Tailles : **m1** = 3 mm (fin), **m2** = 6 mm (moyen), **m3** = 12 mm (grossier)



Ordre géométrique :

G1 : éléments linéaires, **G2** : éléments quadratiques (faces courbes), $G > 2$: iso-paramétrisation fine (utile pour SEM)



Mesures expérimentales — mise en place & protocole

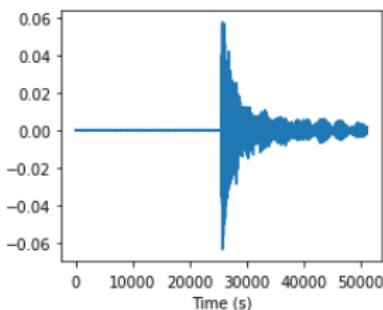
Contexte & acquisition

- ▶ Maquette de cuve **en acier inoxydable**, vidée de son contenu.
- ▶ Transducteurs piézoélectriques : **1 émetteur & 1 récepteur** sur la paroi.
- ▶ Échantillonnage : $f_s = 51\,200 \text{ Hz} \Rightarrow \Delta t \approx 1.95 \times 10^{-5} \text{ s}$.

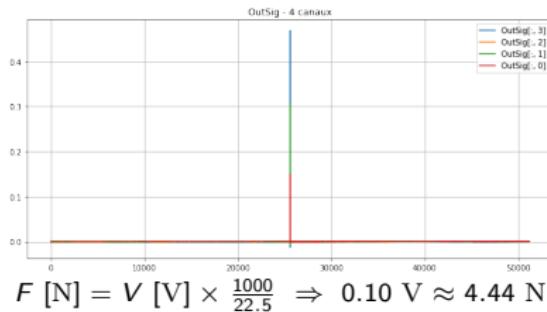
Apprentissage — interprétation des signaux

Excitation localisée sur une zone de surveillance ; comparaison mesures numérique.

Accéléromètres: KS90B/KS901B, sensibilité 100 mV/g. **Marteau d'impact:** ICP, sensibilité 22.5 mV/N.



$$a [\text{m/s}^2] = V [\text{V}] \times \frac{1000}{100} \times 9.81 \Rightarrow \\ 0.01 \text{ V} \approx 0.98 \text{ m/s}^2$$



Ordre de grandeur : un impact $\sim 1 \text{ N}$, sur la paroi extérieure, induit $\sim 0.34 \text{ m/s}^2$ au capteur bas de cuve.

Deux fichiers complémentaires

- ▶ **.cfg** : sorties, maillage, schéma en temps, solveurs (linéaire/non-linéaire), tolérances.
- ▶ **.json** : domaines, équations, matériaux, C.I./C.L., post-traitement.

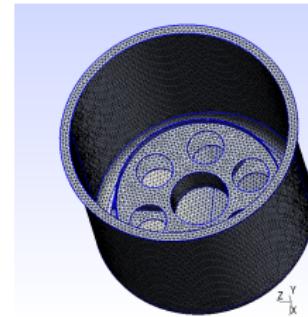
Post-traitement & ordres de discréttisation élevés

Scripts d'analyse

- ▶ Extraction des paramètres, mesures aux capteurs.
- ▶ Tracés déplacement/accélération, comparaison des simulations vs temps de calcul.

Ordres supérieurs

.Hausse DoF/mémoire \Rightarrow intérêt d'un temps explicite pour hauts ordres.



Maillage de référence (cuve complète)

Points clés

- ▶ Capteurs définis dans le .geo.
- ▶ Exports champs physiques et fichiers .data pour le benchmarking.
- ▶ FEM, quadrature de Gauss, schéma implicite en temps.

Méthode explicite vibro-acoustique

Objectif : Coupler explicitement onde–élastodynamique pour améliorer **coût/précision**.

Champs & espaces.

- ▶ Inconnues : $\mathbf{u}_s : \Omega_s \times [0, T] \rightarrow \mathbb{R}^3$ (vecteur), $p : \Omega_f \times [0, T] \rightarrow \mathbb{R}$ (scalaire).
- ▶ Tests (Galerkin) : $\mathbf{v}_s \in [H^1(\Omega_s)]^3$, $q \in H^1(\Omega_f)$

Formulation variationnelle (faible).

$$\underbrace{\int_{\Omega_s} \rho_s \partial_{tt} \mathbf{u}_s \cdot \mathbf{v}_s \, dx}_{\text{inertie}} + \underbrace{\int_{\Omega_s} \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}_s) : \nabla \mathbf{v}_s \, dx}_{\text{élasticité}} = \underbrace{\int_{\Gamma_{fsi}} p \mathbf{n}_s \cdot \mathbf{v}_s \, ds}_{\text{couplage}} + \underbrace{\int_{\Gamma_N} f_N(t) \mathbf{n}_s \cdot \mathbf{v}_s \, ds}_{\text{Neumann}}$$

$$\underbrace{\int_{\Omega_f} \partial_{tt} p q \, dx}_{\text{inertie}} + \underbrace{c^2 \int_{\Omega_f} \nabla p \cdot \nabla q \, dx}_{\text{diffusion acoustique}} = \rho_f \underbrace{\int_{\Gamma_{fsi}} \partial_t \mathbf{u}_s \cdot \mathbf{n}_s q \, ds}_{\text{couplage}}$$

Discrétisation des expressions

Notations (matrices & intégrales).

$$\mathbf{M}_s = \left[\int_{\Omega_s} \rho_s \phi_i \cdot \phi_j dx \right], \quad \mathbf{K}_s = \left[\int_{\Omega_s} \varepsilon(\phi_j) : \varepsilon(\phi_i) dx \right], \quad \mathbf{M}_f = \left[\int_{\Omega_f} \psi_i \psi_j dx \right], \quad \mathbf{K}_f = \left[\int_{\Omega_f} \nabla \psi_j \cdot \nabla \psi_i dx \right],$$

$$\mathbf{G}_{fsi}^{n+1} = \left[\int_{\Gamma_{fsi}} p^{n+1} \mathbf{n}_f \cdot \phi_i ds \right], \quad \mathbf{F}_N^n = \left[\int_{\Gamma_N} f_N^n \mathbf{n}_s \cdot \phi_i ds \right], \quad \mathbf{V}_{bc}^n = \left[\int_{\Gamma_{fsi}} \dot{\mathbf{u}}_s^n \cdot \mathbf{n}_s \psi_i ds \right].$$

Solide (Newmark- $\beta\gamma$, $\beta = \frac{1}{4}$, $\gamma = \frac{1}{2}$)

$$\mathbf{u}_s^{n+1} = \mathbf{u}_s^n + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_s^n + \frac{\Delta t^2}{2} (1 - 2\beta) \ddot{\mathbf{u}}_s^n + \beta \Delta t^2 \ddot{\mathbf{u}}_s^{n+1}, \quad \dot{\mathbf{u}}_s^{n+1} = \dot{\mathbf{u}}_s^n + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{\mathbf{u}}_s^n + \gamma \ddot{\mathbf{u}}_s^{n+1}].$$

Linéarisation petites déformations : $\sigma(\mathbf{u}_s^{n+1}) \approx \sigma(\mathbf{u}_s^n)$.

$$\boxed{\mathbf{M}_s \mathbf{u}_s^{n+1} = \mathbf{M}_s \left[\mathbf{u}_s^n + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_s^n + \frac{\Delta t^2}{2} (1 - 2\beta) \ddot{\mathbf{u}}_s^n \right] + \Delta t^2 \left(\mathbf{F}_N^n - \mathbf{K}_s \mathbf{u}_s^n + \mathbf{G}_{fsi}^{n+1} \right)}$$

Fluide (différences centrales)

$$\frac{p^{n+1} - 2p^n + p^{n-1}}{\Delta t^2} - c^2 \Delta p^n = \rho_f (\partial_t \mathbf{u}_s^n \cdot \mathbf{n}_f) \text{ sur } \Gamma_{fsi}$$

$$\boxed{\mathbf{M}_f \mathbf{p}^{n+1} = \mathbf{M}_f (2\mathbf{p}^n - \mathbf{p}^{n-1}) - \Delta t^2 c^2 \mathbf{K}_f \mathbf{p}^n + \Delta t^2 \rho_f \mathbf{V}_{bc}^n}$$

Couplage explicite — stratégie & algorithme

Algorithm 1 Algorithme de Picard

Require: tolérance ε , itérations max k_{\max}

Ensure: u^{n+1} , p^{n+1}

```

1: get  $(u^{n,0}, v^{n,0}, p^{n,0})$ 
2:  $k \leftarrow 0$ 
3: converged  $\leftarrow$  false
4: while  $\neg$  converged and  $k < k_{\max}$  do
5:    $k \leftarrow k + 1$ 
6:    $p^{n,k} \leftarrow \text{Wave. Solve}(v^{n,k-1})$ 
7:    $u^{n,k} \leftarrow \text{Elastic. Solve}(p^{n,k-1})$ 
8:   if  $\|u^{n,k} - u^{n,k-1}\|, \|p^{n,k} - p^{n,k-1}\| < \varepsilon$  then
9:     converged  $\leftarrow$  true
10:   end if
11: end while
12: Elastic.Update() ; Wave.Update()

```

Fluide (acoustique): p^{n+1} ,
source $\dot{\mathbf{u}}_s^n \cdot \mathbf{n}_f$ sur Γ_{fsi}

Interface: appliquer p^{n+1}
(Neumann) au solide

Solide (élasticité):
 $\mathbf{u}_s^{n+1}, \dot{\mathbf{u}}_s^{n+1}$

Supercalculateur Gaya — noeuds, partitions, spécifications

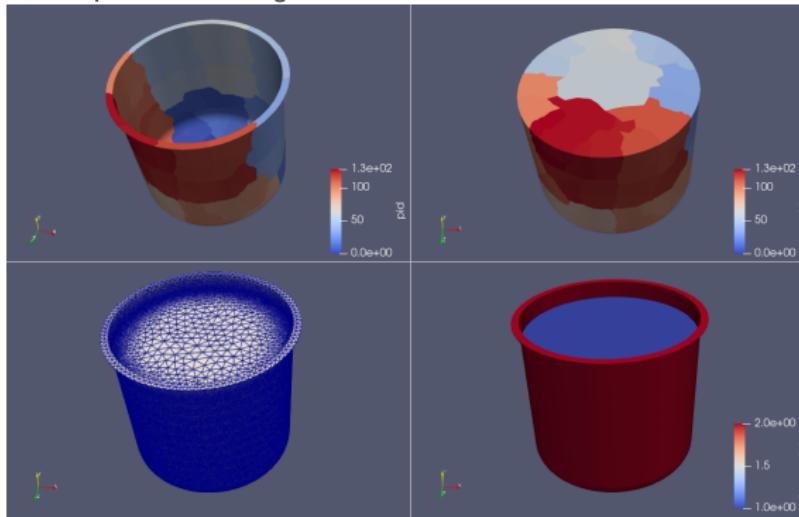
Nœuds : 6 CPU (gaya1–gaya6), 1 GPU (gaya-gpu). **Partitions** : production, public, debug, gpu.

CPU nodes : 2x AMD EPYC / nœud, 64 coeurs/CPU (SMT×2) \Rightarrow 256 threads/nœud, RAM 515 Go, Linux 5.15.

Parallélisation et usage mémoire: Utilisation de Slurm

Partitionnement : maillage $\rightarrow N$ sous-domaines ($N = \text{ntasks}$). Chaque rang MPI ne charge que sa part \Rightarrow baisse mémoire/processus.

exports \Rightarrow fichiers .data pour benchmarking.



Visualisation du partitionnement (128 partitions) et du maillage sur paraview

Validation — métriques et stratégie

Approche

- ▶ Confrontation aux mesures.
- ▶ Référence numérique haute précision (ordre/maillage supérieurs).

Erreur relative L^2 (proximité point-à-point en amplitude)

$$E_{L^2} = \frac{\|u_{\text{num}} - u_{\text{ref}}\|_{L^2}}{\|u_{\text{ref}}\|_{L^2}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^N |u_{\text{num}}(t_i) - u_{\text{ref}}(t_i)|^2\right)^{1/2}}{\left(\sum_{i=1}^N |u_{\text{ref}}(t_i)|^2\right)^{1/2}}$$

Intercorrélation de Pearson (similarité de forme, indépendante de l'échelle)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad \Rightarrow \quad r \approx 1 : \text{formes proches}, \quad r \approx 0 : \text{peu corrélées.}$$

Simulations avec Toolbox FEEL++

Paramètres fixés & coûts (HPC)

Paramètres

- ▶ 128 tâches MPI sur 1 nœud --exclusive (ou 256 sur 2 nœuds).
- ▶ Schéma temporel : Newmark ordre 2.
- ▶ dt conforme stabilité: $10^{-7} \sim 10^{-5}$ s (capture HF).
- ▶ Référence: P4G2m2

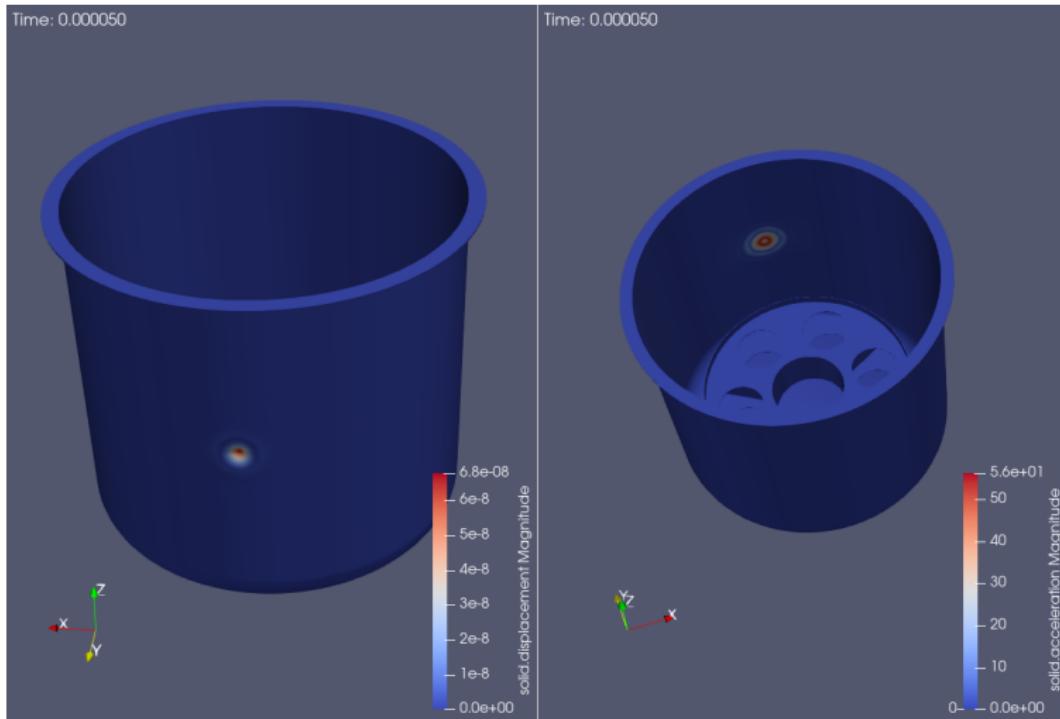
nDOF typiques

- ▶ m_1 (3 mm): P1 3.51M, P2 21.42M, P3 64.05M.
- ▶ m_2 (6 mm): P1 0.897M, P2 5.45M, P3 16.44M, P4 36.46M.
- ▶ m_3 (12 mm): P1 0.230M, P2 1.38M, P3 4.28M, P4 9.53M, P5 17.87M.

Plans de comparaison.

- ▶ Maillage $m_1/m_2/m_3$ (3/6/12 mm) à P fixé.
- ▶ Ordre $P_1/P_2/P_3$ à maillage fixé.
- ▶ Géométrie G_1 vs G_2 (isoparamétrique).

Vidéo — simulation 3D (toolbox solide)



Paramètres: P1G1, m2 (6 mm), $\Delta t = 10^{-5}$, $T = 5$ ms, solveur GAMG.

G1 vs G2 — Signaux simulés

Comparaison des réponses temporelles obtenues avec une géométrie linéaire (G1) et quadratique (G2).

Évolution de l'erreur L^2 : évaluer le gain de précision apporté par G2 à maillage comparable.

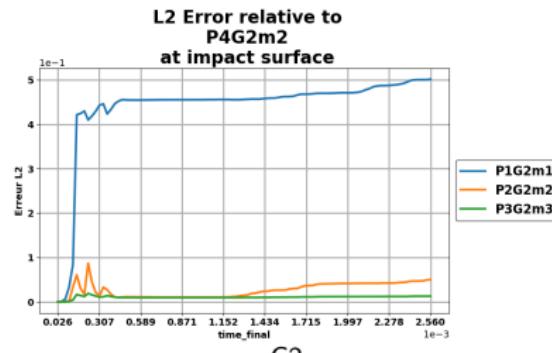
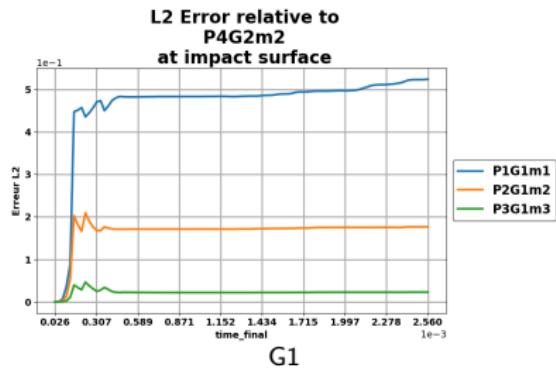


Figure: Erreur relative L^2 : G1 vs G2.

RT: signal 0.5 s ; coda $\lesssim 0.25$ s (plus court avec eau) ; référence numérique limitée à $t \leq 2.5$ ms (traversée de la 1^{re} onde).

G1 vs G2 — Erreur relative

Résumé des erreurs par rapport la référence : P4G2m2

G1 (géométrie linéaire)

Config	Rel. L^2	Pearson r	Max diff
P1G1m1	5.2390e-01	0.9497	2.1536e-08
P2G1m2	1.7661e-01	0.9988	7.6216e-09
P3G1m3	2.3026e-02	0.9999	1.0144e-09

G2 (géométrie quadratique)

Config	Rel. L^2	Pearson r	Max diff
P1G2m1	5.0153e-01	0.9495	2.0296e-08
P2G2m2	5.0048e-02	0.9988	1.1725e-09
P3G2m3	1.2770e-02	1.0000	4.4811e-10

Observations sur les erreurs.

- ▶ Saut d'erreur au premier pic, puis plateau.
- ▶ Corrélation de Pearson r décroît avec la durée (proche de 1 sur fenêtres courtes).
- ▶ Écarts plus marqués loin de l'impact, dynamique globale préservée.

Tendances observées.

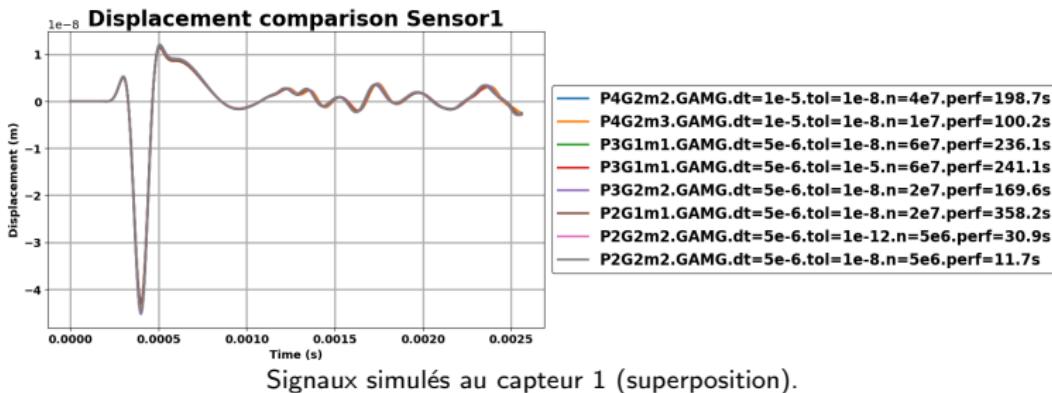
- ▶ Raffiner h : $L^2 \downarrow, r \uparrow$ (surtout à bas P).
- ▶ Augmenter P : dispersion initiale réduite, gains de h moins cruciaux, surcoût mémoire/temps significatif au-delà de P3–P4.
- ▶ Meilleure cohérence géométrie/fonctions \Rightarrow erreurs initiales \downarrow .

Simulations fines — capteur 1 (zone d'impact)

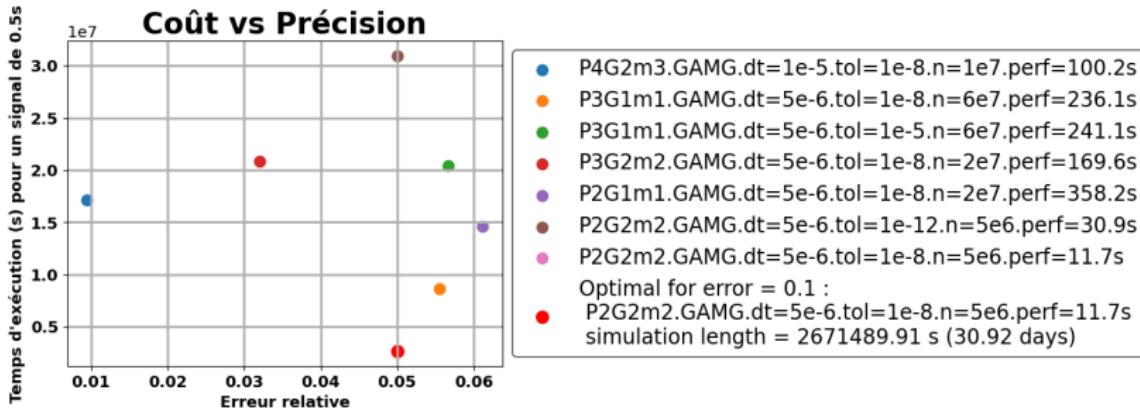
Coûts

- ▶ ~100 simulations, cas coûteux: 256 partitions sur 2 cœurs/nœuds Gaya.
- ▶ Référence: $P4G2m2$, 198.7 s/pas, 0.00256 s de signal, init. 33 min, swapping mémoire.
- ▶ Cible: meilleur compromis coût / précision vs une référence courte.

Clés : $P_n G_m$ (ordre poly / ordre géométrique), $m_1/m_2/m_3$ (3/6/12 mm), dt , tol, n (nDOF), perf (s/ Δt).



Compromis coût / précision — synthèse (capteur 1)



- ▶ Meilleur compromis : **P2G2m2** (quadratique iso-paramétrique, maille moyenne).
- ▶ Ordres élevés ($P \geq 3$) \Rightarrow coûts RAM/temps vite prohibitifs.

Configuration	s/ Δt	Err. rel.
P4G2m2 (256 parts)	198.7	Réf.
P4G2m3 (256 parts)	100.2	0.95%
P3G1m1 (10^{-8})	236.1	5.56%
P3G1m1 (10^{-5})	241.1	5.66%
P3G2m2	169.6	3.21%
P2G1m1	358.2	6.12%
P2G2m2 (10^{-12})	30.9	5.00%
P2G2m2 (10^{-8})	11.7	5.00%

Comparaison avec les mesures

La figure présente la comparaison directe entre le signal expérimental et le signal numérique avec amortissement basé sur l'analyse fréquentielle du signal expérimental.

Comparaison mesures expérimentales et signal numérique amorti au Capteur 1

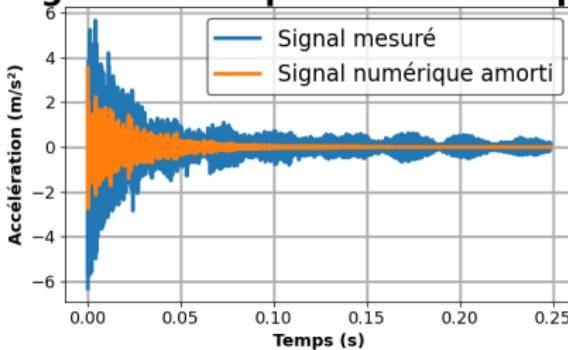
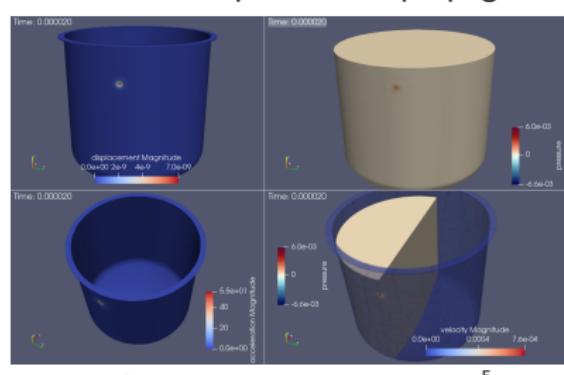
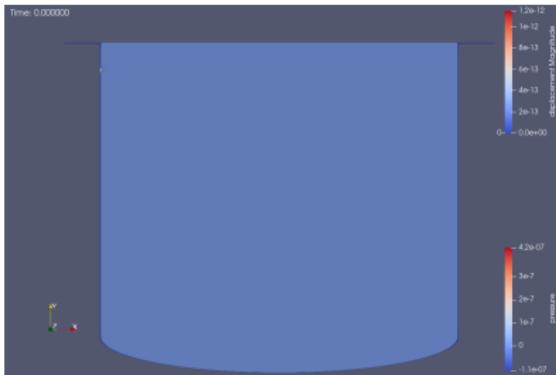


Figure: Comparaison entre le signal mesuré expérimentalement et le signal numérique avec amortissement au Capteur 1

Vidéos — couplage vibro-acoustique

Sur Γ_{fsi} , on voit le déplacement solide \mathbf{u}_s et la pression fluide p_f : l'impact se transmet immédiatement à la bonne zone et l'onde de pression se propage.



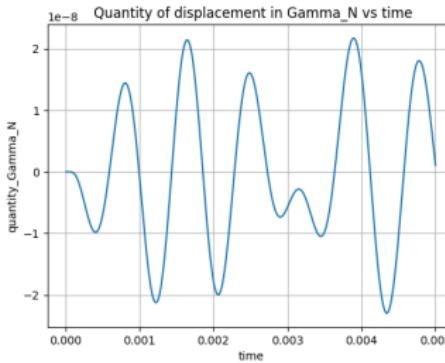
Champs visibles : déplacement \mathbf{u}_s et pression p_f projetés sur Γ_{fs} .

Résultats du code de couplage vibro-acoustique

Mesure intégrée sur Γ_N :

Quantité suivie (déplacement intégré) : $Q_{\Gamma_N}(t) = \int_{\Gamma_N} \|\mathbf{u}_s(\mathbf{x}, t)\| dS$

- ▶ Réponse oscillatoire après l'excitation appliquée sur Γ_N .
- ▶ Amplitude $\sim 10^{-8}$ m (cohérente avec l'ordre de grandeur attendu).
- ▶ Pour fréquence dominante/accélération : extraire des sondes nodales.



3D, P1G1 — évolution temporelle de $Q_{\Gamma_N}(t)$.

Benchmarking - Toolbox solide

Métriques

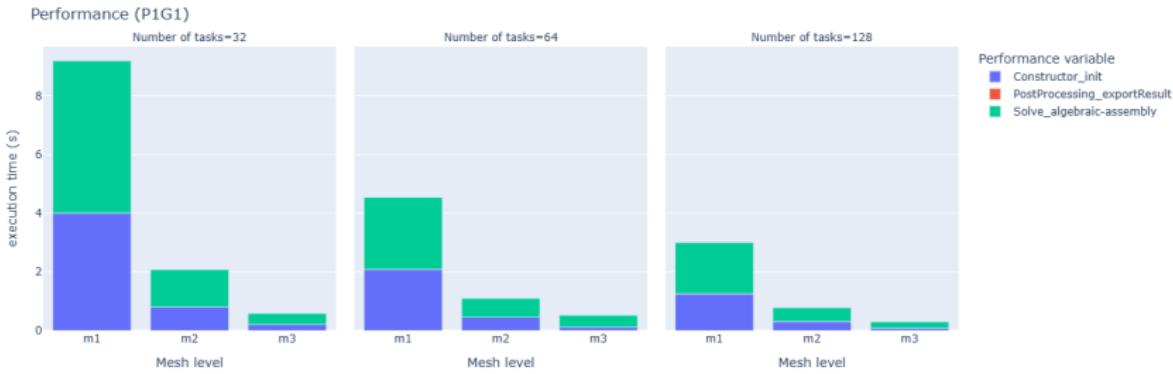
- ▶ Performance (temps brut)
- ▶ Relative performance (parts % des phases)

Phases mesurées : Initialisation, Résolution.

Décomposition des temps Pour le même problème, on fait varier le nombre de tâches.

Pour les maillages solides: $m1=3$ mm, $m2 =6$ mm, $m3=12$ mm.

Solve domine pour maillages fins; init faible.



$m1, m2, m3$ — parts relatives des phases.

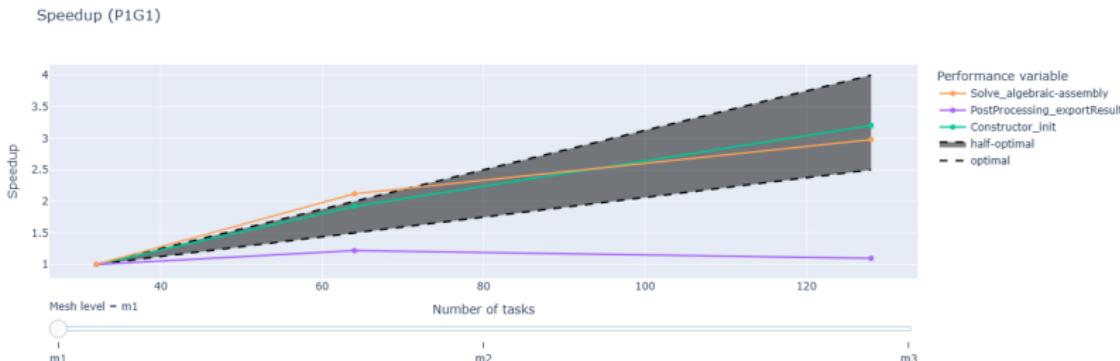
Speedup — Toolbox solide ($m1 = 3 \text{ mm}$)

Scalabilité forte

$$E_{\text{forte}}(p) = \frac{S(p)}{p} = \frac{T(1)}{p T(p)}$$

Speedup $S(p) = T(1)/T(p)$; idéal $S_{\text{opt}}(p) = p$, half-optimal $S_{\text{half}}(p) = p/2$

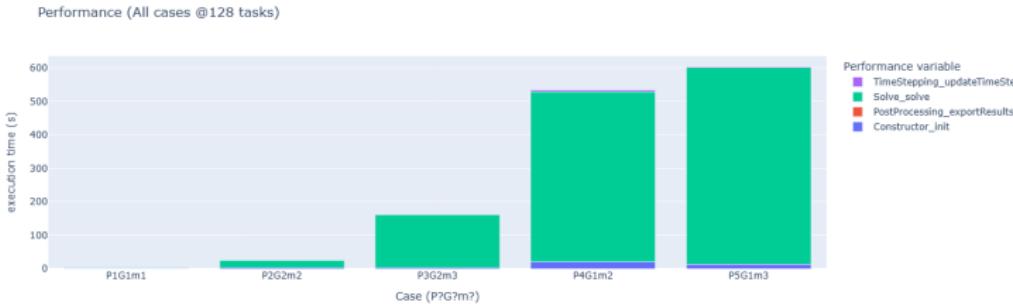
Gains utiles si $S(p) \geq p/2$; saturation = communications dominantes.



Maillage $m1$ (le plus fin) — accélération proche de la borne half-opt jusqu'à 128 tâches.

Effet de l'ordre de discréétisation (128 tâches)

- ▶ Temps de calcul \uparrow fortement avec P ($P4-P5 \gg P1-P2$).
- ▶ *Solve* domine le coût total.
- ▶ Coût non proportionnel aux DOF (ex.: **P4G1m2** 36.46M \rightarrow 508 s ; **P5G1m3** 17.87M \rightarrow 587 s).
- ▶ Coût / MDOF \uparrow avec $P \Rightarrow$ conditionnement plus difficile, plus d'itérations.

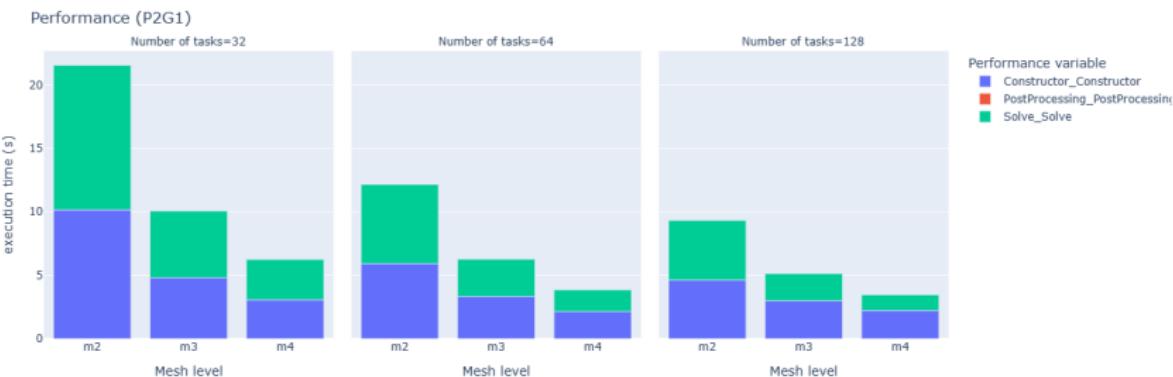


Performance des simulations selon l'ordre (128 tâches).

Benchmarking couplage vibro-acoustique - élasticité

3D P2G1 — décomposition des temps

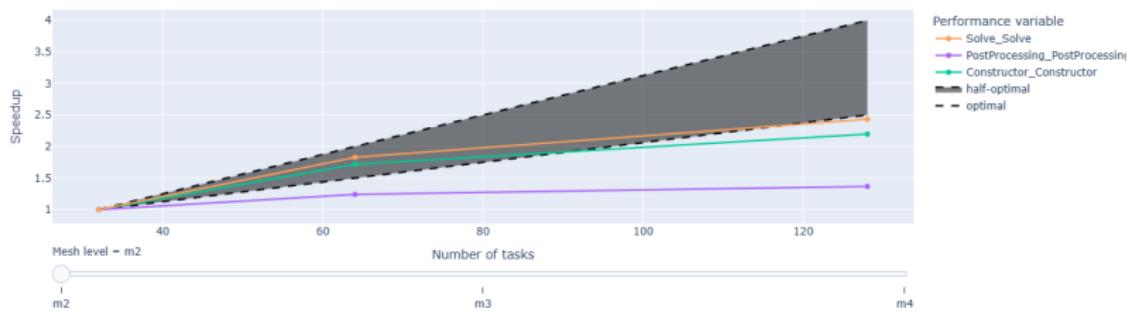
Pour le même problème, on fait varier le nombre de tâches. Solve surclasse le reste ; Constructor progresse correctement avec p .



P2G1 (3D) — Speedup sur m2

- ▶ Scalabilité meilleure que P1 : plus de calcul par élément \Rightarrow meilleure efficacité parallèle.
- ▶ Courbes proches de la borne idéale jusqu'à 128 tâches.

Speedup (P2G1)



Limites actuelles : élasticité encore implicite

Pistes de travail

1. SEM explicite

- ▶ Quadratures **GLL**, éléments **haut ordre** ($P, G > 5$), **masse diagonale** (M^{-1} point-à-point).

2. Couplage complet

- ▶ **ALE** côté fluide.
- ▶ Intégrer un **amortissement** (Rayleigh α, β issus des mesures).

Conclusions

- ▶ **Précision vs coût** : la propagation d'ondes est mieux capturée en augmentant l'ordre **polynomial (P)** et **géométrique (G)** qu'en diminuant h uniquement ⇒ orientation claire vers une implémentation **SEM**.
- ▶ **Travail réalisé**
 - ▶ *Benchmark* avec la toolbox **Solid** (multiples configs, scripts Python de post-traitement).
 - ▶ Début d'une implémentation C++ **explicite** orientée-objet pour le vibro-acoustique.
- ▶ **Retour d'expérience** : gestion et traçabilité de nombreuses simulations, rythme régulier (réunions), équilibre autonomie/échanges.
- ▶ **Améliorations perso/projet** : meilleure estimation du temps et cadrage de la communication., prioriser *qualité & reproductibilité* plutôt que volume.

- ▶ **Encadrement scientifique** : merci à mes encadrants pour leurs conseils, retours et disponibilité.
- ▶ **Partenaires** : AVNIR Energy, SONORHC, Cemosis
- ▶ **Échanges** : collègues et stagiaires pour les discussions techniques et le partage d'outils.

Merci pour votre attention !

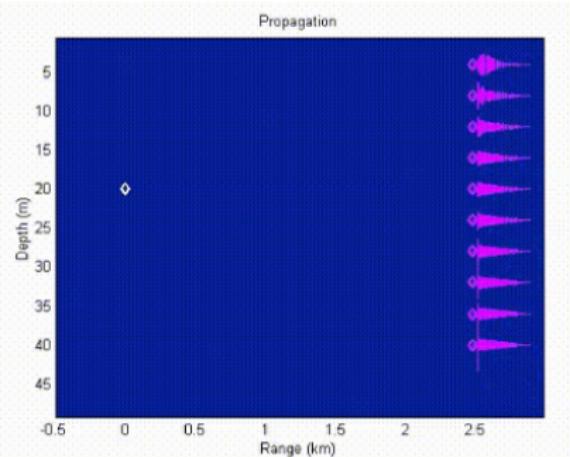
-  Semblat, J. F., & Dangla, P. (2005). Modélisation de la propagation d'ondes et de l'interaction sol-structure: approches par éléments finis et éléments de frontière. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, (256–257), 163–178.
-  C. Canuto, M.Y. Hussaini, A. Quarteroni, and T.A. Zang. *Spectral Methods: Evolution to Complex Geometries and Applications to Fluid Dynamics*. Springer, 2007.
-  Smith, W. D. (1975). The application of finite element analysis to body wave propagation problems. *Geophysical Journal International*, 42(2), 747–768.
-  O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, and J.Z. Zhu. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Butterworth-Heinemann, 7th ed., 2013.
-  S. Krenk (2005). Energy conservation in Newmark based time integration algorithms. HAL Science.
-  Feel++ Benchmarking Documentation. <https://bench.feelpp.org/benchmarking>. Consulté en août 2025.
-  V. Chabannes (2013). Vers la simulation des écoulements sanguins. Médecine humaine et pathologie. Université de Grenoble. Français. (NNT : 2013GRENM061). (tel-00923731v2)

Retournement temporel — démos vidéo

Démonstrations du phénomène du retournement temporel:



Démonstration en bassin



Retournement temporel numérique