



# PROGRAMME DU 5<sup>th</sup> WORKSHOP CSMA JUNIORS

Ile de Porquerolles, Centre IGESA, 14-16 mai 2022



SAMEDI 14/05	
12:15-13:15	Déjeuner (+ dépôt des bagages en bagagerie)
13:15-14:45	<b>Moment social et rencontre à proximité du centre IGESA</b> <i>Rencontre par groupe de l'activité « projet scientifique collaboratif »</i> <i>Pétanque, volley-ball, football, etc</i>
14:45-15:00	Pause
15:00-15:15	<b>Ouverture du workshop (salle Cinéma)</b> <i>Mot d'accueil et informations pratiques</i> <i>Présentation de l'activité « création de projet scientifique collaboratif »</i>
15:15-16:15	<b>Session plénière de cours 1 (salle Cinéma)</b> <i>Quantification et propagation des incertitudes – Loïc Giraldi</i> <i>Fabrication additive et procédés de fabrication avancés – Morgan Dal</i>
16:15-16:30	Pause-café
16:30-18:00	<b>Sessions pratiques en parallèle 1 (salles 1 et 2)</b> <i>Quantification et propagation des incertitudes – Loïc Giraldi</i> <i>Fabrication additive et procédés de fabrication avancés – Morgan Dal</i>
18:00-19:15	Cocktail apéritif (+ récupération des badges/goodies et des clés de chambre)
19:15-20:15	Dîner
20:30-22:30	<b>Hackathon !! (salle Cinéma puis salles 1 &amp; 2)</b>
DIMANCHE 15/05	
7:30-9:15	Petit-déjeuner
9:30-10:30	<b>Session plénière de cours 2 (salle Cinéma)</b> <i>Jumeaux numériques et dialogue calculs – essais – Jan Neggers</i> <i>Dynamique non-linéaire – Aurélien Grolet</i>
10:30-10:45	Pause-café
10:45-12:15	<b>Sessions pratiques en parallèle 2 (salles 1 et 2)</b> <i>Jumeaux numériques et dialogue calculs – essais – Jan Neggers</i> <i>Dynamique non-linéaire – Aurélien Grolet</i>
12:15-13:15	Déjeuner

DIMANCHE 15/05	
13:15-15:00	Temps libre
15:00-16:00	Projet scientifique collaboratif (salles 1 et 2) <i>Démarrage de la rédaction du projet par mini-groupe</i>
16:00-17:00	<b>Session open science / open data (salle Cinéma)</b> <i>Présentation/discussion sur le processus de publication scientifique – Vladislav Yastrebov</i>
17:00-17:30	Pause-café
17:30-18:30	<b>Session Parrain (salle Cinéma)</b> <i>Gilles Perrin - Framatome</i>
19:15-20:15	Dîner
20:30-22:30	<b>Projet scientifique collaboratif (salles Cinéma, 1 et 2)</b> <i>Fin de rédaction du projet par mini-groupe (45min)</i> <i>Restitution orale devant les autres mini-groupes (1h)</i>
22:30-...	<b>Remise des prix du concours de code (salle Cinéma)</b> <b>Fin de soirée conviviale (musique et boissons)</b>
LUNDI 16/05	
7:00-8:15	Petit-déjeuner
8:15-9:15	<b>Session plénière de cours 3 (salle Cinéma)</b> <i>Deep learning, simulation temps réel et réduction de modèles – Filippo Masi</i> <i>Calcul des systèmes couplés – Boris Lossouarn</i>
9:15-9:30	Pause (+ rendu des clés de chambre)
9:30-11:00	<b>Sessions pratiques en parallèle 3 (salles 1 et 2)</b> <i>Deep learning, simulation temps réel et réduction de modèles – Filippo Masi</i> <i>Calcul des systèmes couplés – Boris Lossouarn</i>
11:30	<b>Départ en bateau pour le site Belambra (lieu du congrès CSMA)</b>



## PROGRAMME DU 5<sup>E</sup> WORKSHOP CSMA JUNIORS

Ile de Porquerolles, Centre IGESA, 14-16 mai 2022

framato**me**

### Session open-science

Vladislav Yastrebov - MINES ParisTech, PSL Research University, Centre des Matériaux, CNRS

Dans cette présentation, on parlera du paysage de publications scientifiques et abordera des questions de choix de revues, d'accès ouvert et de ses différentes facettes ; on discutera également de bonnes pratiques de publication alignées avec les principes de la science ouverte et re-productible.

### Dynamique non-linéaire

Aurélien Grolet - Arts et Metiers Institute of Technology, LISPEN, HESAM Université

#### Introduction aux vibrations non-linéaires

aurelien.grolet@ensam.eu

Dans ce cours on présente une introduction aux vibration non-linéaire. Après avoir fait une brève revue des types de non-linéarité en mécanique, on présente les phénomènes caractéristiques des vibrations non-linéaires, à savoir: les types de solutions possibles, la dépendance entre amplitude et fréquence naturelle de vibration, la distorsion harmoniques, instabilité, les bifurcations et le chaos. Les méthodes d'approximation des solutions périodiques seront évoqués, et on détaillera la méthode de l'équilibrage harmonique (HBM) et les méthodes de continuations numériques utilisées pour résoudre des systèmes d'équations algébriques. Lors du TP les concepts présentés seront illustrés numériquement sur un exemple simple d'oscillateur de Duffing.

### Calcul de systèmes couplés

Bruno Lossouarn - Laboratoire de Mécanique des Structures et des Systèmes Couplés, Conservatoire national des arts et métiers

Modélisation d'une structure poutre couplée à son analogue électrique par l'intermédiaire d'un réseau de patches piézoélectriques.

Ces travaux se placent dans le contexte de l'amortissement vibratoire par couplage piézoélectrique. Plus spécifiquement, les techniques de type « shunt » consistent à connecter un circuit électrique aux bornes d'un composant piézoélectrique, lui-même soumis aux vibrations de la structure à contrôler. La conversion de l'énergie vibratoire en énergie électrique permet de modifier la dynamique de la structure et d'apporter un amortissement qui dépend directement du circuit électrique considéré. En plus d'une résistance électrique, la présence d'une inductance dans le circuit crée une résonance due à l'échange de charges avec la capacité piézoélectrique. Ainsi, l'ajustement de la fréquence propre de ce shunt résonant à celle de la structure mécanique équivaut à la mise en œuvre d'un amortisseur à masse accordée.

La réduction vibratoire peut s'étendre à une large plage de fréquences par multiplication du nombre de patches piézoélectriques et interconnexions sous forme d'un réseau électrique multi-résonant. Une solution est d'assembler un réseau qui offre des fréquences propres et des distributions modales proches de celles de la structure à contrôler, on parle alors de réseau électrique analogue. Grâce au couplage piézoélectrique, ces analogues électriques permettent d'étendre le concept d'amortisseur à masse accordée à un contrôle simultané de plusieurs résonances mécaniques.

L'exemple proposé est celui d'une poutre encastrée-libre couplée à son réseau piézoélectrique analogue. La première étape consiste à modéliser la dynamique vibratoire d'une poutre munie d'un ensemble de patches piézoélectriques répartis de façon périodique. Après calcul de propriétés mécaniques homogénéisées, un modèle éléments finis permet de déterminer les fréquences propres et les déformées modales de la poutre. Dans un second temps, on procède à l'analyse dynamique d'un réseau électrique réputé être l'analogue de la poutre encastrée-libre. L'objectif est d'appliquer les mêmes méthodes d'analyse modale afin de justifier l'analogie électro-mécanique. On procède ensuite au couplage entre les deux domaines par construction d'un système faisant apparaître l'équivalent de matrices de masse, d'amortissement et de raideur mais à l'échelle du système électro-mécanique. Un assemblage matriciel du même type que celui classiquement utilisé pour les méthodes éléments finis permet alors de définir un système couplé dont l'ensemble des degrés de libertés, électriques et mécaniques, participent à la dynamique globale. Le modèle unifié ainsi défini permet donc d'analyser l'influence des propriétés du réseau électrique sur l'amortissement de la structure mécanique.

Lossouarn, B., Kerschen, G., & Deü, J. F. (2021). An analogue twin for piezoelectric vibration damping of multiple nonlinear resonances. *Journal of Sound and Vibration*, 511, 116323.

Lossouarn, B., Aucejo, M., & Deü, J. F. (2018). Electromechanical wave finite element method for interconnected piezoelectric waveguides. *Computers & Structures*, 199, 46-56.



## Deep learning, simulation temps réel et réduction de modèles

Filippo Masi - Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, UMR 6183, CNRS, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes

L'essor de structures innovantes en ingénierie est aujourd'hui freiné par notre capacité à prédire la réponse des systèmes complexes, et plus précisément des matériaux qui les composent. Le comportement de ces derniers est en effet très difficile à appréhender avec des modèles empiriques, faute de la complexité sous-jacente et de la méconnaissance des phénomènes physiques.

À cette fin, les approches data-driven sont apparues ces dernières années avec comme but de fournir des descriptions enrichies du comportement matériau. Un changement de paradigme dans la modélisation traditionnelle s'est ainsi produit : les données, plutôt que d'être utilisées uniquement comme des outils de vérification, ont commencé à devenir le stimulus dans la quête de nouvelles représentations constitutives. Pourtant, les approches data-driven présentent des faiblesses majeures qui entravent leur application. L'absence d'un cadre rigoureux basé sur la physique (effet modèle « boîte noire ») est un des principaux problèmes menaçant la généralisation de ces méthodes à la résolution de problèmes en ingénierie.

Dans ce mini-cours, on se penchera sur les approches data-driven pilotées par la physique visant à modéliser le comportement des matériaux complexes et la réponse des structures hétérogènes. En particulier, on analysera en détail les réseaux de neurones basés sur la thermodynamique, aussi appelés TANN (Thermodynamics-based Artificial Neural Networks, cf. Masi et al. 2021, Masi and Stefanou 2021). Ces réseaux, grâce à l'intégration du premier et second principe de la thermodynamique, garantissent des résultats toujours thermodynamiquement admissibles et ouvrent de nouvelles possibilités dans la mécanique numérique et expérimentale, notamment à travers l'emploi de jumeaux numériques et des approches de réduction de modèles. Session pratique. On regardera de plus près l'implémentation théorique et numérique des réseaux des neurones pour la modélisation du comportement des matériaux. À travers des exemples motivants, on étudiera l'architecture des réseaux classiques et des réseaux TANN. L'attention sera mise sur la compréhension des schémas numériques et l'entraînement des réseaux des neurones, mais aussi la programmation guidée des certaines tâches. À la fin de cette session pratique, on analysera les bénéfices des approches data-driven pilotés par la physique par rapport aux approches standard.

F. Masi, I. Stefanou, P. Vannucci, and V. Maffi-Berthier, Thermodynamics-based Artificial Neural Networks for constitutive modeling, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 147, 104277 (2021).

F. Masi and I. Stefanou, Thermodynamics-based Artificial Neural Networks (TANN) for multiscale modeling of materials with inelastic microstructure, arXiv preprint arXiv:2108.13137 (2021).

## Quantification et propagation des incertitudes

Loïc Giraldi - CEA, DES, IRESNE, DEC

This session focuses on the use of the polynomial chaos expansion for the uncertainty quantification of material parameters of a nonlinear constitutive behaviour. Three major steps of the uncertainty quantification field are illustrated for this problem: uncertainty propagation, sensitivity analysis, and inverse problem solving by Bayesian inference.

### Physical model

The behaviour of the material of interest is modelled according to a Ramberg-Osgood nonlinear elastic constitutive equation. This behaviour satisfies a relation of the following form

$$\epsilon = f(\sigma, X), X = (E, \nu, \sigma_0, \alpha, n)$$

where  $\epsilon$  is the strain,  $\sigma$  the stress,  $E$  the Young modulus,  $\nu$  the Poisson ratio,  $\sigma_0$  the yield strength,  $\alpha$  and  $n$  are numerical parameters. The material parameter  $X = (E, \nu, \sigma_0, \alpha, n)$  is assumed to be a random vector drawn according to a prescribed distribution.

Given a sample of the material parameter, a tensile test and a simple shear test are simulated with the MFront material knowledge and the mtest unit mechanical behaviour testing softwares. Using these tools, we have at our disposal a numerical model that maps the material parameter to the stresses (strains are imposed) associated to the simulated experimental tests:

$$(E, \nu, \sigma_0, \alpha, n) = X \mapsto Y = (\sigma_1, \dots, \sigma_m)$$

### Uncertainty quantification

The first step of the practical session will focus on the propagation of uncertainties. Indeed, sensitivity analysis and inference require a large number of model evaluations. In order to keep the computational cost low, the initial model is replaced by a metamodel that is inexpensive to evaluate.

The metamodel is based here on the truncated polynomial chaos expansion. The parameters of the metamodel will be evaluated by a regression method commonly used in machine learning. The second step will consist in performing a sensitivity analysis, i.e. quantifying the proportions of the model output uncertainties induced by the uncertainties of each input parameter. In particular, we will exploit the properties of polynomial chaos to efficiently evaluate sensitivity indices called Sobol indices.

The third and final step will aim at solving the inverse problem of finding the distribution of the material parameter given experimental data. We will be particularly interested in optimization-based Bayesian inference methods that yield approximate posterior distributions.

## Fabrication additive et procédés de fabrication avancés

Morgan Dal - PIMM, ENSAM, CNRS, CNAM, HESAM Université

### Mini cours : La simulation de la fabrication additive

Dans ce mini cours, un peu général et descriptif, l'objectif est de donner aux auditeurs les bases ainsi que la philosophie des différents types de simulations numériques dans le cadre de la fabrication additive.

Dans un premier temps, et toujours de manière globale, nous reviendrons sur les différents procédés applicables aux matériaux métalliques. Nous centrerons ensuite les discussions sur les technologies laser, c.-à-d. la projection de poudre, la fusion de lit de poudre et la fusion de fil.

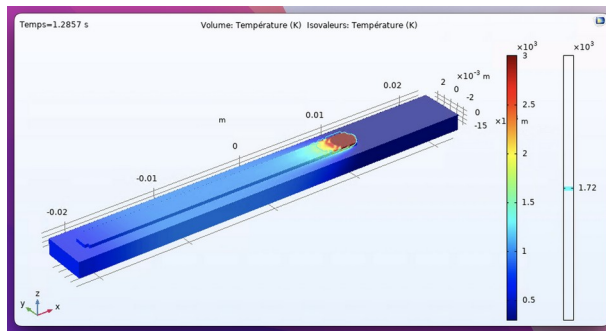
Dans un second temps, nous passerons en revue les méthodes de simulations en passant sur les trois échelles d'analyses courantes : micro, meso et macroscopiques, qui font appel à des physiques différentes. L'idée étant de décrire brièvement les principes de base, quelques exemples de méthodes de simulation communément admises, tout en insistant sur leurs spécificités respectives.

### Atelier : Simulation de la fabrication additive DMD

Dans cet atelier, l'objectif est la mise en pratique de certaines notions vues en Mini cours, notamment sur la gestion de l'apport de matière dans les simulations meso et macroscopiques.

Après un bref rappel sur le fonctionnement et les principes physiques du procédé de projection de poudre, les notions d'apport de matière par activation d'éléments (Figure 1) et par déformation de la géométrie (ALE) seront introduites. Ces deux cas seront ensuite détaillés et réalisés (ensemble) dans des modèles simples (sous Comsol Multiphysics). A la fin de chaque cas, les participants auront du temps pour améliorer les simulations (apport de chaleur, couplages, pertes thermiques, ...).

Pour finir, des discussions seront menées sur les avantages et inconvénients de chacune de ces méthodes.



Champs thermique simulé avec activation d'éléments sous Comsol Multiphysics.

## Jumeaux numériques et dialogue essais - calculs

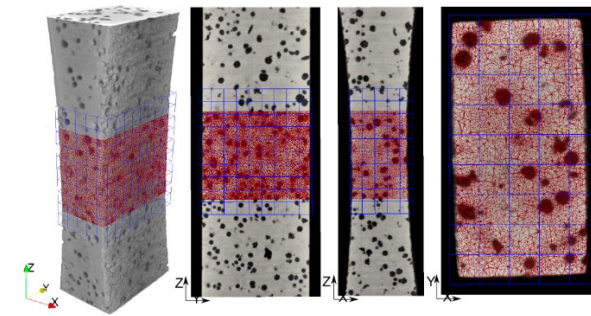
Jan Neggers - MSSMat, CentraleSupélec, CNRS, Université Paris-Saclay

Un jumeau numérique est une fusion entre un modèle (souvent la méthode des éléments finis, FEM) et une expérience. Du côté du modèle, souvent, des paramètres importants sont inconnus et doivent être calibrés à l'aide de l'expérience. Du côté expérimental, il est nécessaire de gérer l'incertitude de mesure. De plus, il existe de nombreuses grandeurs physiques presque impossibles à mesurer (par exemple, la déformation plastique, par rapport à la déformation totale) qui sont accessibles dans le modèle. Un mariage réussi entre les deux parties (c'est-à-dire un jumeau numérique) donne le meilleur des deux mondes.

Pour y parvenir, nous devons établir une forme de communication entre les deux mondes. À savoir, représenter avec précision la géométrie réelle (expérimentale) dans le modèle et synchroniser les conditions aux limites de sorte que les deux mondes coïncident. De plus, il est nécessaire de représenter les jeux de données en utilisant les mêmes systèmes de coordonnées et la même discrétisation. Les défis de cet aspect dépendent de la nature des données.

Lors de la création du jumeau numérique, nous devons décider quelles seront les quantités observables pertinentes qui formeront l'interface entre le modèle et l'expérience. Dans cet atelier, nous commencerons par utiliser la corrélation d'images numériques (DIC) pour mesurer le champ de déplacement d'une expérience de traction. Ce champ de déplacement est combiné à la force mesurée par la cellule d'effort à chaque instant. Les deux sont des mesures qui peuvent être reproduites par le modèle et donc comparées à l'aide de la mise à jour de la méthode des éléments finis (FEMU). En fin de compte, nous discuterons d'une méthode appelée Integrated DIC qui fusionne l'étape DIC avec l'étape FEMU en une seule opération. Cela modifie les données d'interface pour qu'elles soient désormais des images (valeurs de gris) et des forces mesurées.

Le cœur de l'atelier porte sur les méthodes inverses nécessaires pour minimiser la distance entre le monde expérimental et le monde numérique. Il deviendra clair qu'une méthode de Newton ordinaire offre un cadre élégant et pratique avec lequel créer le jumeau numérique à la fois par programmation et mathématiquement.



Une expérience synchrotron XCT in-situ combinée à un calcul par éléments finis prenant en compte la microstructure nodulaire