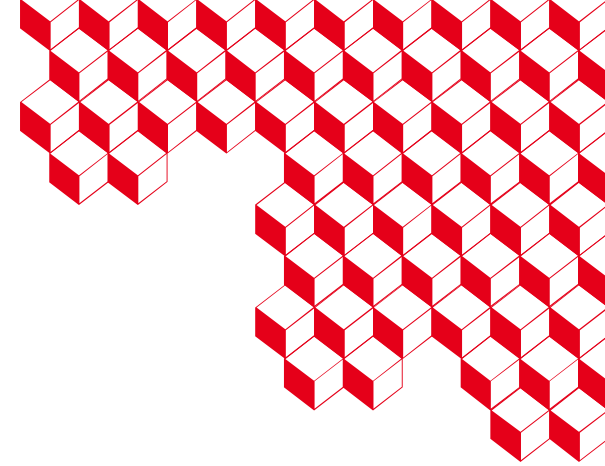


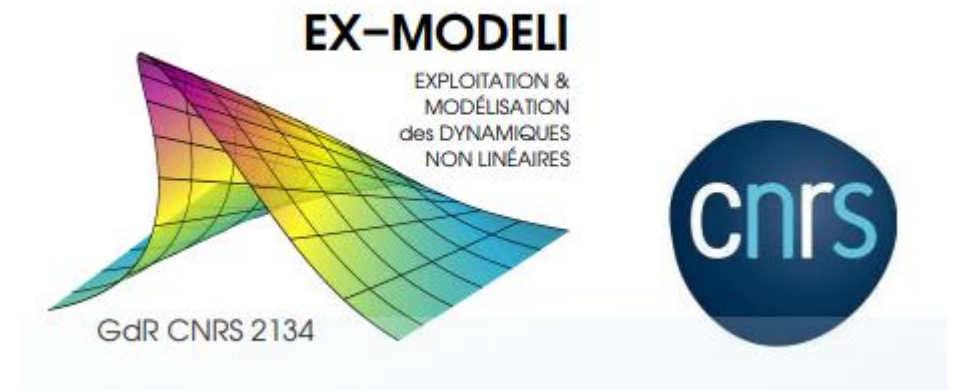


Simulations vibratoires non linéaires au service de la dissuasion nucléaire

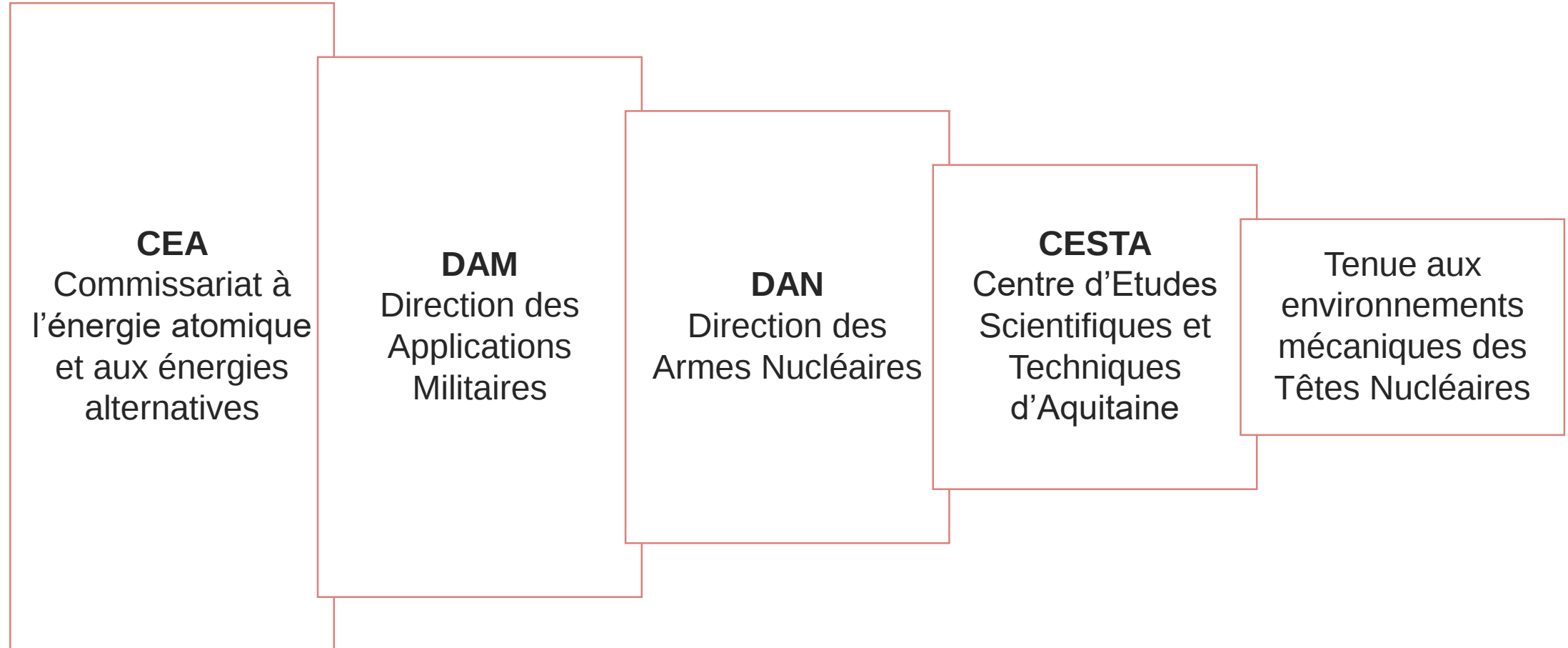
Maxence Claeys et Sébastien Talik

CEA/CESTA/DACG

17 octobre 2025



1 – Contexte des travaux



Le CEA, grand organisme public de recherche

Quatre directions opérationnelles

Direction des Applications Militaires



5 000

Salariés
(4 600 + 400)



180

doctorants
et post-
doctorants



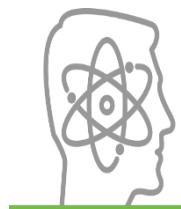
**Défense
et sécurité
du pays**



**Énergies
nucléaire et
renouvelables**



**Recherche
technologique
pour l'industrie**



**Recherche
fondamentale**

CEA



20 000

Salariés
(16 000 + 4
000)



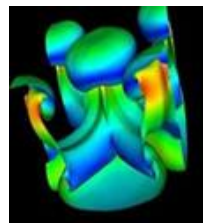
1 500

doctorants
et post-
doctorants

Missions confiées par l'état à la DAM :



ARMES NUCLÉAIRES



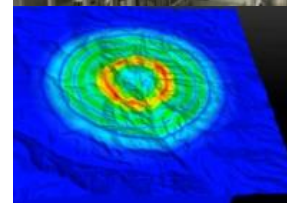
PROPULSION NUCLÉAIRE



MATIÈRES STRATÉGIQUES



SÉCURITÉ ET NON-PROLIFÉRATION



DÉFENSE CONVENTIONNELLE



Centres DAM, lieu de travail des équipes

Le RIPAULT

Matériaux non nucléaires

CESTA

- Architecte des têtes nucléaires
- Garantie performances TN
- Laser MégaJoule (LMJ)

GRAMAT

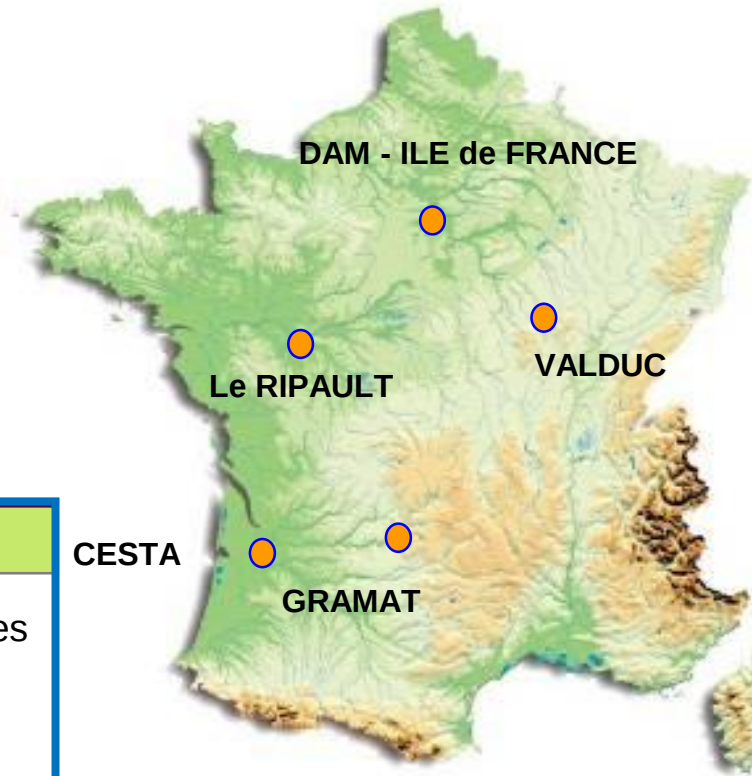
Vulnérabilité et efficacité
des systèmes d'armes

DAM - ILE de FRANCE

- Concepteurs de charges nucléaires (physique de base, calcul intensif)
- Lutte contre la prolifération et le terrorisme
- Ingénierie nucléaire

VALDUC

- Matériaux nucléaires
- EPURE



Le Centre d'Etudes Scientifiques et Techniques d'Aquitaine

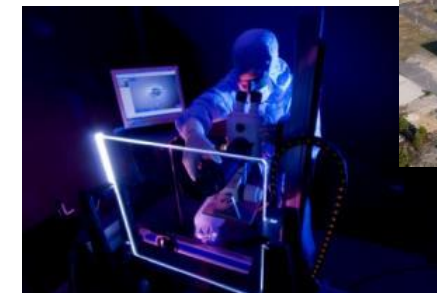
Armes (Têtes Nucléaires)

- Architecture industrielle des TN
- Conception et garantie des performances (hors énergie) tout au long du profil de vie
- Montage, démontage, maintenance des TN



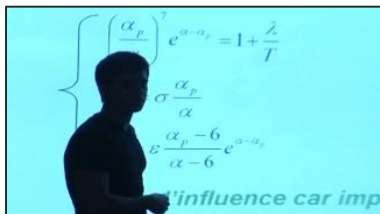
Simulation (programme Laser)

- Exploitation de l'installation Laser MégaJoule au profit de la réalisation du programme expérimental laser

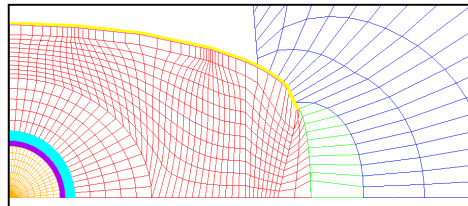


Le Programme Simulation – *Le cycle d'optimisation*

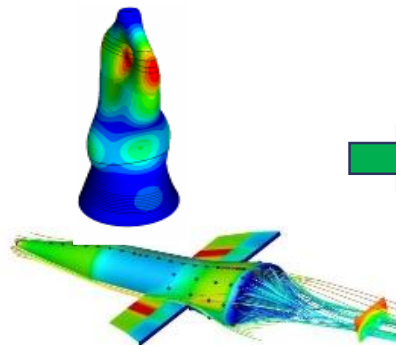
Simulation physico-numérique



Modélisations et données
physiques **plus** précises



Chaînes de calcul
plus performantes



Supercalculateurs
plus puissants

Garantie de toutes les performances de la tête nucléaire



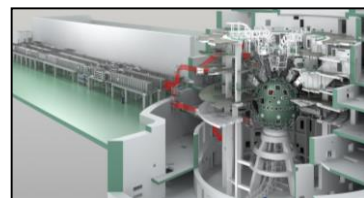
Énergie et autosûreté



Réinterprétation des
essais nucléaires
passés



Expériences par parties
plus complexes (**Epure, LMJ**)



Furtivité



Durcissement



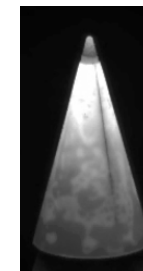
Tenue aux environnements (intégrité)

Essais mécaniques
et thermiques



Portée et précision

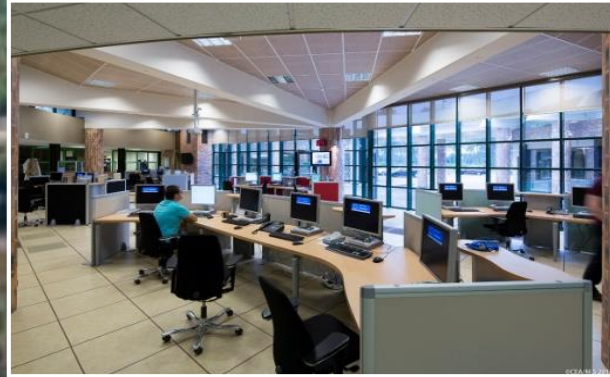
Essais en vol



Domaine de
conception **plus**
étendu

Simulation
plus
prédictive

Moyens Mécaniques au CEA/CESTA



2 – Développements en simulation vibratoire non linéaire

Origine des études vibratoires non linéaires (2012)

Résumé des travaux menés 2012 – 2022 avec l'École Centrale de Lyon (LTDS)

Méthode de simulation	Origine de la non-linéarité
HBM (*) – Excitation sinus	Grands déplacements
	Liaison frottante
	Plots élastomères
HBM – Sinus + Incertitudes	Grands déplacements
	Plots élastomères
HBM – Excitation Aléatoire	Grands déplacements
	Liaison frottante + plots élastomères
HBM – Excitation Multipoints	Grands déplacements
HBM – Excitation Acoustique	Liaison frottante

Thèse de M. Claeys
2012-2015

Thèse de T. Roncen
2015-2018

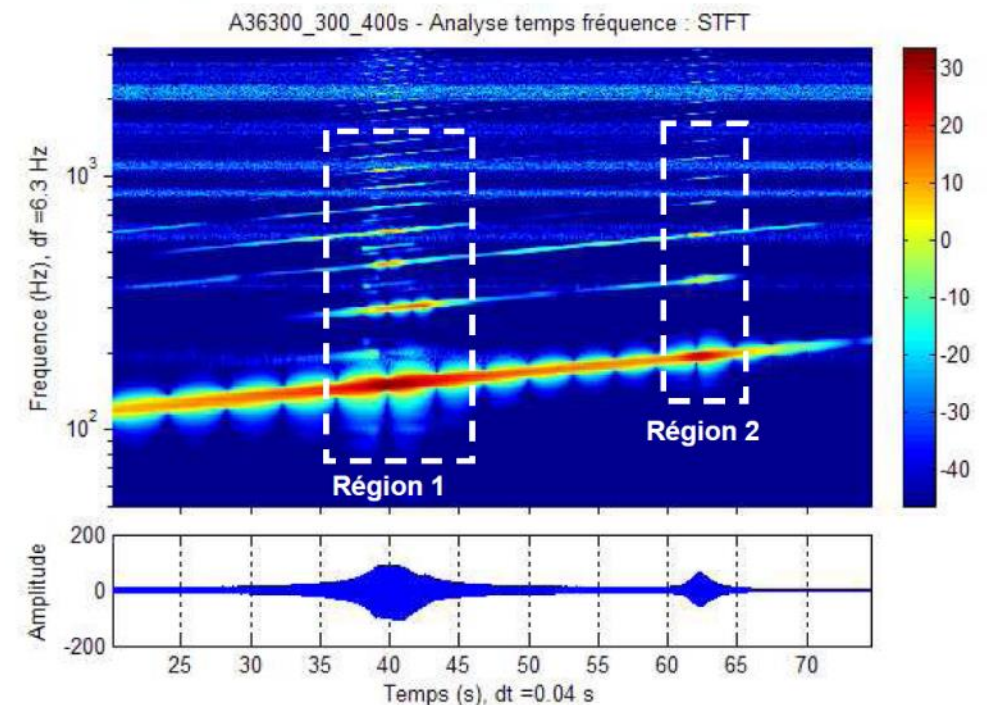
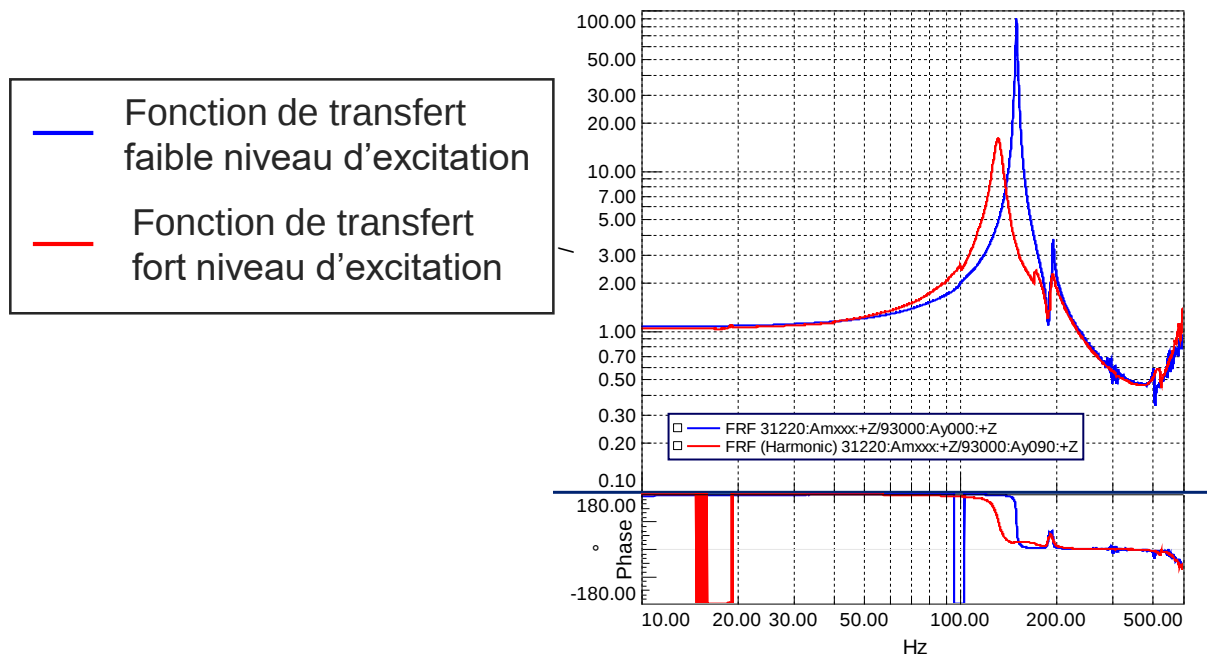
Thèse de S. Talik
2019-2022

(*) HBM = Harmonic Balance Method (méthode d'équilibrage harmonique)

Origine des études vibratoires non linéaires (2012)

1 – Mise en place du premier standard de simulation : Analyse modale numérique, validation du modèle par analyse modale expérimentale, mais **évolution de certains modes de résonance** en fonction du niveau d'excitation.

2 – Lors d'essais vibratoires à excitation sinusoïdale, mesure de réponses stationnaires non-sinusoïdales
→ apparition d'harmoniques d'ordre supérieures



Premières études par J.-P. Lambelin (CEA/CESTA/DSGA)

Mise en place d'une collaboration avec le Pr. J.-J. Sinou (Ecole Centrale Lyon, LTDS)

Harmonic Balance Method – cas sinusoïdal

Introduction d'un terme non linéaire dans les équations de la dynamique → Problème non linéaire continu.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_{excit} \cos(\Omega t) + F_{nl}(t)$$

Harmonic Balance Method : recherche d'une solution stationnaire sur une base de Fourier :
→ Problème non linéaire discret

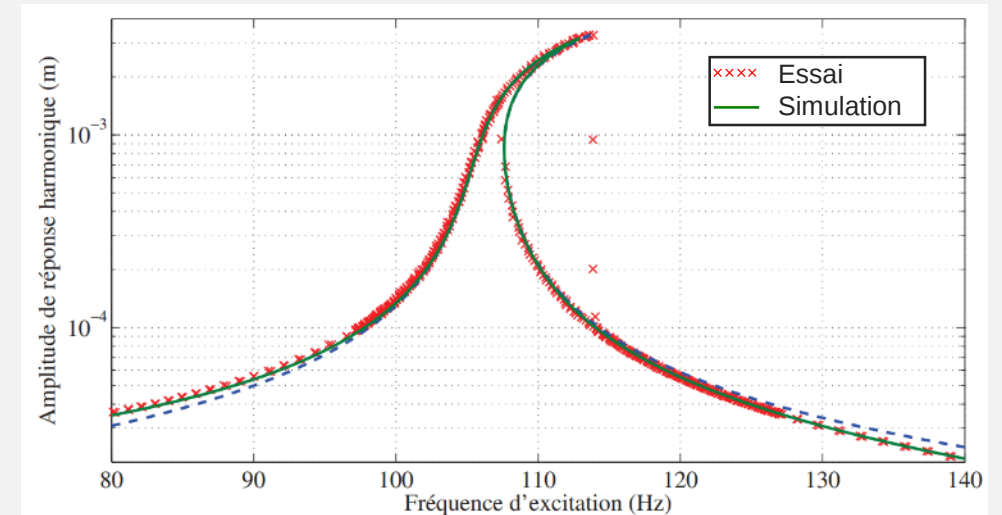
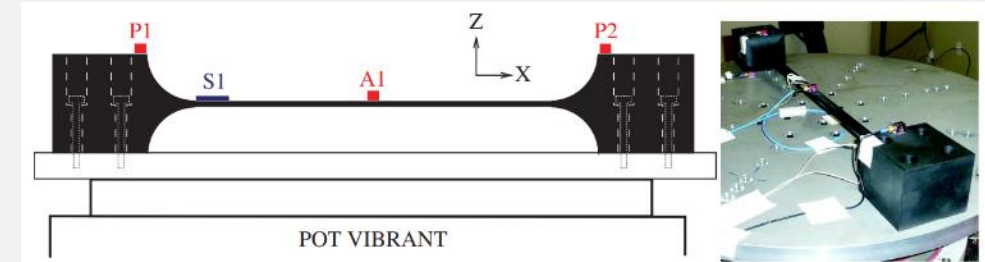
$$x(t) = B_0 + \sum_{n=1}^N A_n \sin(n\Omega t) + B_n \cos(n\Omega t)$$

Alternance **temps-fréquence** pour les coefficients de Fourier du terme non linéaire F_{nl}

Méthode de continuation pour simuler les courbes de réponses fréquentielles.

Evolution de la fréquence de résonance avec le niveau.
Apparition de signaux harmoniques d'ordre supérieur.

Validation de la méthode sur un cas académique : poutre en grands déplacements.

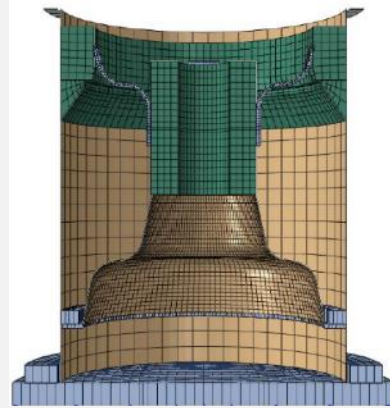


Claeys, M., Sinou, J. J., Lambelin, J. P., & Alcoverro, B. (2014). Multi-harmonic measurements and numerical simulations of nonlinear vibrations of a beam with non-ideal boundary conditions. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 19(12), 4196-4212.

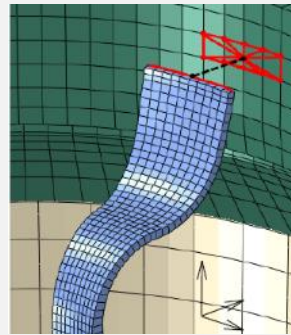
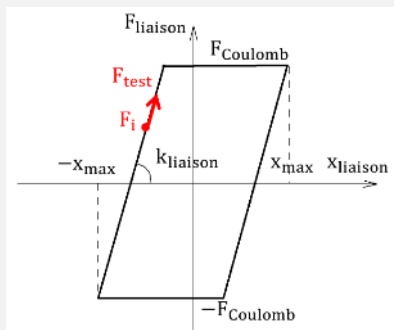
Harmonic Balance Method – cas sinusoïdal

Application à un cas industriel :

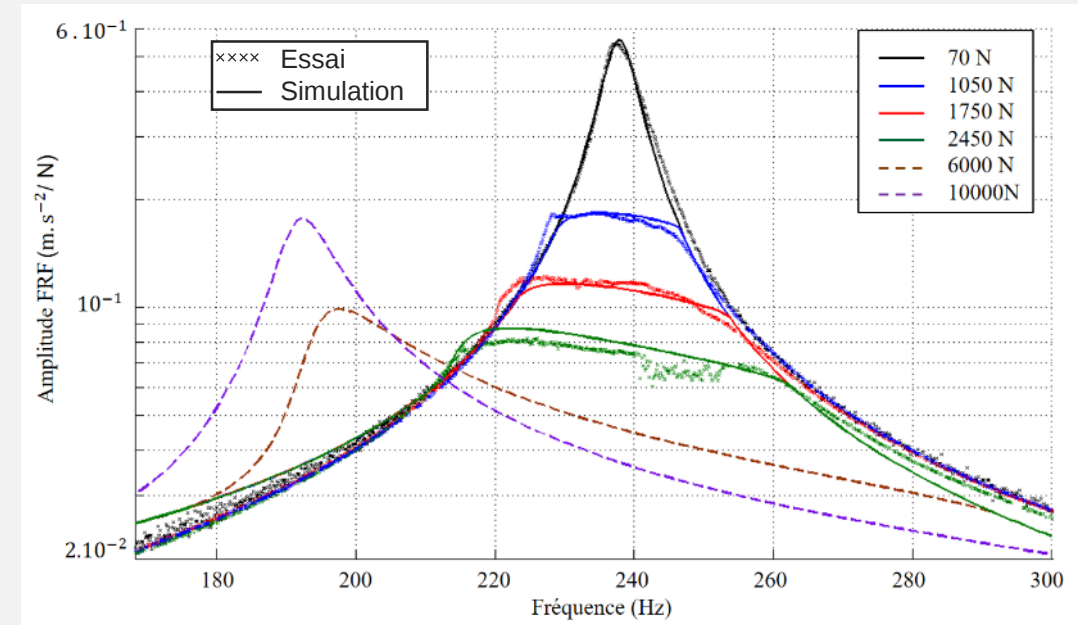
- assemblage modélisé par éléments finis



- réduction de modèle
- introduction de liaisons frottantes



Validation de la méthode de simulation pour cet assemblage :



Claeys, M., Sinou, J. J., Lambelin, J. P., & Todeschini, R. (2016). Experiments and numerical simulations of nonlinear vibration responses of an assembly with friction joints—application on a test structure named “harmony”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 70, 1097-1116.

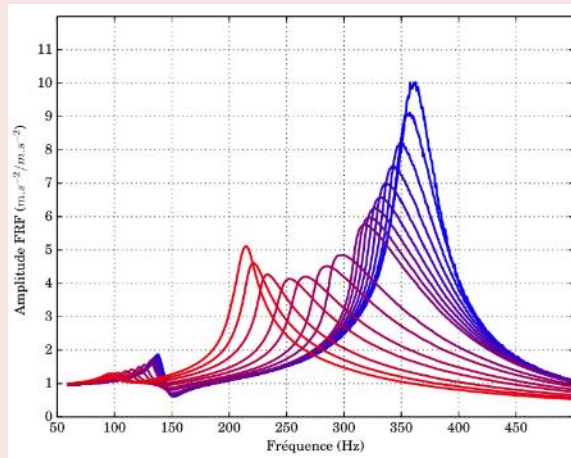
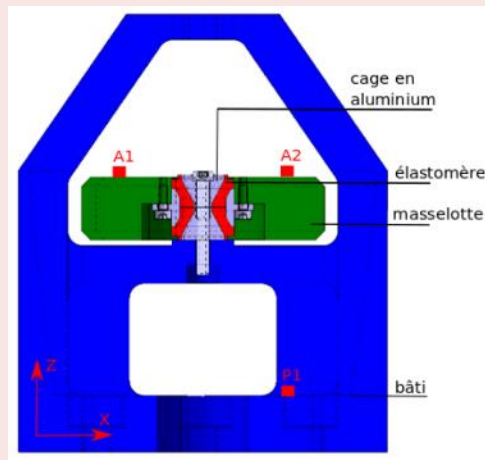
Mise en évidence et simulation d’une interaction modale 1:13

Claeys, M., Sinou, J. J., Lambelin, J. P., & Todeschini, R. (2016). Modal interactions due to friction in the nonlinear vibration response of the “Harmony” test structure: Experiments and simulations. *Journal of Sound and Vibration*, 376, 131-148.

Harmonic Balance Method – cas sinusoïdal

Étude d'une nouvelle liaison au comportement non linéaire : un plot en matériau élastomère.

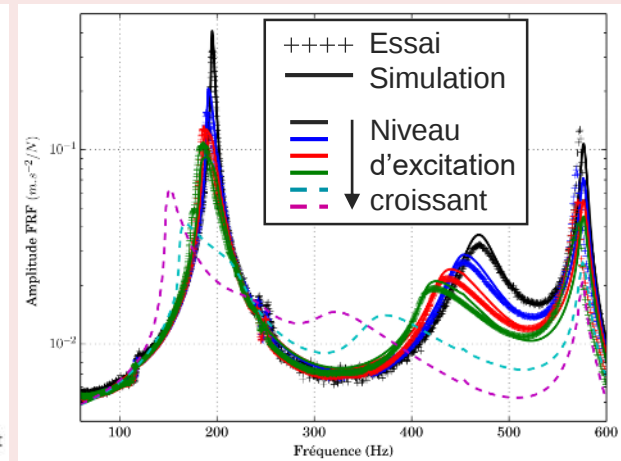
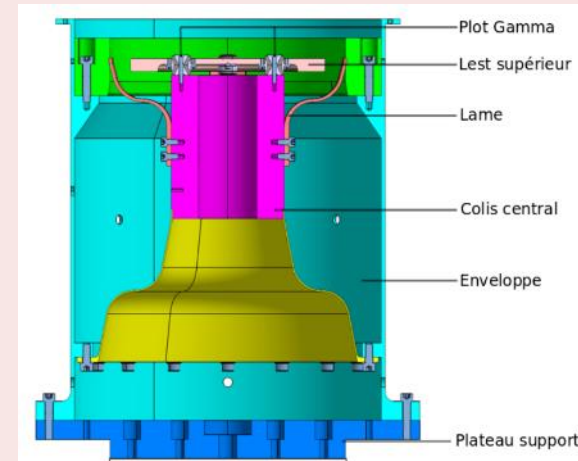
Caractérisation d'un plot seul :



Identification d'une raideur apparente non linéaire ainsi que d'un amortissement apparent.

Roncen, T., Sinou, J. J., & Lambelin, J. P. (2019). Experiments and nonlinear simulations of a rubber isolator subjected to harmonic and random vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, 451, 71-83.

Restitution par simulation d'un essai vibratoire d'une maquette comportant des liaisons frottantes et par plots élastomère



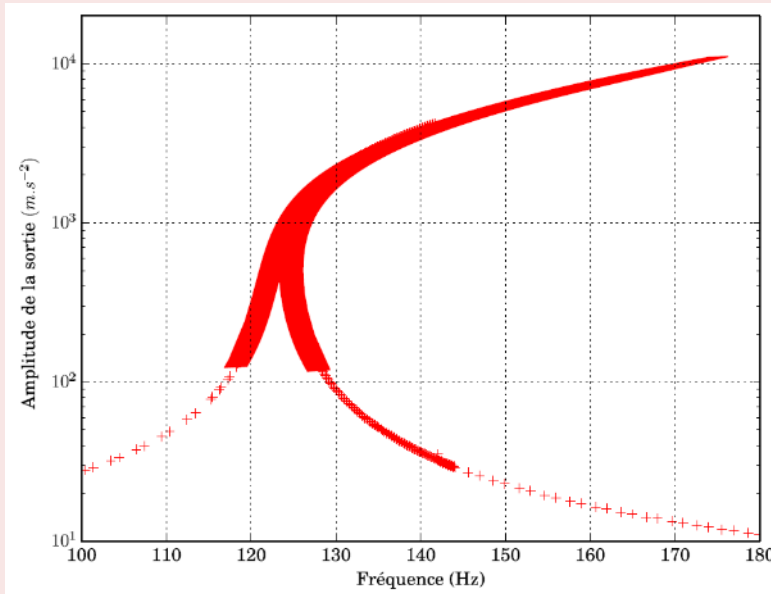
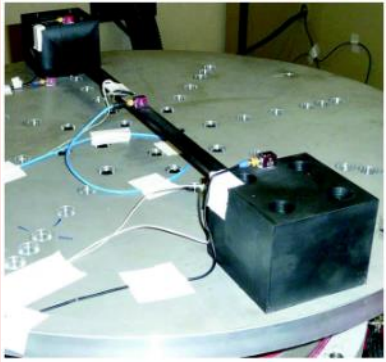
Interprétation par la simulation du comportement non linéaire : ce qui s'explique par le frottement est distingué de ce qui est dû à la liaison élastomère.

Roncen, T., Sinou, J. J., & Lambelin, J. P. (2019). Experiments and simulations of an industrial assembly with different types of nonlinear joints subjected to harmonic vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, 458, 458-478.

HBM sinus + incertitudes

Couplage de la HBM avec un algorithme de propagation d'incertitudes : le Chaos Polynomial.

Démonstration sur le cas de la poutre bi-encastée.



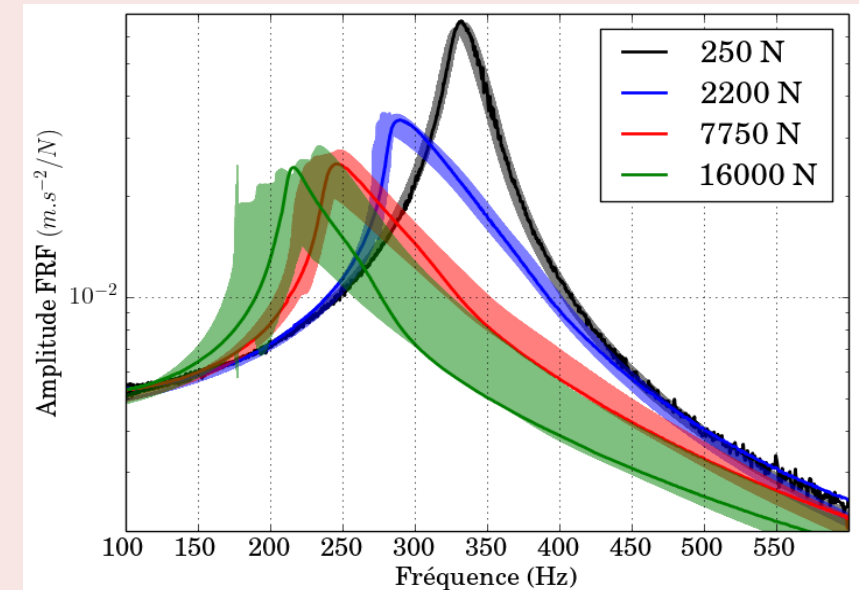
Roncen, T., Sinou, J. J., & Lambelin, J. P. (2018). Non-linear vibrations of a beam with non-ideal boundary conditions and uncertainties—Modeling, numerical simulations and experiments. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 110, 165-179.

Identification d'incertitudes dans la loi de comportement du plot élastomère.

Propagation d'incertitude sur un cas d'étude comprenant 4 liaisons élastomères.



..



Roncen, T., Sinou, J. J., & Lambelin, J. P. (2017). Réponses vibratoires non-linéaires d'un assemblage avec des liaisons élastomères en présence d'incertitudes de modèle. *13e colloque national en calcul des structures*, May 2017, Giens, Var, France.

HBM – excitation aléatoire

Adaptation de la HBM à une **excitation stationnaire aléatoire gaussienne**, caractérisée par une Densité Spectrale de Puissance (DSP).



La discrétisation fréquentielle $\Delta\Omega$ des spectres est utilisée comme harmonique fondamentale de la méthode HBM :

$$F(t) = F_0 + \sum_{n=1}^{p \gg 1} F_{s,n} \sin(n\Delta\Omega t) + F_{c,n} \cos(n\Delta\Omega t)$$

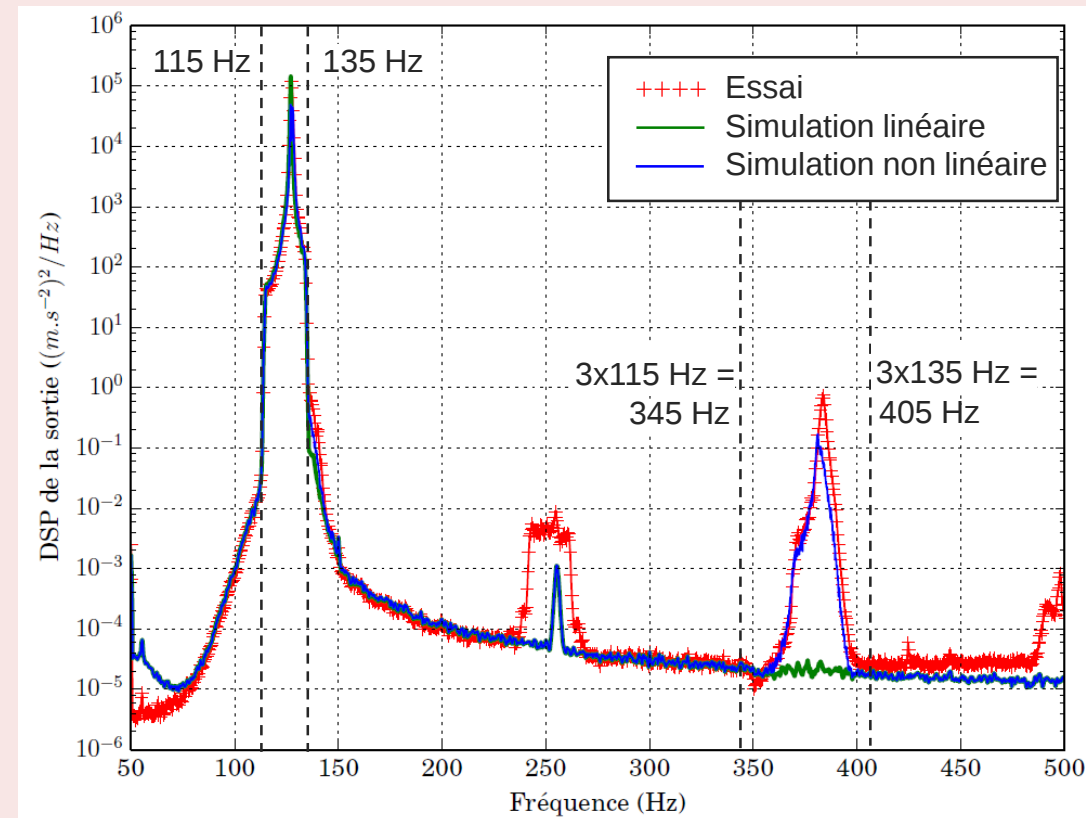
Démonstration sur le cas de la **poutre bi-encastrée**.

Excitation en bande assez étroite centrée sur le premier mode de la poutre à 125 Hz : [115 – 135 Hz].

Simulation de la réponse dans la bande [50 – 500 Hz].

Réponse simulée et mesurée aux harmoniques de la bande d'excitation, en particulier à 3x[115 – 135 Hz].

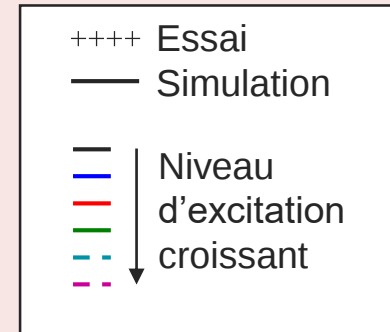
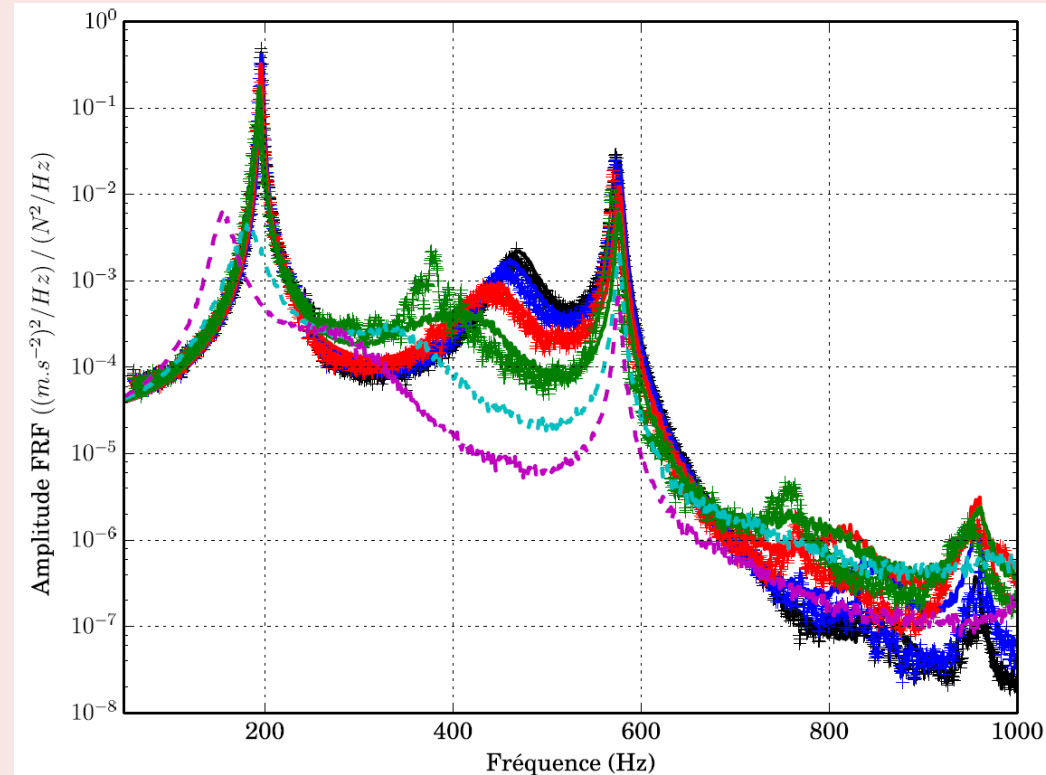
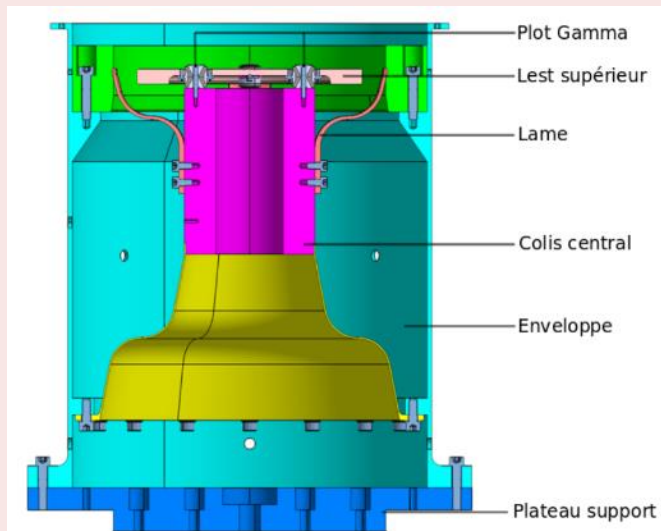
→ « **Signature non linéaire** » de la structure



Roncen, T., Lambelin, J. P., & Sinou, J. J. (2019). Nonlinear vibrations of a beam with non-ideal boundary conditions and stochastic excitations-experiments, modeling and simulations. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 74, 14-29..

HBM – excitation aléatoire

Application de la HBM – aléatoire à l'assemblage comportant des liaisons non linéaires par frottement et des plots élastomères



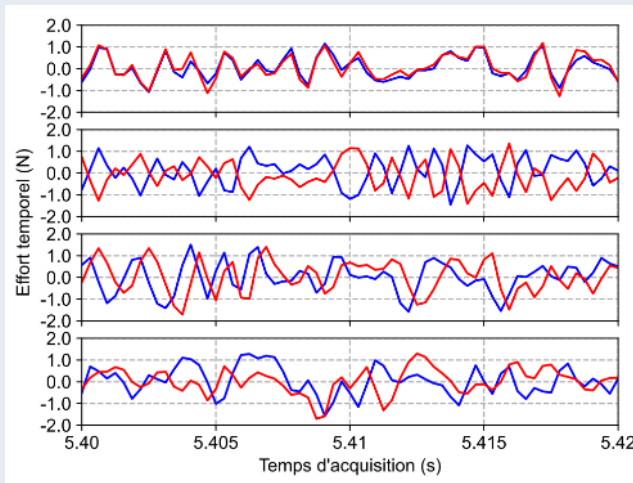
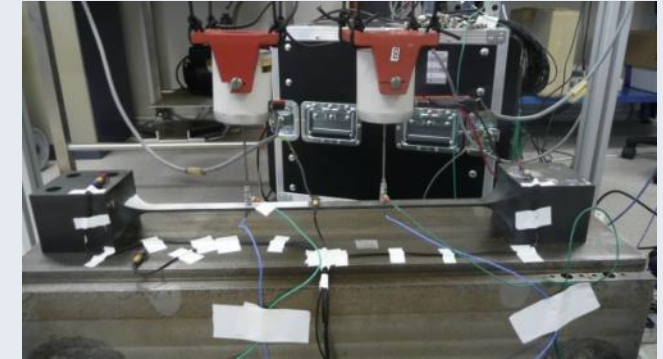
Roncen, T., Sinou, J. J., & Lambelin, J. P. (2021). Experiments and simulations of the structure Harmony-Gamma subjected to broadband random vibrations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 159, 107849.

HBM – excitation multipoints

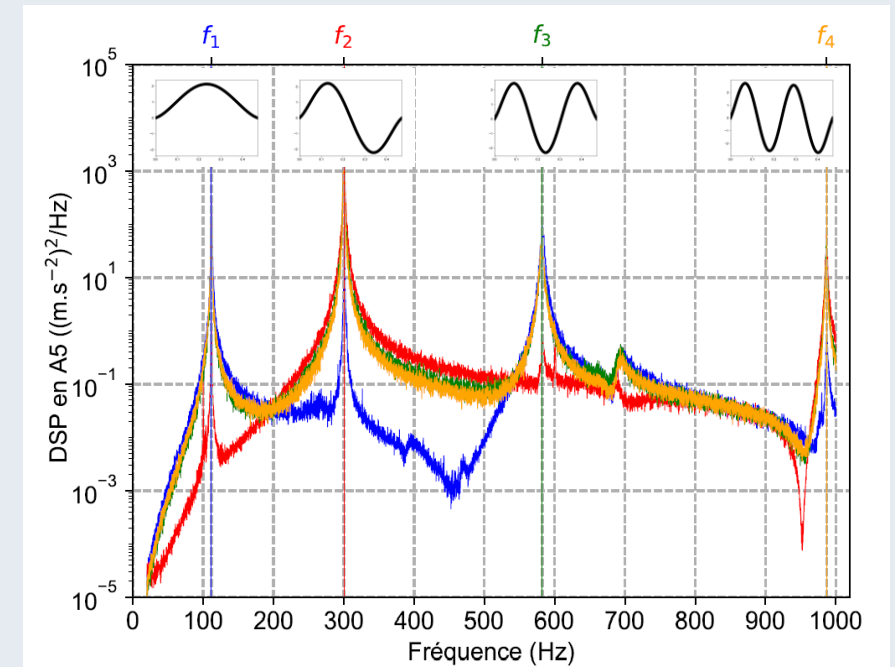
Étude des excitations aléatoires multipoints (en vue d'excitations multiaxes ou acoustiques)

Étude de la poutre bi-encastée soumise simultanément à 2 efforts aléatoires.

Mise en évidence expérimentale de la dépendance de la réponse vibratoire à la corrélation des signaux.



- forces en phase $\rho = 1$
- forces en opposition de phase $\rho = -1$
- forces en quadrature de phase $\rho = -j$
- forces décorrélées $\rho = 0$

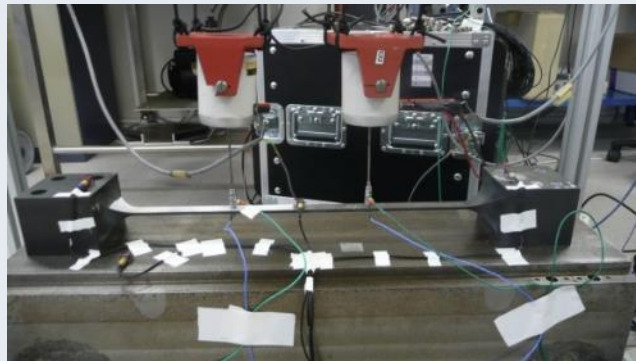


HBM – excitation multi-points

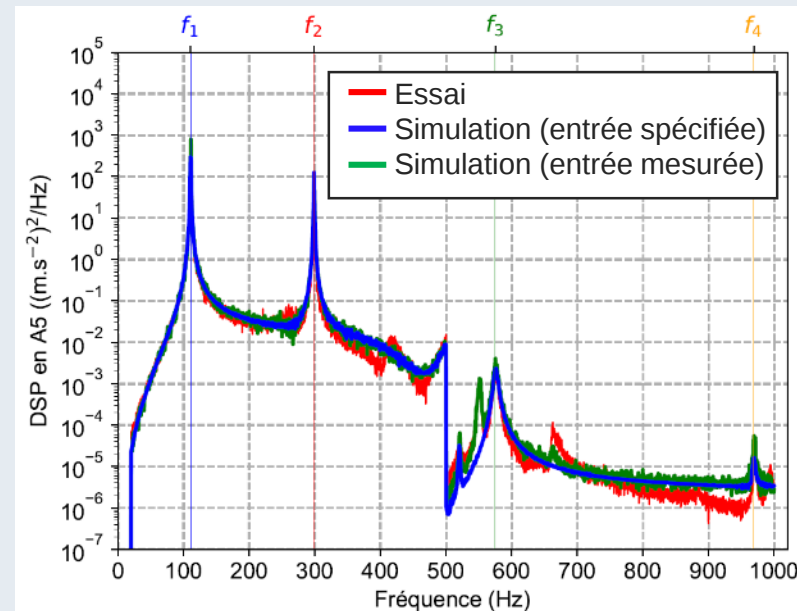
Adaptation de la HBM aléatoire à 2 termes d'excitations, validation expérimentale des simulations.

La **signature non linéaire** dépend de la corrélation des forces. Bande excitée [50 – 500 Hz].

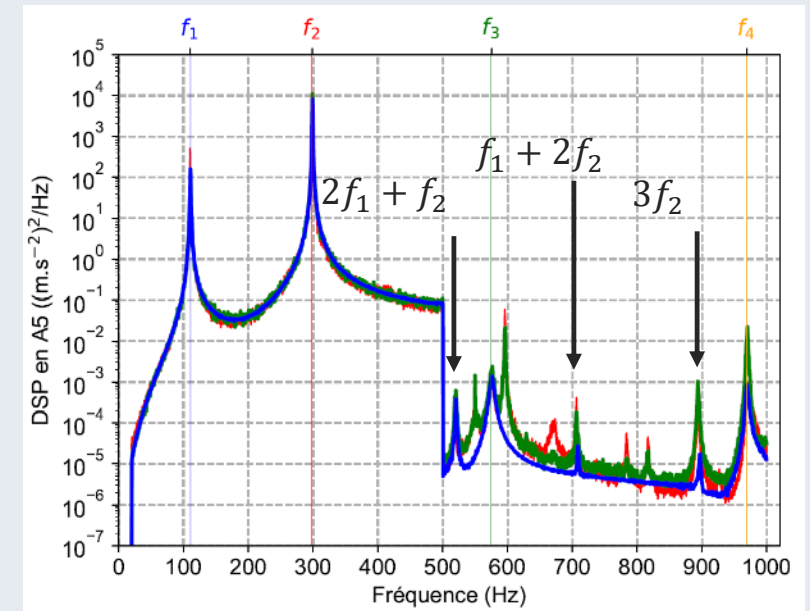
Des résonances hors bande d'excitation sont observées et simulées en particulier à $2f_1 + f_2$, $f_1 + 2f_2$ et $3f_2$



Excitations corrélées, en phase

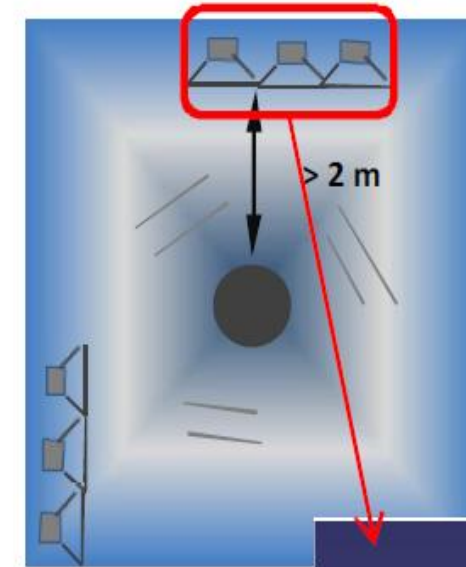
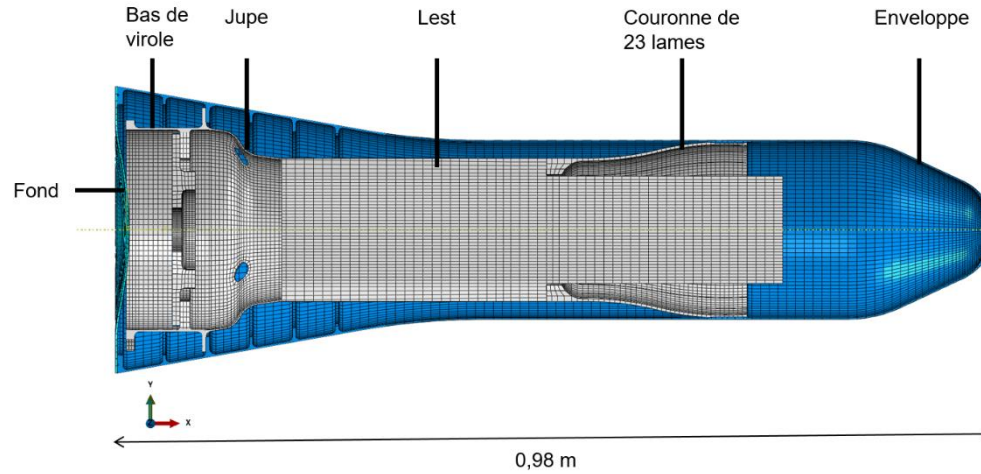


Excitations décorrélées



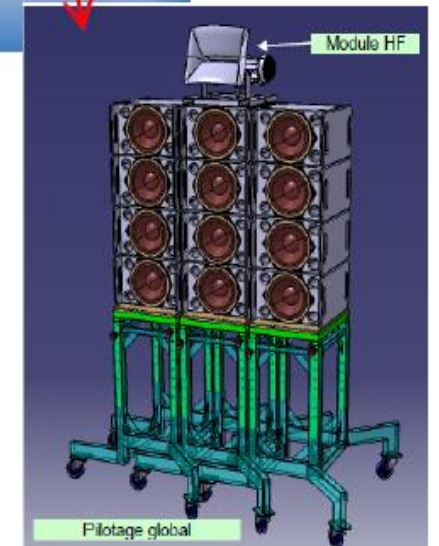
Talik, S., Sinou, J. J., Claeys, M., & Lambelin, J. P. (2022). Nonlinear vibrations of a beam with non-ideal boundary conditions and subjected to two correlated or uncorrelated broadband random excitations-experiments, modeling and simulations. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 110, 106328.

Moyen excitation acoustique au CEA/CESTA



Microphone
aléatoirement
de la maquette

placé
autour



HBM – excitation acoustique

Excitation acoustique : autant de points d'excitation que de nœuds éléments finis sur la surface extérieure de l'enveloppe
→ > 100 000 termes aléatoires partiellement corrélés par une matrice de corrélation $\mathbf{C}(\omega)$

Proposition d'une méthode originale de projection de ce vecteur d'efforts aléatoires sur la **base des modes propres** $\mathbf{Y}_i$ de la structure :

$$\mathbf{S}^{proj}(\omega) = \mathbf{S}(\omega) \begin{bmatrix} {}^T\mathbf{Y}_1 \mathbf{C}(\omega) \mathbf{Y}_1 & \dots & {}^T\mathbf{Y}_1 \mathbf{C}(\omega) \mathbf{Y}_{N_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ {}^T\mathbf{Y}_{N_m} \mathbf{C}(\omega) \mathbf{Y}_1 & \dots & {}^T\mathbf{Y}_{N_m} \mathbf{C}(\omega) \mathbf{Y}_{N_m} \end{bmatrix}_{N_m \times N_m}$$

→ Réduction du nombre de termes d'excitation à quelques dizaines.

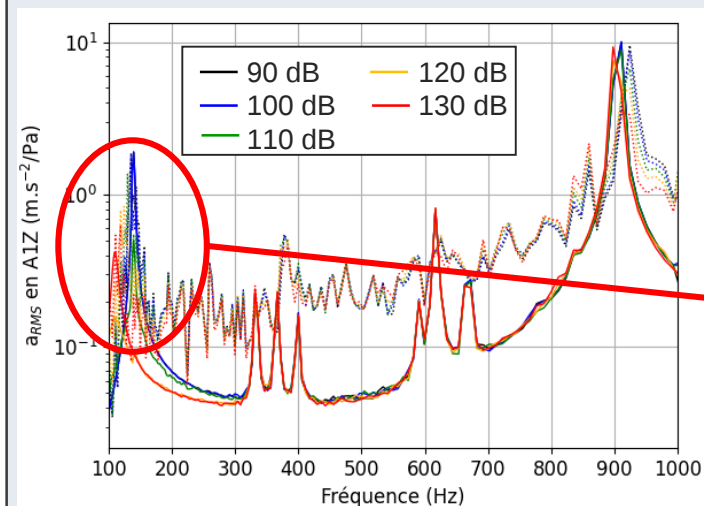
Validation de la méthode proposée sur un cas numérique avec une centaine de points d'excitation.

Talik, S., Claeys, M., Sinou, J. J., & Lambelin, J. P. (2022). An efficient approach for predicting the nonlinear vibrations of a beam system subjected to multipoint correlated random excitation. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 96, 104769.

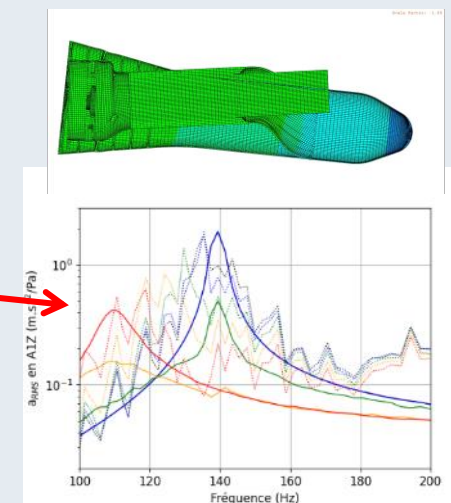
Application de la méthode proposée pour restituer **les essais acoustiques HB2 avec une liaison frottante**.

Couplage de la simulation HBM aléatoire multipoints avec Abaqus et Wave6 (cf. exposé T2-1 Vibroacoustique)

Restitution de la tendance d'évolution des modes principaux en fonction du niveau acoustique.



Mode transverse (≈ 135 Hz)



Talik, S., Claeys, M., Sinou, J. J., Valle-Canas, H., & Lambelin, J. P. (2024). Nonlinear vibrations of a ballistic vehicle with friction joints subjected to vibroacoustic excitation-experiments, modeling and simulations. *Journal of Sound and Vibration*, 588, 118526.

Bilan des 10 ans d'étude

Caractérisation expérimentale des non-linéarités à travers :

- Épreuves spécifiques (sinus balayés de niveau croissants, montants, descendants, épreuves aléatoires),
- Analyse des signaux (étude des harmoniques, des « signatures non linéaires »),
- Diagnostics dédiés (vibrométrie laser à balayage, jauges sur les lames frottantes, thermocouples près des plots élastomères).

Développement de méthodes de simulation, dérivées de la HBM et adaptées à chaque cas :

- Excitation sinusoïdale, aléatoire, multipoints ou acoustique,
- Non-linéarité géométrique, frottement et plots élastomères,
- Propagation d'incertitudes.

Compréhension des phénomènes vibratoires non linéaires validée par les comparaisons essai-simulation.

Rayonnement scientifique :

- Partenariat fort avec le Pr. Jean-Jacques Sinou. Conseiller scientifique et encadrant des thèses jusqu'en 2022.
- 3 thèses soutenues,
- 11 articles dans des revues à comité de lecture,
- Publication des résultats de toutes les expériences sur la poutre bi-encastree (3 articles *Data in Brief*),
- 8 exposés en conférences internationales,
- 9 exposés en colloques nationaux dont les groupes de recherche CNRS dédiés (DYNOLIN et EX-MODELI)

3 - Perspectives

Situation actuelle

Nouvelles liaisons non linéaires

R&D sur la modélisation de la dissipation

R&D sur la représentativité des conditions aux limites

Situation actuelle et perspectives

Pérennisation des compétences :

- M. Claeys et S. Talik recrutés en CDI.
- Stabilité de l'équipe expérimentale.
- Achat d'un vibromètre laser à balayage.

Utilisation des simulations vibratoires non linéaires :

- Outils avancés de compréhension de phénomènes complexes, longs et difficiles à mettre en œuvre.

- Pas utilisés pour le dimensionnement mécanique :

- **simulations sur base modales** ou **simulations quasi-statiques non linéaires** autant que possible.

- + **simulations dynamiques temporelles** (réponse à chocs)

- Possibilité de les utiliser en fin de programme pour garantir la tenue aux environnements vibratoires.

Perspectives :

- Vers de nouvelles modélisations de nos non-linéarités pour les :

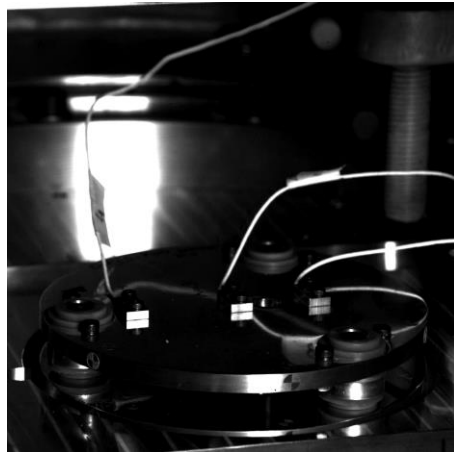
 - nouvelles solutions technologiques (matériaux MCP, étouffeurs de vibrations),

 - nouveaux moyens d'essais (solicitations impulsionnelles),

 - pour des sollicitations variées et multi-axes.

Situation actuelle et perspectives

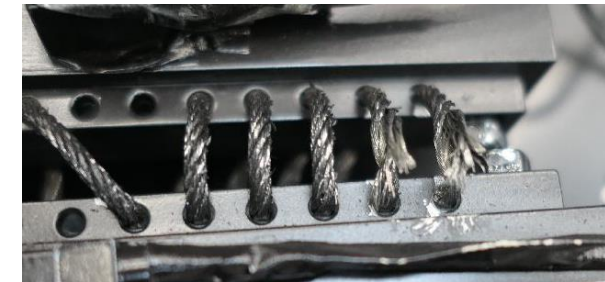
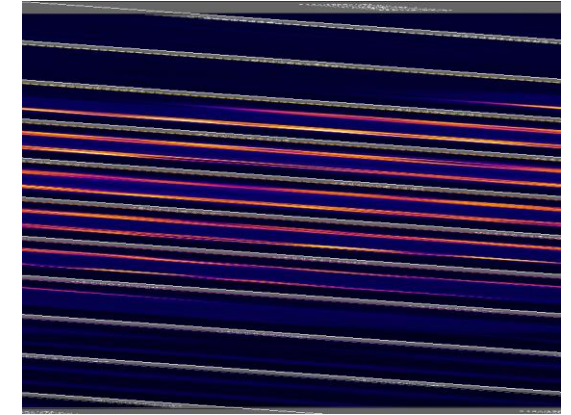
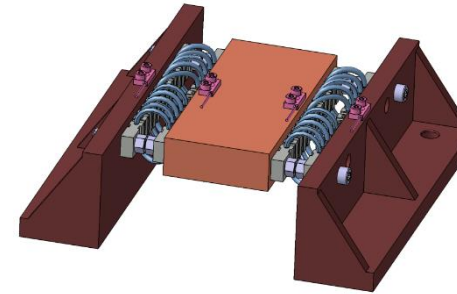
Intégration et simulation de nouvelles liaisons ponctuelles non linéaires :



pour des sollicitations
impulsionnelles de type
chocs



pour de nouveaux
matériaux pouvant apporter
de la dissipation

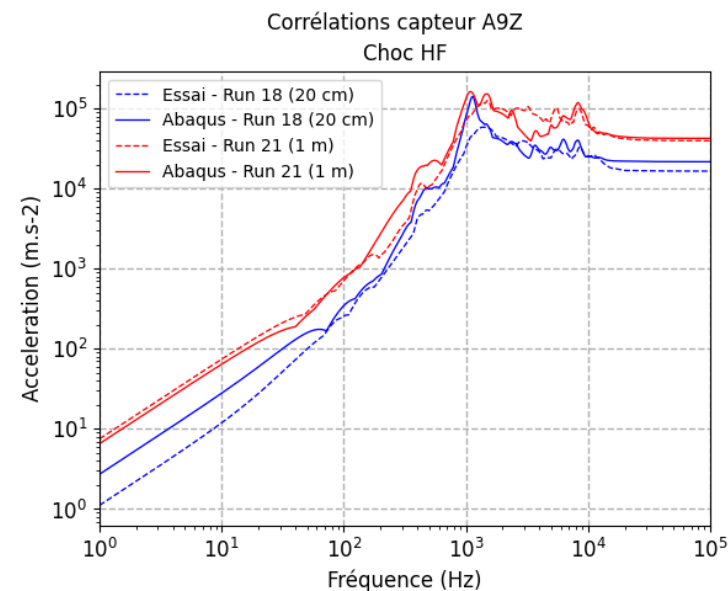
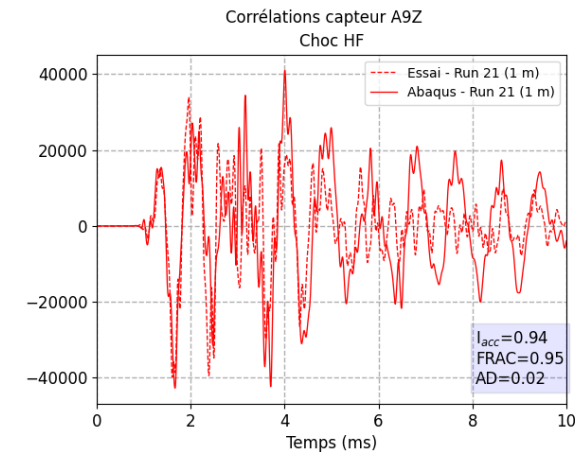
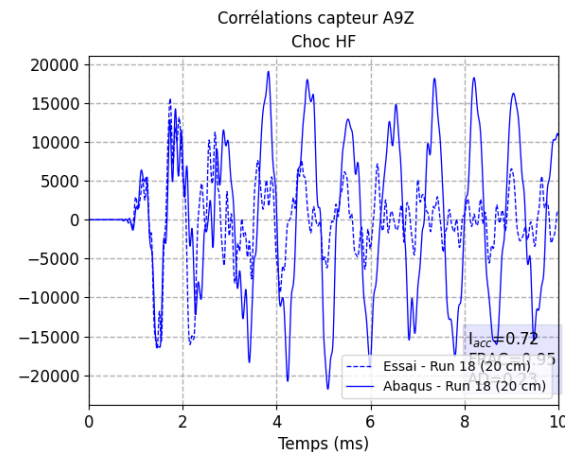
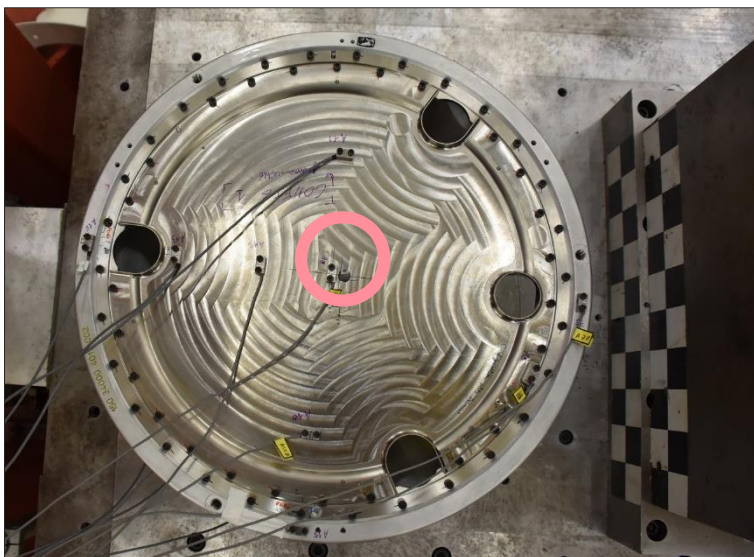


au regard des autres
physiques (influence de la
thermique par exemple à
l'approche de la résonance)

R&D dissipation

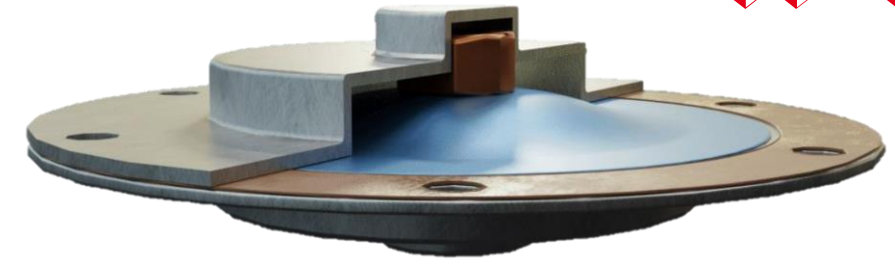
Encore de nombreux défis au niveau :

- de la modélisation
- de la simulation
- des solutions technologiques
- avec de nouveaux moyens d'essais

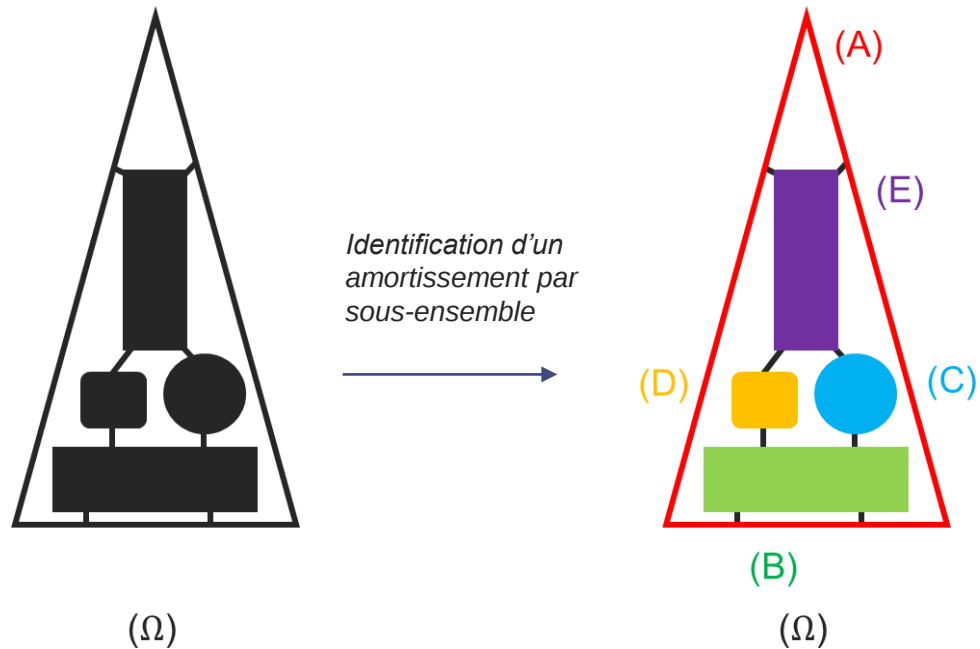


R&D dissipation

- Ces travaux (de modélisation, et de simulation, avec de nouvelles solutions technologiques) sont au service de la dissipation d'énergie

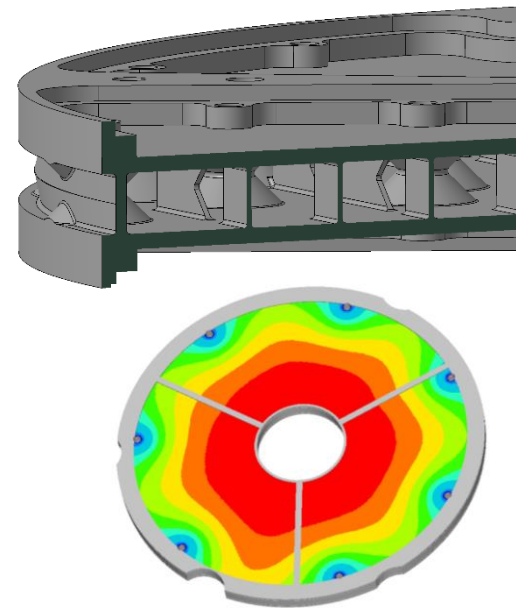


Etauveur de vibrations TACITA



*Identification d'un
amortissement par
sous-ensemble*

Amélioration de l'application du modèle d'amortissement de Rayleigh



Roue MCP (coupe CAO, calcul thermique et pièce réalisée)



Moyens laser à disposition et besoins auxquels ils peuvent répondre

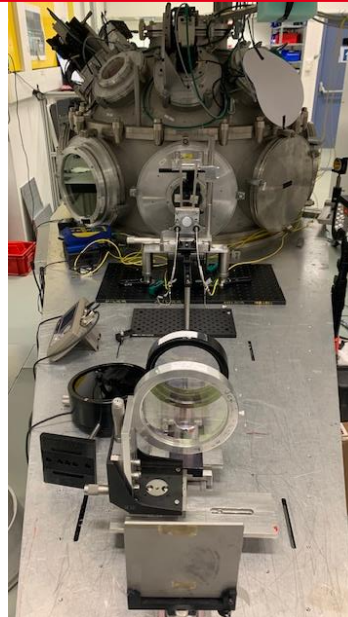
- Endommagement des matériaux
- Multi-agressions
- Tenue des interfaces entre couches

GCLT (CEA/DIF)



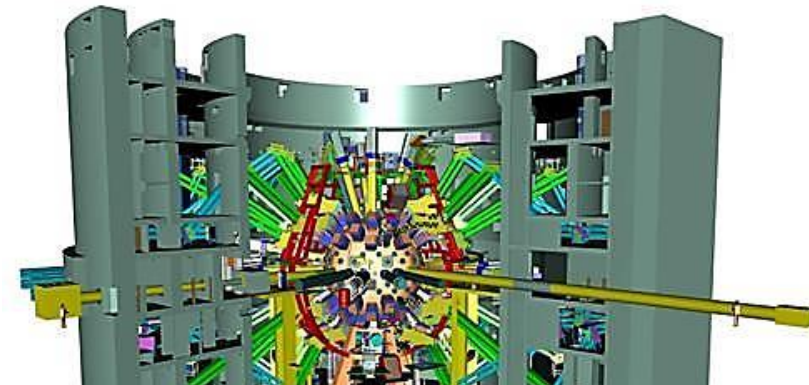
SIHL (CEA/CESTA)

- Réponse hydrodynamique
 - Étude de l'endommagement et de la tenue des interfaces sur des surfaces plus grandes qu'avec GCLT et SIHL.
- Réponse Vibratoire Impulsionnelle
 - Étude de la transmission des chocs dans les liaisons ;
 - Essais de faisabilité sur géométries plus simples qu'avec le LMJ et à échelle réduite.



HERA (LULI, Ecole Polytechnique)

- Réponse Vibratoire Impulsionnelle
 - Essais sur géométries échelle 1
 - Perspective post-2035



R&D conditions aux limites

Aujourd'hui :

- Les environnements vibratoires sont généralement spécifiés comme des accélérations en **translation** dans les 3 axes.
- La maquette numérique est **encastrée** et une accélération d'entraînement est appliquée.
- La maquette d'essai est fixée sur un **vibrateur mono-axes**. Les environnements sont appliqués **axe par axe**.
- Les niveaux de vibrations maximum sont atteints aux **fréquences de résonance de la maquette encastrée**

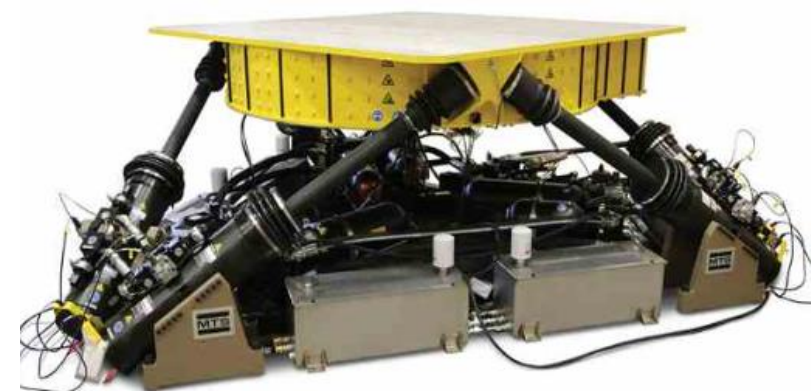
Objectif :

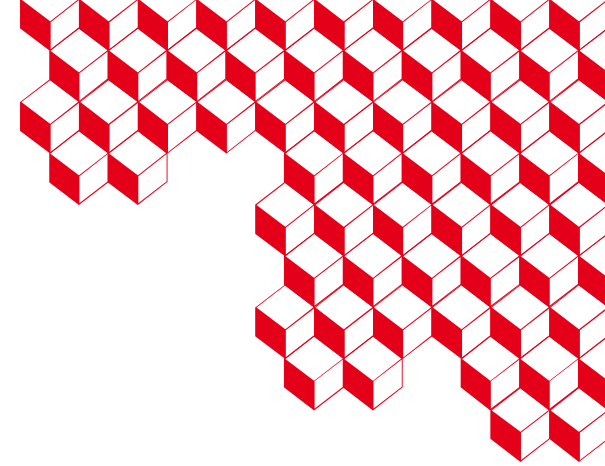
- En mission opérationnelle, les TN sont fixées à un missile, le **mouvement à l'interface couple translations et rotations**.
- Les niveaux maximum sont atteints aux **fréquences de résonance du missile**.
- En simulation, on peut utiliser un **modèle simplifié du missile** à la place de l'encastrement.
- Par l'utilisation d'un **hexapode vibratoire**, on pourrait reproduire fidèlement ces mouvements.
- En faisant évoluer les méthodes de pilotage, on pourrait reproduire également les fréquences de résonance du missile.

Vibrateur mono-axe
du CEA/CESTA.
Maquette fixée à une
table de translation
au mur.



Hexapode vibratoire
permettant de contrôler
les 3 translations et les
3 rotations





Simulations vibratoires non linéaires au service de la dissuasion nucléaire

Maxence Claeys et Sébastien Talik

CEA/CESTA/DACG

17 octobre 2025

