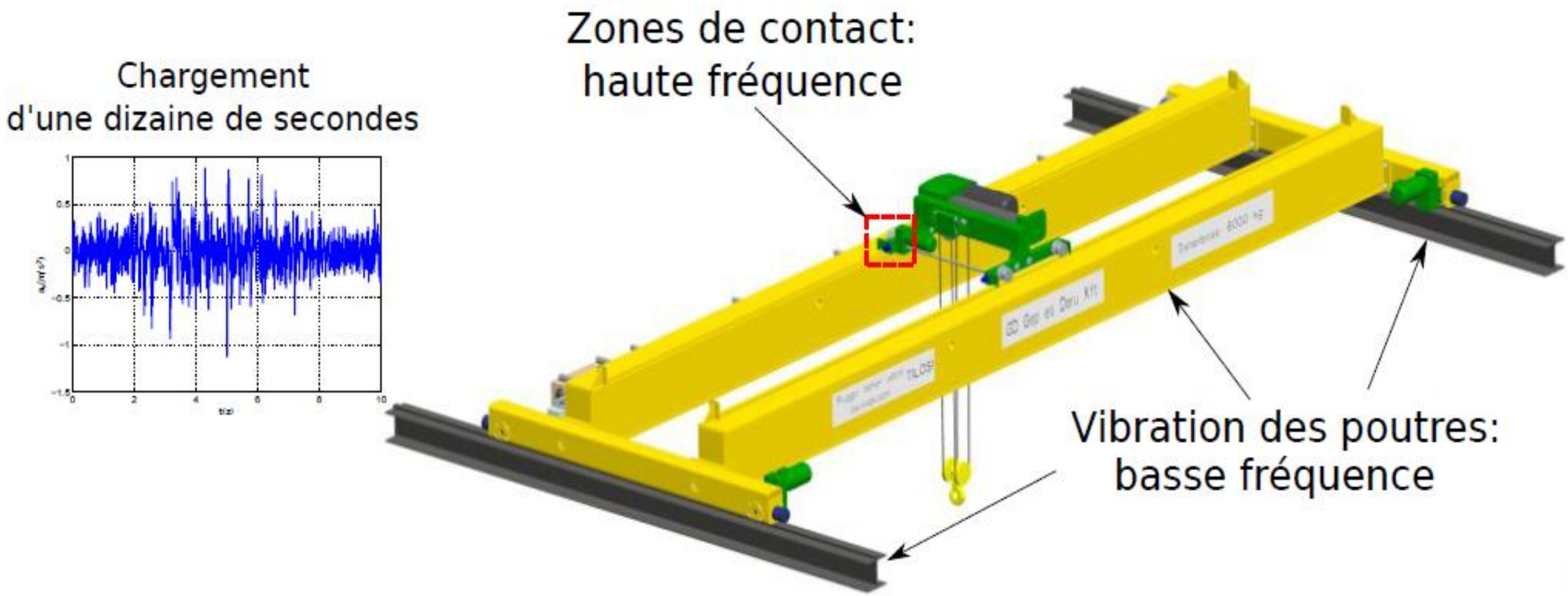
«Co-simulation explicite/implicite pour la tenue d'un pont roulant sous séisme»

Présentée par Michaël BRUN (INSA-Lyon,GEOMAS)
Fatima FEKAK (CETIM/LaMCoS), Anthony GRAVOUIL (INSA-Lyon, LaMCoS),
Bruno DEPALE (CETIM)
Florent DE MARTIN (BRGM)
Irini DJERAN-MAIGRE (INSA-Lyon, GEOMAS)

Co-simulation

Pont roulant sous séisme : problème multi-contact et multi-échelle en temps et en espace



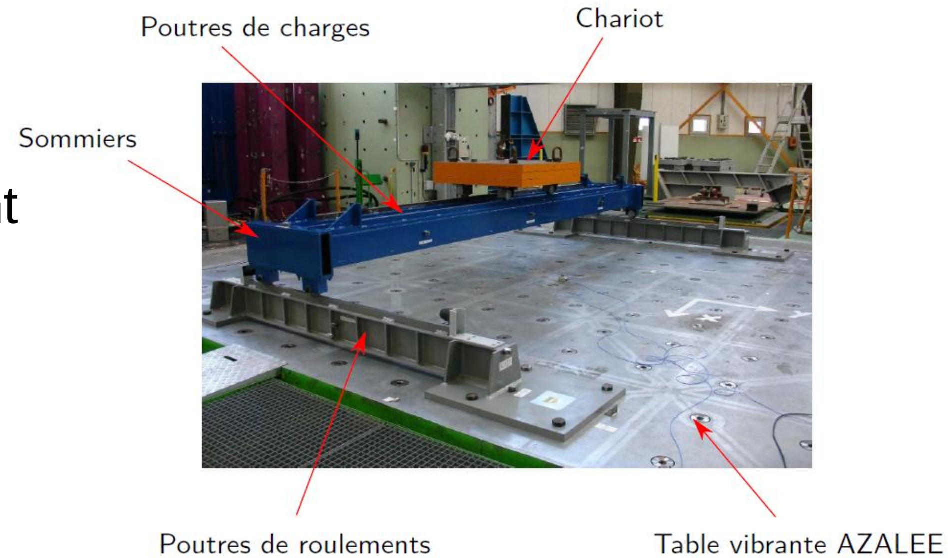
Approche explicite pure : condition CFL pour l'ensemble du maillage

➢ Décomposition de domaines et méthode HATI (Hybrid Asynchronous Time Integrator) pour la mise en place de co-simulation explicite/implicite multi pas de temps

Co-simulation

Test sur la table vibrante

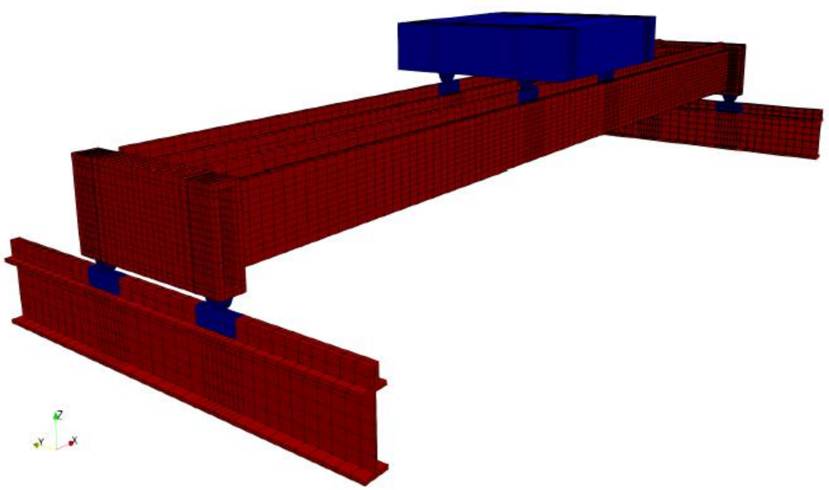
AZALEE (CEA): maquette de pont roulant à l'échelle 1/5 (4.15 t)



- Modélisation avec des EF 3D (gmsh)

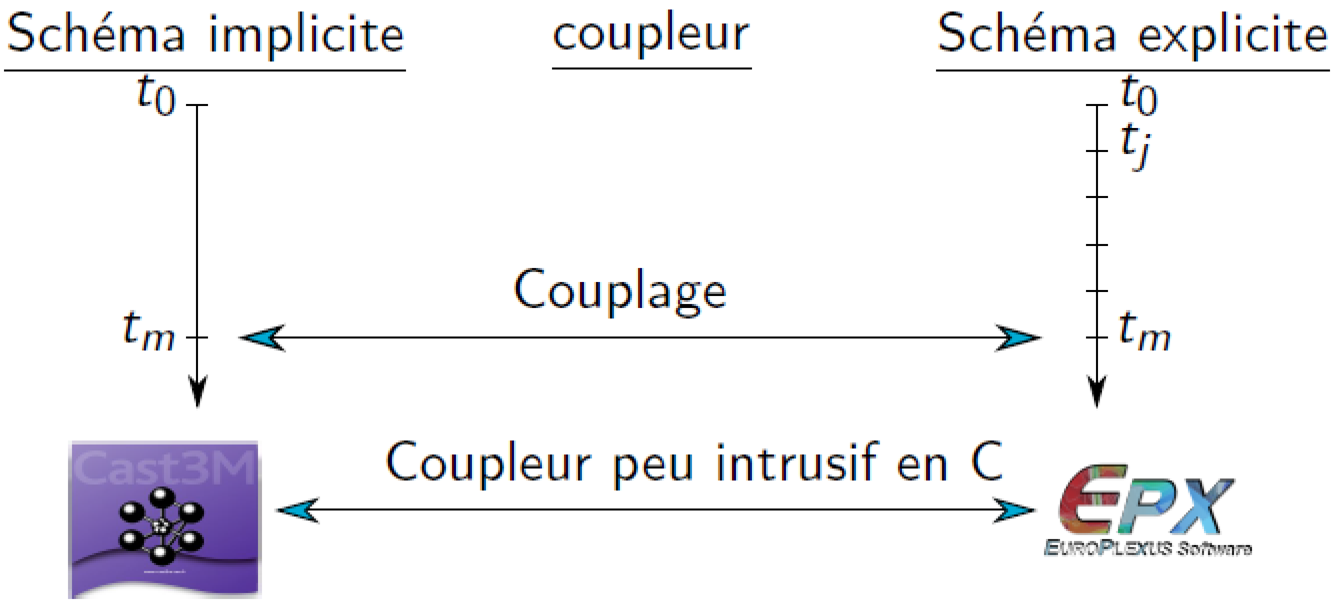
-Décomposition en deux sous domaines : explicite Europlexus (bleu) avec zones de contact galet/rail, implicite CAST3M (rouge)

-Rapport entre les pas de temps : m=100



Co-simulation

Mise en place de la co-simulation EPX/CAST3M



-CAST3M : code EF implicite, solveur, flexibilité pour tester différents schémas d'intégration temporelle

-EUROPLEXUS : code EF explicite, contacts traités via des multiplicateurs de Lagrange avec une détection par la méthode des PINBALLs

-Coupleur de code : programmé en C, communication entre les codes via des pipes (FIFO)

Algorithme de contact

Formulation variationnelle espace-temps à 3 champs [Cirak, West 2005]: intégration d'action avec un impact à un instant tc (conditions de contact via Multiplicateur de Lagrange) :

$$\tilde{A}(\mathbf{U}(t), t_c, \lambda) = \int_{t_0}^{t_c} L(\mathbf{U}(t), \dot{\mathbf{U}}(t))\,\mathrm{d}t + \int_{t_c}^{t_f} L(\mathbf{U}(t), \dot{\mathbf{U}}(t))\,\mathrm{d}t$$

$$+ \lambda^T(t_c)\mathbf{g}_N(t_c)$$

avec le Lagrangien discrétisé par éléments finis :

$$L(\mathbf{U}(t), \dot{\mathbf{U}}(t)) = \frac{1}{2}\dot{\mathbf{U}}(t)^T \mathbf{M}\dot{\mathbf{U}}(t) - (\mathbf{V}_{int}(\mathbf{U}(t)) - \mathbf{V}_{ext}(\mathbf{U}(t))$$

Stationnarité de l'intégrale d'action donne les relations suivantes :

<u>Dynamique régulière</u> $(\delta\mathbf{U})$: $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{F}_{int}(t) = \mathbf{F}_{ext}(t), \ \forall t \in [t_0, t_c^-] \cup [t_c^+, t_f]$

<u>Équation d'impact</u> (δt_c) : $\left[\mathbf{M}\dot{\mathbf{U}}(t)\right]_{t_c^-}^{t_c^+} = \nabla \mathbf{g}_N^T(t_c)\lambda(t_c)$

Algorithme de contact

Décomposition de la différentielle de la vitesse en une partie régulière et une partie irrégulière [Moreau 1999], [Acary 2014, 2016] :

$$d\dot{\mathbf{U}} = d\dot{\mathbf{U}}_s + d\dot{\mathbf{U}}_{ns}$$

avec

$$d\dot{\mathbf{U}}_s = \ddot{\mathbf{U}}dt$$
$$d\dot{\mathbf{U}}_{ns} = \dot{\mathbf{U}}(t_c^+) - \dot{\mathbf{U}}(t_c^-)$$

➢Une seule équation pour la dynamique régulière et irrégulière :

$$\mathbf{M}d\dot{\mathbf{U}} + (\mathbf{F}_{int} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}})dt = \mathbf{F}_{ext}dt + d\mathbf{I}$$

avec

$$d\mathbf{I}(t) = \begin{cases} 0 & \forall t \in [t_0, t_c^-] \cup [t_c^+, t_f] \\ \mathbf{L}^T(t_c)\lambda(t_c) & \end{cases}$$

$\mathbf{L} = \nabla \mathbf{g}_N$: opérateur de restriction de l'ensemble des ddls vers les ddls impliqués dans l'impact

➢Discrétisation temporelle par le schéma des différences centrées en intégrant l'équation dans l'intervalle de temps entre t_n+1/2 et t_n+3/2

Algorithme de contact

Schéma de la différence centrée avec impact [Fatima, Brun, Gravouil 2017] formulé en vitesse-impulsion :

$$\mathbf{M}_{lump}\dot{\mathbf{U}}_{n+\frac{3}{2}} = \mathbf{M}_{lump}\dot{\mathbf{U}}_{n+\frac{1}{2}} + \Delta t(\mathbf{F}_{ext,n+1} - \mathbf{F}_{int,n+1} - \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}_{n+\frac{1}{2}}) + \mathbf{I}_{n+1}$$

$$\mathbf{U}_{n+1} = \mathbf{U}_n + \Delta t\dot{\mathbf{U}}_{n+\frac{1}{2}}$$

$$\mathbf{I}_{n+1} = \mathbf{L}_{n+1}^T\lambda_{n+\frac{3}{2}}$$

$$\mathbf{v}_{n+\frac{3}{2}} = \mathbf{L}_{n+1}\dot{\mathbf{U}}_{n+\frac{3}{2}}$$

$$\begin{cases} \text{si } g_N^l(t_{n+1}) > 0 \text{ alors } \lambda^l_{n+\frac{3}{2}} = 0 \\ \text{si } g_N^l(t_{n+1}) \leq 0 \text{ alors} \begin{cases} v^l_{n+\frac{3}{2}} \geq 0 \\ \lambda^l_{n+\frac{3}{2}} \geq 0 \\ v^l_{n+\frac{3}{2}}\lambda^l_{n+\frac{3}{2}} = 0 \end{cases} \end{cases} \qquad \forall l \in \{1, ..., p\}$$

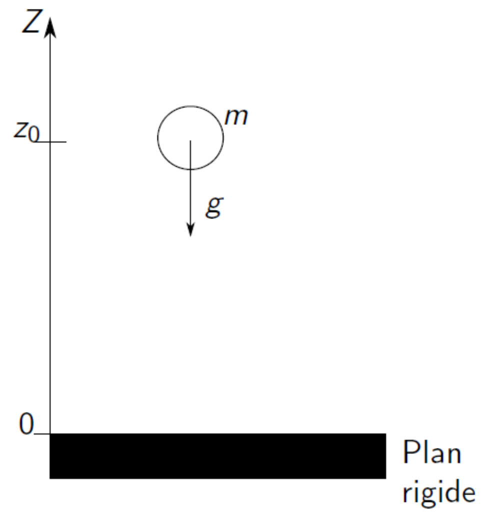
avec une équation à l'interface pour calculer les multiplicateurs en l'instant t_n+3/2 :

$$\left(\mathbf{L}_{n+1}\mathbf{M}_{lump}^{-1}\mathbf{L}_{n+1}^T\right)\lambda_{n+\frac{3}{2}} = \mathbf{b}$$

$$\mathbf{b} = \mathbf{v}_{n+\frac{3}{2}} - \mathbf{L}_{n+1}(\dot{\mathbf{U}}_{n+\frac{1}{2}} + \Delta t\mathbf{M}_{lump}^{-1}(\mathbf{F}_{ext,n+1} - \mathbf{F}_{int,n+1} - \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}_{n+\frac{1}{2}}))$$

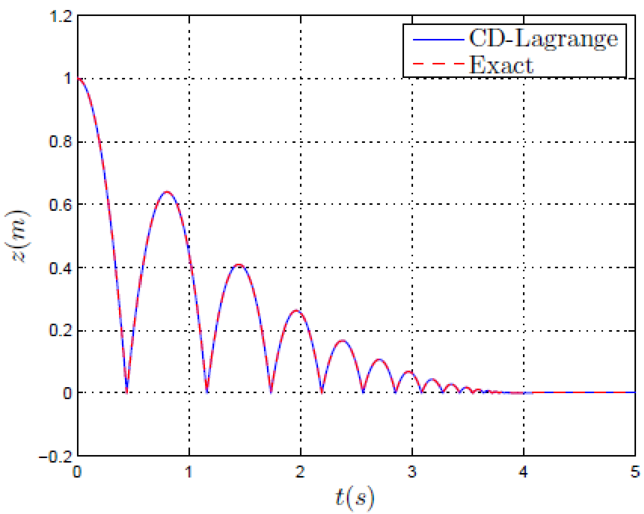
Validation de l'algorithme de contact

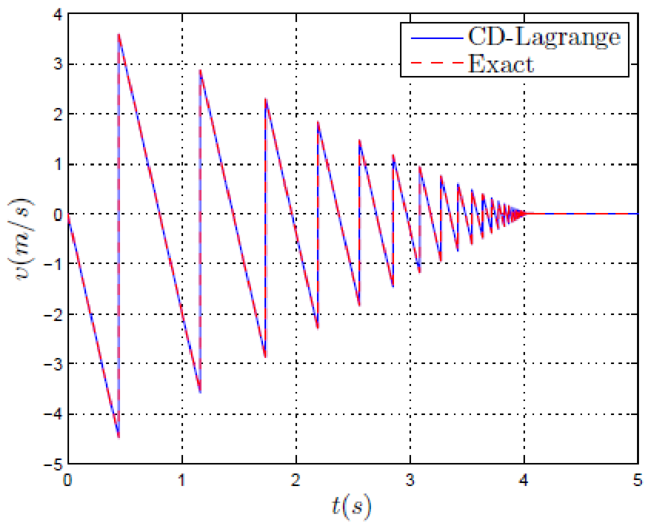
Test de ZENO : balle qui rebondit sur un sol rigide avec un coefficient de restitution $0 < e < 1$ (test avec $e=0.8$)



➢Infinité de rebonds de la balle avant de s'arrêter un temps T fini donné par :

$$T = t_0 \frac{1+e}{1-e} \qquad t_0 = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

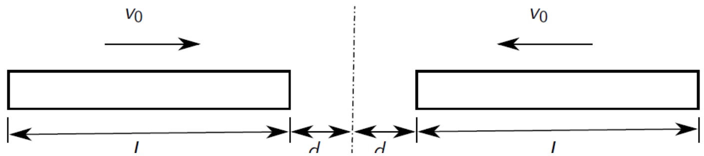


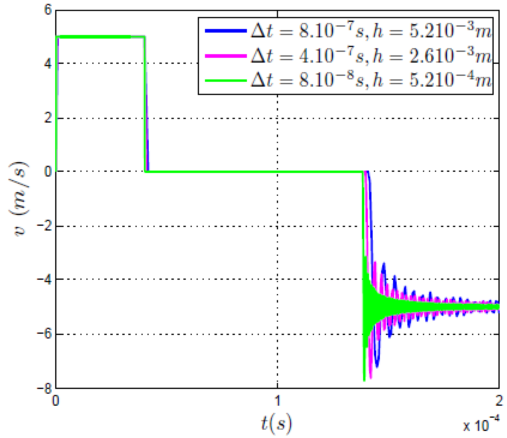


➢Test de ZENO bien reproduit : la balle s'arrête en un instant T_numérique de 4.01 s (4.02 s théorique)

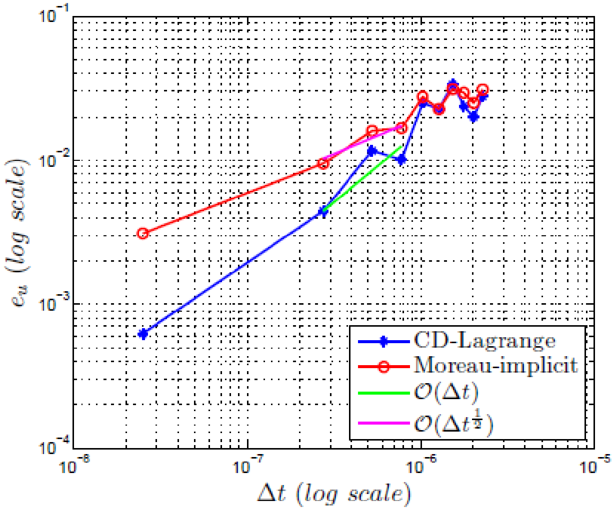
Validation de l'algorithme de contact

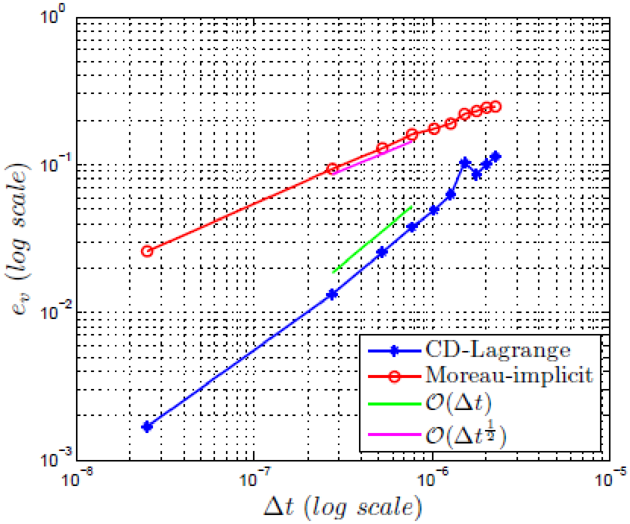
Test de 2 barres déformables :





Convergence espace-temps en déplacement et en vitesse (au sens de Hausdorff, [Acary 2012]) après séparation des barres



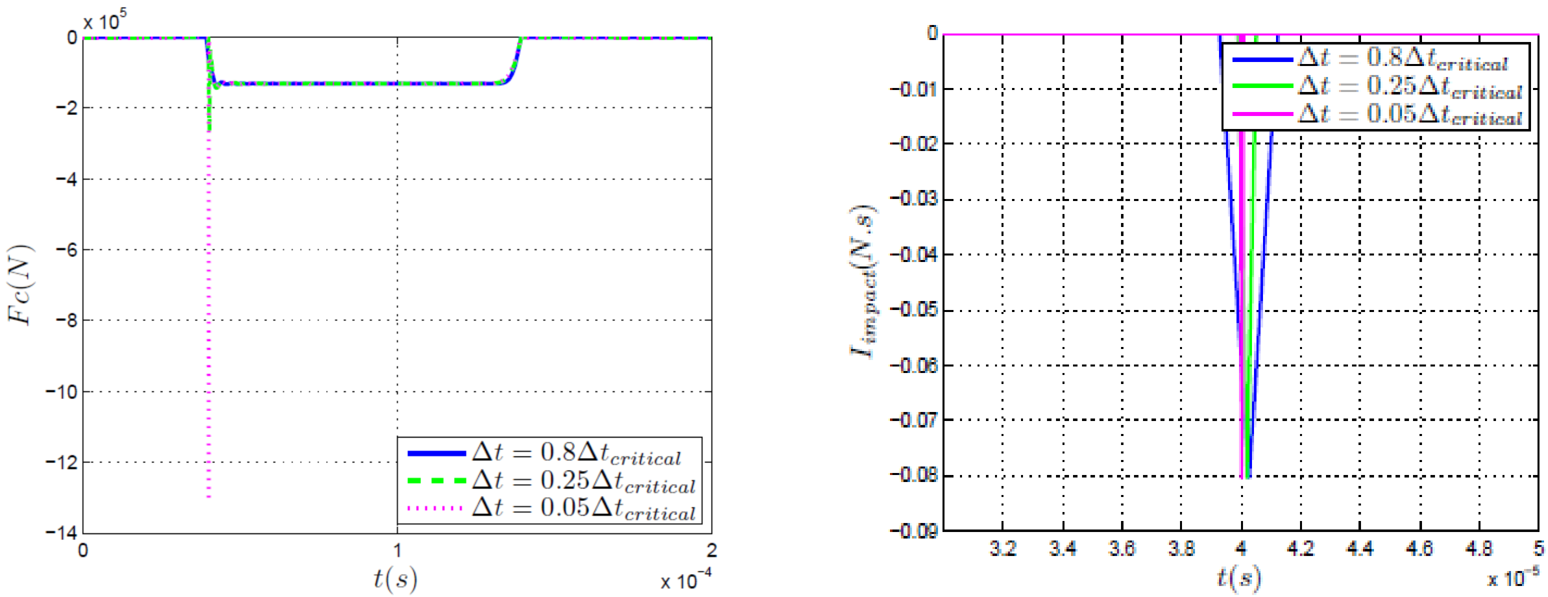


➢Convergence ordre 1 par rapport à 1/2 pour le schéma de Moreau implicite

Validation de l'algorithme de contact

Test de 2 barres déformables :

Force de contact (impact/contact) et impulsion pour des pas de temps décroissants :



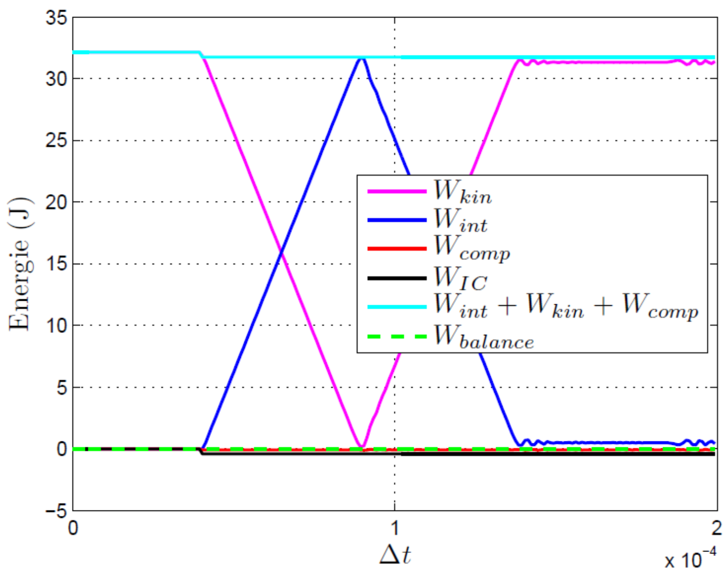
- A l'impact (premier pas de temps du contact), la force d'impact augmente si le pas de temps décroit (diverge). Par contre, l'impulsion converge.
- Au cours du contact régulier, la force de contact peut être définie (ainsi que l'accélération)

Validation de l’algorithme de contact

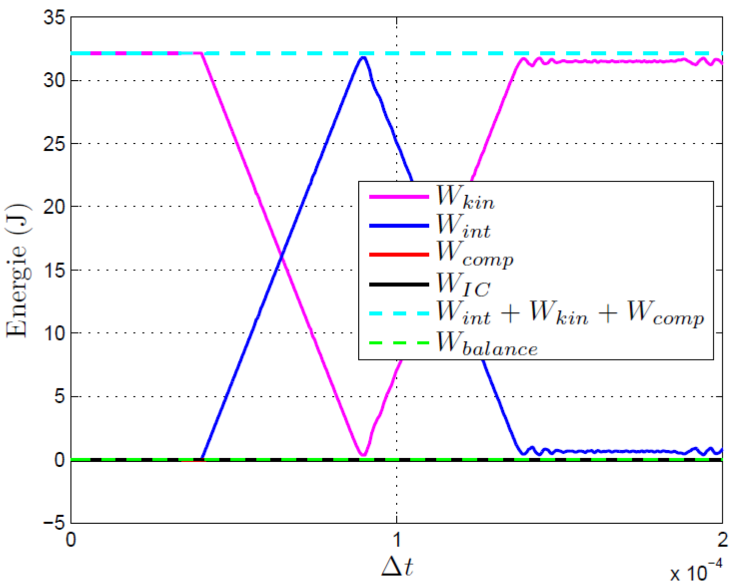
Test de 2 barres déformables :

Bilan énergétique

Maillage uniforme



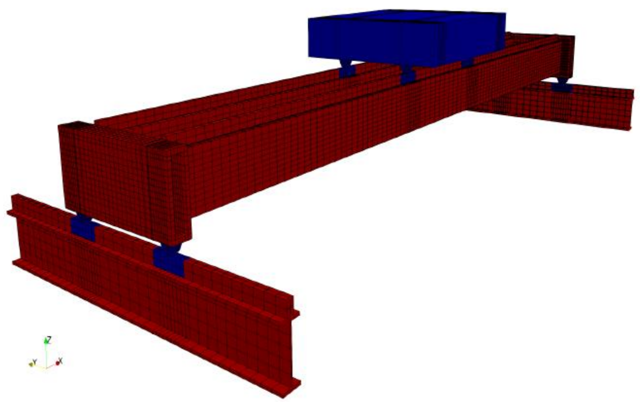
Maillage raffiné au point de contact

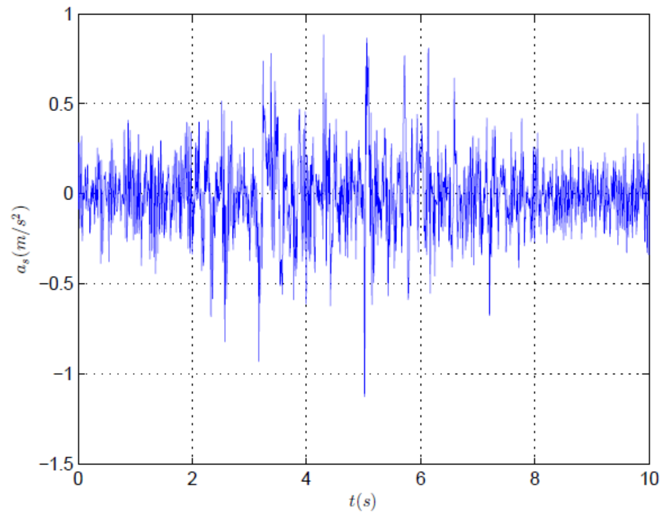


- Légère dissipation d’énergie au cours de l’impact (premier pas de temps)
- On peut la limiter en raffinant le maillage autour du point d’impact

Co-simulation

Couplage EUROPLEXUS/CAST3M avec un rapport de 100 entre les deux échelles de temps : calcul poids propre et accélération verticale imposée



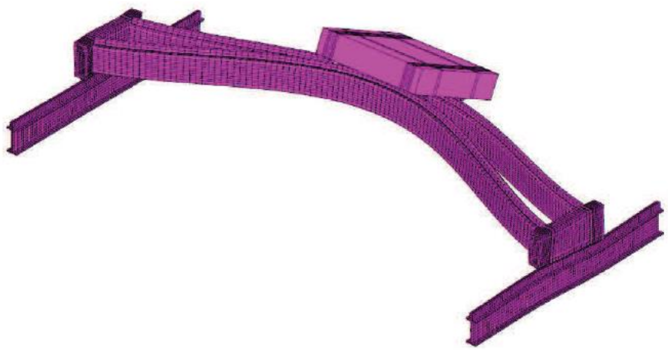


	SD explicite	SD implicite	Interface
ddl	5088	70344	1296
Pas de temps	10^{-6} s	$100*10^{-6}$ s	–

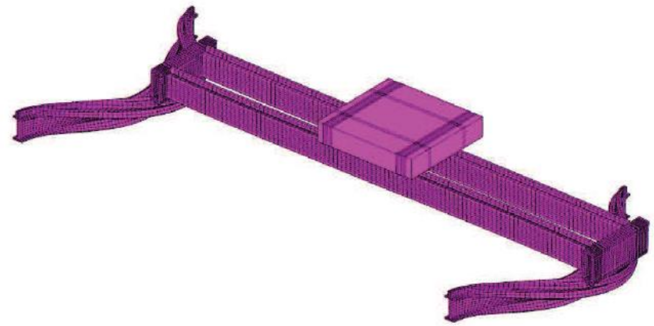
Co-simulation

Analyse modale et comparaison avec les fréquences propres identifiées sous faibles excitations

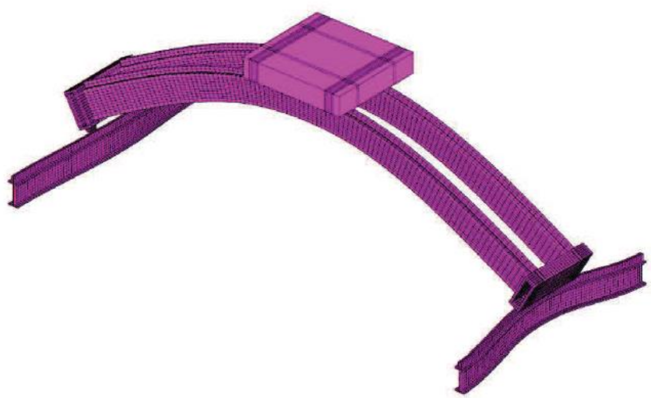
Mode	Direction	Fréquence propre (Hz)	Masse modale effective (%)
1	x	9.5	98
2	y	9.5	73
3	z	13	86



(a) Mode suivant y : 9.7 Hz, 73 %



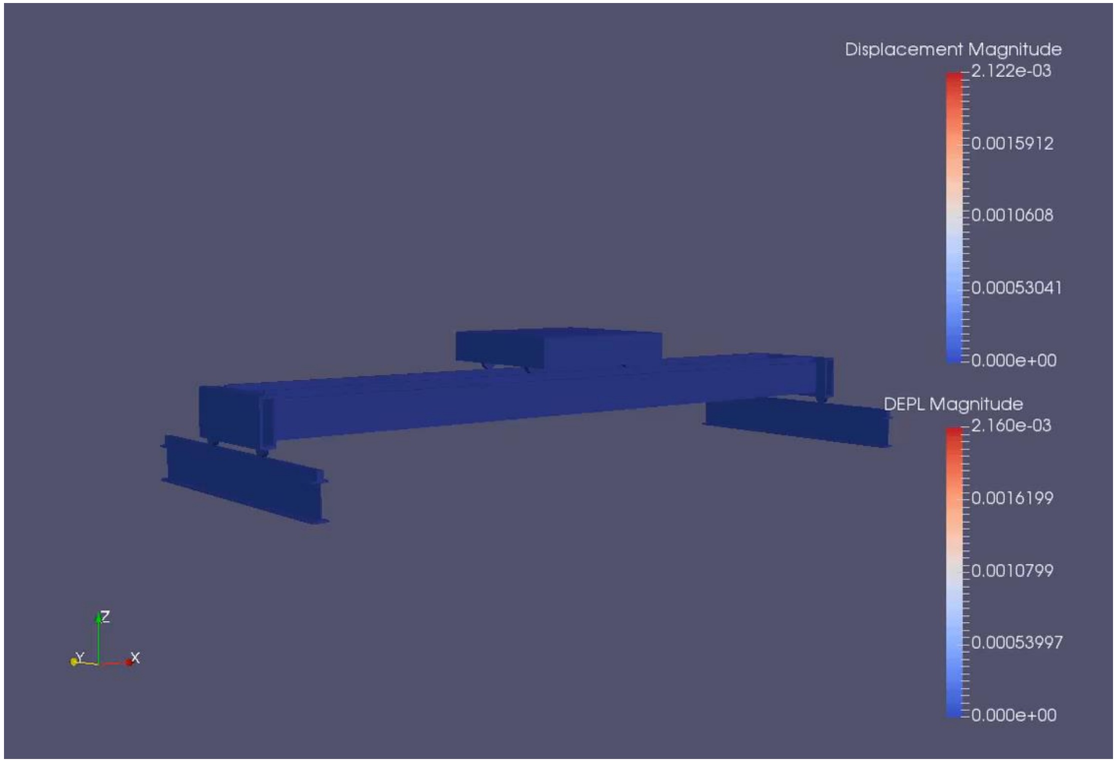
(b) Mode suivant x : 9.3 Hz, 97 %

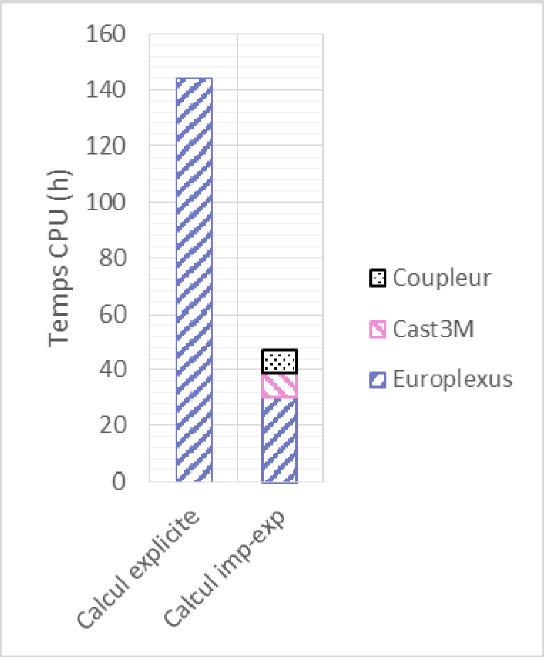


(c) Mode suivant z : 14 Hz, 82 %

Co-simulation

Réponse temporelle (excitation sismique 10 s) et temps de calcul

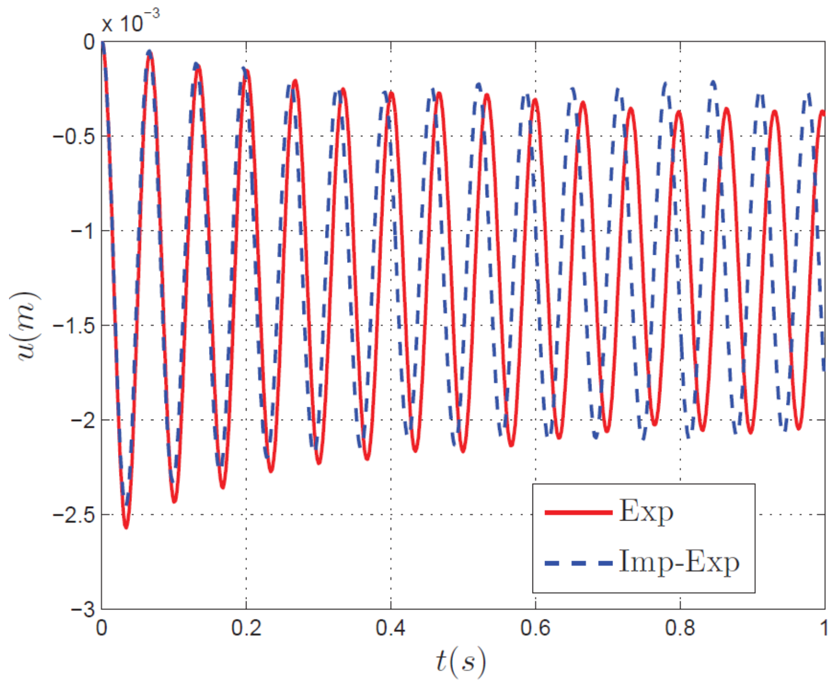


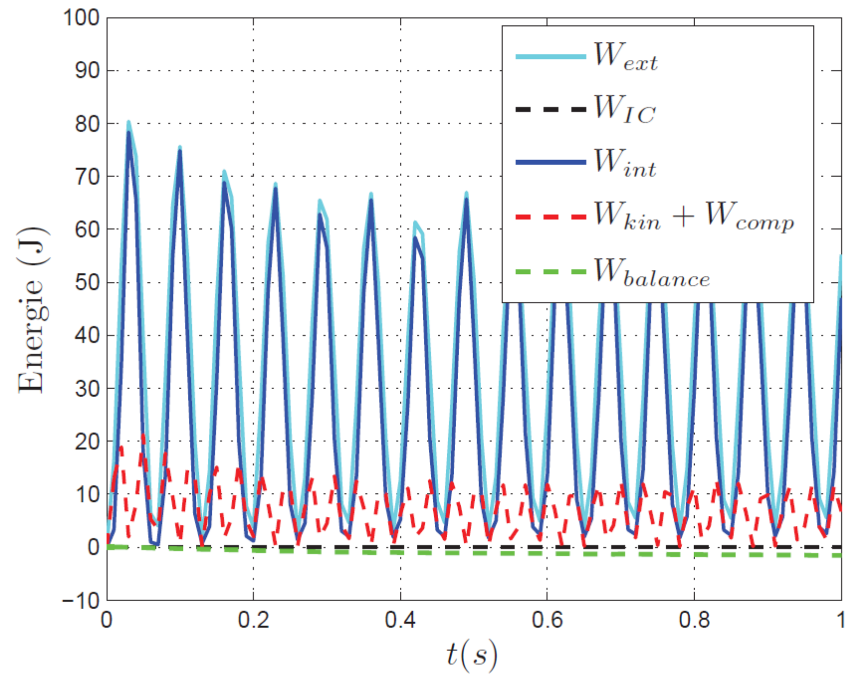


➢Réduction des temps de calcul d'un facteur 3

Co-simulation

Réponse temporelle (au milieu des poutres de chargement) et balance énergétique

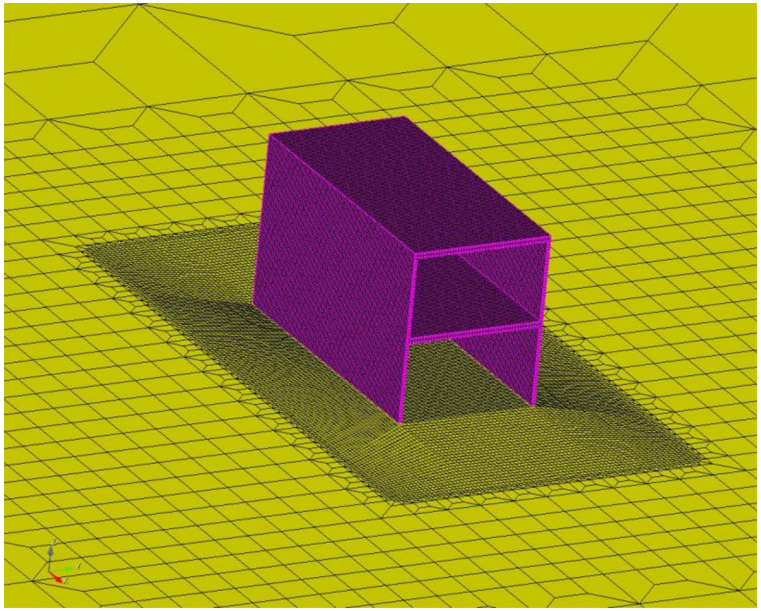


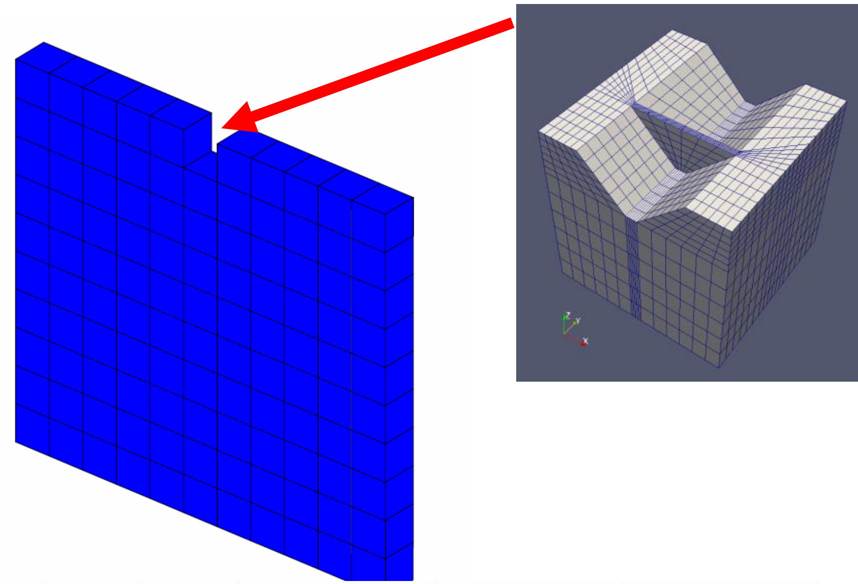


- Réponse très proche du calcul de référence (grandeurs d'intérêt bien reproduites) mais léger décalage en fréquence (non observé sur calculs Matlab en HPP) - > grands déplacements par défaut d'EPX ?
- Energie dissipée dans le contact reste limitée

Co-simulation pour l’ISS

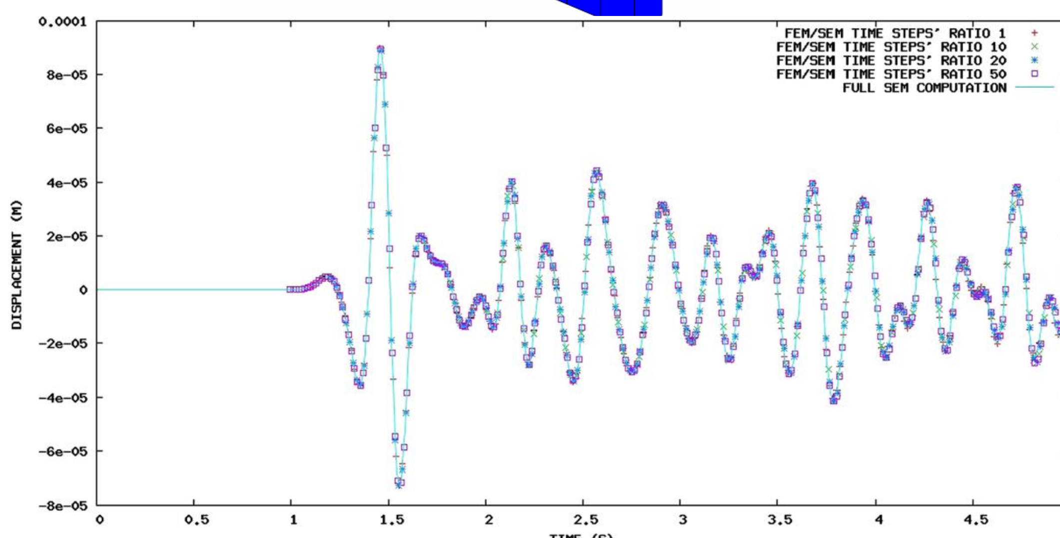
Interaction sol/structure : mise en place d’un couplage entre un code aux éléments spectraux, EFISPEC3D (BRGM, Florent de Martin), et code_Aster





Couplage EFISPEC3D/ code_Aster (méthode mortar) [Zuchowski, Brun, De Martin 2018]

En cours de publication : Couplage EFISPEC3D / Akantu (EPFL)

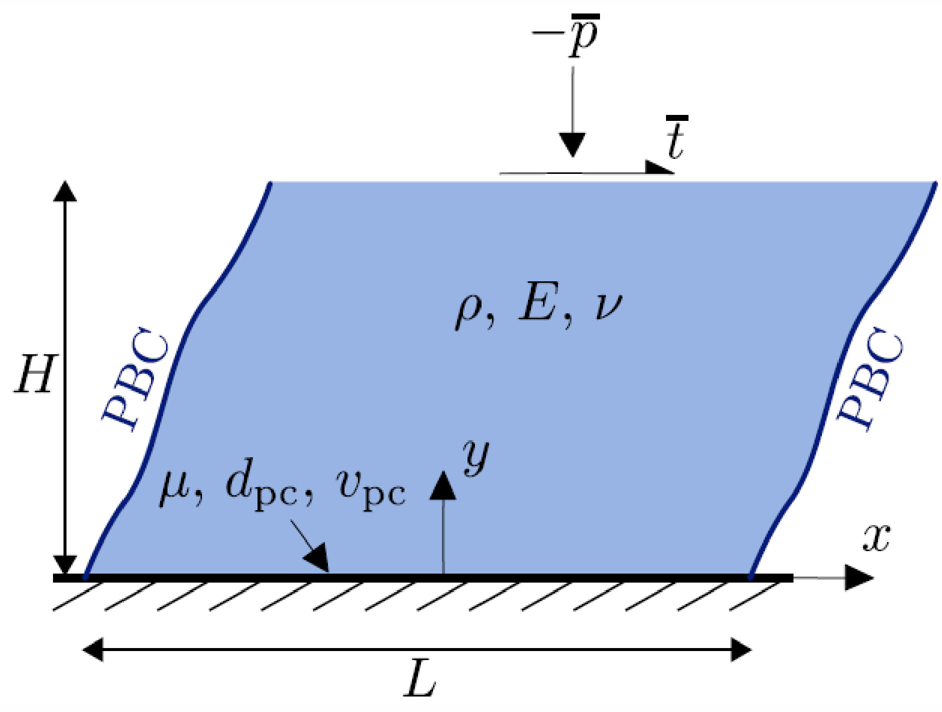


HATI milieux infinis: HA-PML

Extension de l'algorithme de contact au contact-frottant et introduction PML (Perfectly Matched Layers) pour traiter les milieux infinis suivant les méthodes HATI

Test solide déformable, comprimé et cisaillé

Introduction d'une zone de nucléation à l'interface pour générer un glissement [Kammer et al. 2014]

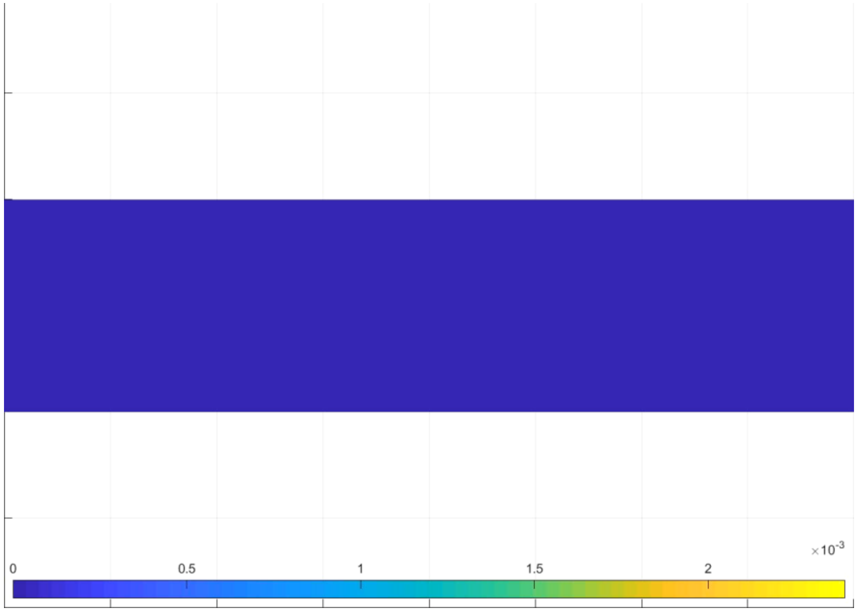


HATI milieux infinis: HA-PML

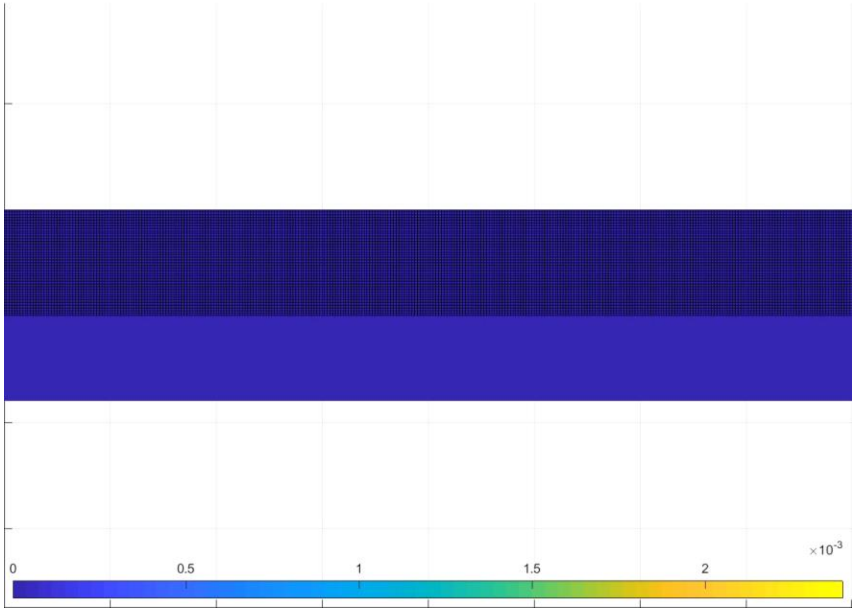
PML dans le cadre de la FEM de Basu et Chopra [Basu et al, 2003, 2004, 2008] : PMLs de LS-DYNA et DIANA

HATI: zone de contact frottant en explicite et PML en implicite, potentiellement grand pas de temps

Contact frottant sans PML



Contact frottant avec PML



Conclusion

➢Algorithme de contact frottant en vitesse-impulsion pour la dynamique non-régulière : différence centrée, conditions de contact et de frottement exprimées en vitesse via des multiplicateurs de Lagrange

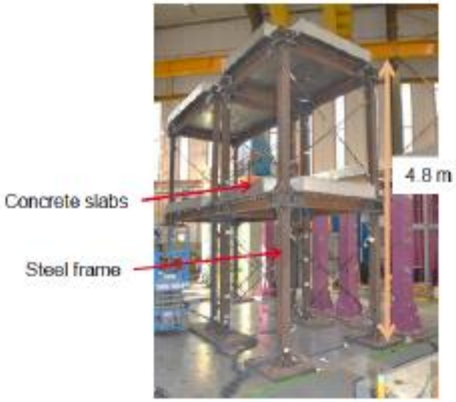
➢Validation de la co-simulation EUROPLEXUS/CAST3M pour la tenue des ponts roulants au séisme avec des rapports entre les échelles de temps de 100

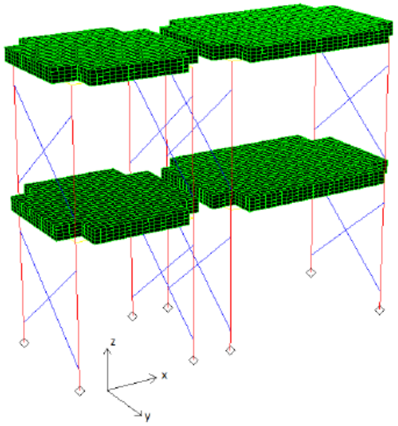
➢Recalage avec les essais :

-Fréquences propres et déformées modales conformes aux tests

-Calcul de contact avec l’utilisation des PINBALLS : nécessité de prendre en compte le frottement

➢Simulation EPX pour l’entrechoquement entre bâtiments (thèse José Ambiel - EDF)





Bilbiographie

[Acary, 2012] Acary, V. (2012). Higher order event capturing time-stepping schemes for nonsmooth multibody systems with unilateral constraints and impacts. *Applied Numerical Mathematics*, 62(10) :1259–1275.

[Acary, 2016] Acary, V. (2016). Energy conservation and dissipation properties of time-integration methods for nonsmooth elastodynamics with contact. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 96 :585–603.

[ASN, 2006] ASN (2006). *Prise en compte du risque sismique à la conception des ouvrages de génie civil d'installations nucléaires de base à l'exception des stockages à long terme des déchets radioactifs.*

[Belytschko et al., 2000] Belytschko, T., Liu, W., and Moran, B. (2000). *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures.* John Wiley and Sons.

[Brun et al., 2015] Brun, M., Gravouil, A., Combescure, A., and Limam, A. (2015). Two feti-based heterogeneous time step coupling methods for newmark and α-schemes derived from the energy method.

Bilbiographie

Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 283 :130–176.

[Casadei, 2002] Casadei, F. (2002). A hierarchic pinball method for contact-impact in fast transient dynamics. In *VI Congresso Nazionale della Società Italiana di Matematica Applicata e Industriale (SIMAI 2002), Chia (Cagliari), Italy*, pages 27–31.

[Chantrait et al., 2014] Chantrait, T., Rannou, J., and Gravouil, A. (2014). Low intrusive coupling of implicit and explicit time integration schemes for structural dynamics : Application to low energy impacts on composite structures. *Finite Elements in Analysis and Design*, 86 :23–33.

[Chen et al., 2013] Chen, Q. Z., Acary, V., Virlez, G., and Brüls, O. (2013). A nonsmooth generalized-α scheme for flexible multibody systems with unilateral constraints. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 96(8) :487–511.

[Cirak and West, 2005] Cirak, F. and West, M. (2005). Decomposition contact response (dcr) for explicit finite element dynamics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 64(8) :1078–1110.

Bilbiographie

[Combescure and Gravouil, 2001] Combescure, A. and Gravouil, A. (2001). A time-space multi-scale algorithm for transient structural nonlinear problems. *Mécanique & Industries*, 2(1) :43–55.

[EDF, 2004] EDF (2004). *Cahier des Règles Techniques-Compléments relatifs aux calculs mécaniques des engins de levage haute sécurité*.

[Géradin and Rixen, 2014] Géradin, M. and Rixen, D. J. (2014). *Mechanical Vibrations : Theory and Application to Structural Dynamics*. John Wiley & Sons.

[Gravouil and Combescure, 2001] Gravouil, A. and Combescure, A. (2001). Multi-time-step explicit–implicit method for non-linear structural dynamics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 50(1) :199–225.

[Gravouil et al., 2015] Gravouil, A., Combescure, A., and Brun, M. (2015). Heterogeneous asynchronous time integrators for computational structural dynamics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 102(3-4) :202–232.

Bilbiographie

[Jean, 1999] Jean, M. (1999). The non-smooth contact dynamics method. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 177(3) :235–257.

[Moreau, 1978] Moreau, J. J. (1978). Approximation en graphe d'une évolution discontinue. *RAIRO-Analyse Numérique*, 12(1) :75–84.

[Moreau, 1999] Moreau, J. J. (1999). Numerical aspects of the sweeping process. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 177(3) :329–349.

[Piron, 1986] Piron, G. (1986). *Du calcul sismique des engins de levage*.

[Schindler and Acary, 2014] Schindler, T. and Acary, V. (2014). Timestepping schemes for nonsmooth dynamics based on discontinuous Galerkin methods : definition and outlook. *Mathematics and Computers in Simulation*, 95 :180–199.