



*Sous réserve de l'avis des rapporteurs*

## Avis de soutenance

### **Mohamad Ali Nouredine**

Soutiendra publiquement ces travaux de thèse intitulés :

*Vers un jumeau numérique sismique multi-échelles en milieu géologique complexe : approche par méta modélisation via l'apprentissage machine et quantification des incertitudes.*

#### **Encadrants**

*M. Ababsa Fakhreddine*

*M. ElMeouche Rani*

*M. De Martin Florent*

*M. Sammuneh Muhammad Ali*

*M. Beaufils Mickael*

**23 octobre 2025 à 14 h**

ESTP

28 Avenue du Président Wilson

## Résumé

Un jumeau numérique (JN) est une représentation numérique dynamique et précise d'un système physique réel, permettant la simulation, l'analyse et la prédiction de son comportement en quasi-temps réel. Il repose sur l'intégration de données d'observation, de modèles mathématiques et d'algorithmes afin d'assurer une réplique numérique évolutive du système. Dans le domaine de la modélisation sismique appliquée aux infrastructures critiques telles que les barrages, les centrales nucléaires ou les ponts, le jumeau numérique vise à reproduire fidèlement la réponse dynamique de ces structures sous chargement sismique. La modélisation numérique haute fidélité, c'est-à-dire des modèles de calcul détaillés et rigoureux simulant les phénomènes physiques avec un haut niveau de réalisme, constitue le cœur prédictif du jumeau numérique. Elle repose sur des équations physiques pour simuler les effets du mouvement sismique du sol sur la structure. Cependant, l'incertitude importante liée aux paramètres géophysiques (tels que les vitesses d'ondes ou la géométrie des couches de sol), combinée à la complexité des phénomènes physiques en jeu, rend ces simulations haute fidélité coûteuses en calcul et peu pratiques pour une analyse exhaustive des incertitudes. Il devient donc essentiel de développer des approches conciliant précision et efficacité computationnelle, afin de quantifier efficacement l'impact des incertitudes sur la réponse dynamique (déplacements du sol, vitesses, etc.). Dans cette thèse, le jumeau numérique s'appuie sur un modèle physique haute fidélité basé sur l'équation de Navier (équation des ondes), résolue à l'aide de la méthode des éléments spectraux. Ce modèle est couplé à un métamodèle rapide, permettant une intégration efficace des incertitudes géophysiques et une génération accélérée de nouvelles simulations tout en conservant un niveau de précision acceptable. Pour construire un modèle rapide capable de reproduire la réponse dynamique d'une infrastructure critique (un barrage en terre dans cette étude) dans un espace d'entrée incertain, une stratégie de métamodélisation basée sur des algorithmes d'apprentissage automatique a été développée. Contrairement aux approches de substitution traditionnelles déjà explorées dans la littérature, telles que les développements en chaos polynomial généralisé ou les processus gaussiens (krigeage), les métamodèles testés dans ce travail, incluant des réseaux de neurones profonds (deep neural networks), des réseaux de neurones convolutionnels (CNNs) et des forêts aléatoires (random

forests), n'avaient pas encore été appliqués dans le contexte de la modélisation sismique haute fidélité d'un barrage dans un espace incertain de grande dimension. L'exploration de ces algorithmes permet de comparer leurs performances respectives, d'optimiser le compromis entre précision, rapidité et interprétabilité, et de mieux comprendre les relations complexes entre les paramètres géophysiques et la réponse dynamique du barrage. En apprenant à associer les caractéristiques géophysiques du sol à la réponse sismique, exprimée à la fois sous forme de séries temporelles et de représentations fréquentielles (amplitudes spectrales, composantes réelle et imaginaire), ces algorithmes permettent des prédictions quasi-instantanées, alors que les méthodes classiques nécessitent plusieurs heures de calcul sur des centaines de cœurs. Grâce à leur rapidité d'exécution, les métamodèles ne se contentent pas d'accélérer les prédictions : ils rendent également possibles des analyses approfondies telles que l'analyse de sensibilité globale. Celle-ci vise à identifier les paramètres incertains les plus influents sur la réponse sismique de l'infrastructure. L'approche repose sur le calcul des indices de Sobol à partir des prédictions du métamodèle, permettant de hiérarchiser les incertitudes en mettant en évidence les paramètres dominants responsables des variations de la réponse sismique. Ces résultats contribuent à une meilleure compréhension physique du système, ici composé de la source sismique, des profils régionaux de vitesses sismiques (modèle de Dorel) et du barrage en terre. La combinaison proposée de la métamodélisation basée sur l'apprentissage automatique et de l'analyse de sensibilité, dans un cadre de jumeau numérique, représente une avancée méthodologique significative. Elle permet de reproduire efficacement la réponse sismique d'un système complexe à un coût computationnel fortement réduit, tout en identifiant les paramètres géophysiques les plus influents. Cette approche permet une exploration rapide et approfondie de l'incertitude, auparavant difficilement réalisable avec les simulations numériques classiques. Les résultats sont particulièrement satisfaisants pour la prédiction de l'amplitude de la transformée de Fourier, tandis que les performances restent plus limitées pour la prédiction des séries temporelles de déplacement ou des composantes réelle et imaginaire du spectre. Ce cadre méthodologique s'avère particulièrement adapté à la gestion de systèmes complexes fondés sur la physique, où la compréhension des incertitudes et de leur influence est cruciale pour la prise de décision. Par ailleurs, le recours à la métamodélisation permet d'augmenter la confiance dans les résultats, notamment grâce à des estimations plus robustes rendues possibles par des techniques de validation telles que le bootstrap, qui montrent une faible déviation standard des erreurs et démontrent la stabilité des prédictions dans le cas de données d'entrée incertaines.

**Mots clés :** Jumeau numérique, Méta modélisation, Machine Learning, Equation d'onde, quantification des incertitudes.

## Composition du jury

---

<b>M. Michael Brun</b>	Professeur des universités, Université de Lorraine	Examineur
<b>M. Pierre Sochala</b>	HDR, Ingénieur de recherche, CEA	Rapporteur
<b>M. Farid Melgani</b>	Professeur des universités, Université de Trento	Rapporteur
<b>M. Eric Monteiro</b>	Maitre de Conférence, ENSAM	Examineur
<b>M. Fakhreddine Ababsa</b>	Professeur des universités, ENSAM	Examineur
<b>M. Rani El Meouche</b>	Professeur, ESTP	Examineur
<b>M. Florent De Martin</b>	PHD, Ingénieur de recherche, BRGM	Examineur
<b>M. Muhammad Ali Sammuneh</b>	Enseignant-Chercheur, ESTP	Examineur
<b>M. Mickael Beaufils</b>	PHD, Ingénieur de recherche, BRGM	Invité

---