

**Proposition de titre de la thèse :**

Une approche par méta-modèle d'identification des lois de comportements dédiées au soudage (Data-Driven modelling)

**Contacts :**

Anthony Gravouil, Professeur, LaMCoS, INSA de Lyon, [anthony.gravouil@insa-lyon.fr](mailto:anthony.gravouil@insa-lyon.fr)

Nawfal Blal, Maître de Conférences, LaMCoS, INSA de Lyon, [nawfal.blal@insa-lyon.fr](mailto:nawfal.blal@insa-lyon.fr)

**Contexte général et objectifs de la thèse – enjeux industriels**

Les évolutions thermiques associées au procédé du soudage conduisent à des champs mécaniques non-uniformes ayant des effets déterminants sur la tenue en mécanique des pièces assemblés. Dans l'objectif d'effectuer des simulations numériques prédictives, il est important de mieux appréhender l'influence des différents paramètres mis en jeu sur les différentes quantités d'intérêts (e.g. contraintes résiduelles et distorsion). L'objectif de cette thèse est de déterminer les paramètres matériau d'une loi de comportement non-linéaire permettant de mieux prédire les contraintes résiduelles obtenues à partir de mesures expérimentales. Vu l'aspect multiparamétrique de la loi retenue, le recours à des simulations numériques de type éléments finis pour l'identification inverse des paramètres de la loi proposée nécessiterait un coût conséquent pour les temps de calcul. L'idée est d'utiliser des techniques de type *data-driven* et réduction de modèle inspirées des techniques de l'Intelligence Artificielle pour écourter les temps de calcul.

**Etat de l'art et limitations – analyse des risques**

Les techniques d'apprentissage automatique ont émergé des domaines de la reconnaissance des formes et de la théorie de l'apprentissage computationnel. Elles jouent un rôle de plus en plus important dans la prédiction et la prise de décision basées sur les données à l'ère des algorithmes computationnels complexes. Les tâches d'apprentissage automatique sont généralement classées en trois catégories (Russell et al., 1995): supervisées, non supervisées et semi-supervisées. L'apprentissage supervisé consiste à tenter d'inférer une relation entre les entrées et les sorties des données d'apprentissage plutôt que de simplement regrouper les données en fonction de leur proximité les unes par rapport aux autres.

La théorie des variétés de forme récemment introduite (Raghavan et al., 2013a, 2013b, Meng et al., 2015, González et al., 2016, Meng et al., 2016) a été appliquée avec succès à divers problèmes de modélisation des matériaux et permet un nouveau protocole d'identification des paramètres matériaux (Xia et al., 2013, Le Quilliec et al., 2015).

Préalablement à l'utilisation des ces nouvelles techniques d'identification, la thèse s'appuiera dans un premier temps sur des techniques récentes de construction d'abaques numériques précis et robustes du soudage à grand nombre de paramètres. Ces travaux initiés dans le cadre de la chaire AREVA / SAFRAN avec le LaMCoS (2012/2017) ont permis d'atteindre les objectifs suivants pour la simulation tridimensionnelle transitoire thermo-mécanique couplée et multi-paramétrique du soudage (Lu, Blal, Gravouil, 2017a, 2017b, 2018):

- Aide à la Décision online / temps réel

- Approche « Sparse grid » adaptative : stratégie d'échantillonnage multi-échelles de l'espace multi-paramétrique quasi-optimale à précision contrôlée
- Stratégie de réduction de modèle à variables séparées efficace de type HOPGD (plus robuste que PARAFAC pour les applications visées). Validée jusqu'à 10 paramètres (matériaux, chargement, géométrie)

A partir de l'abaque numérique précédent dédié au soudage (et implémenté dans Code\_Aster), on pourra ensuite développer une approche de type data-driven pour l'identification inverse des lois de comportement correspondantes. Ainsi, à partir d'une base de données expérimentale, on cherchera l'ensemble des paramètres permettant de minimiser une certaine fonction objective (e.g. les contraintes résiduelles suivant l'axe transversal aux passes de la soudure). Cela consiste à résoudre un problème d'optimisation minimisant l'écart entre la solution numérique et la donnée expérimentale. Pour éviter de relancer des calculs EF complets en parcourant les différents points paramétriques (dans l'espace multidimensionnel des paramètres), une stratégie basée sur une représentation des champs thermo-mécaniques spatio-temporels sous forme de variables séparées sera utilisée (méthode HOPGD : *Higher Order Proper Orthogonal Decomposition*). Elle permettra d'actualiser et interpoler les quantités d'intérêt pour d'autres paramètres sans avoir besoin de relancer d'autres calculs coûteux. L'identification inverse peut être ainsi faite en croisant les données numériques obtenues par la HOPGD avec les données expérimentales.

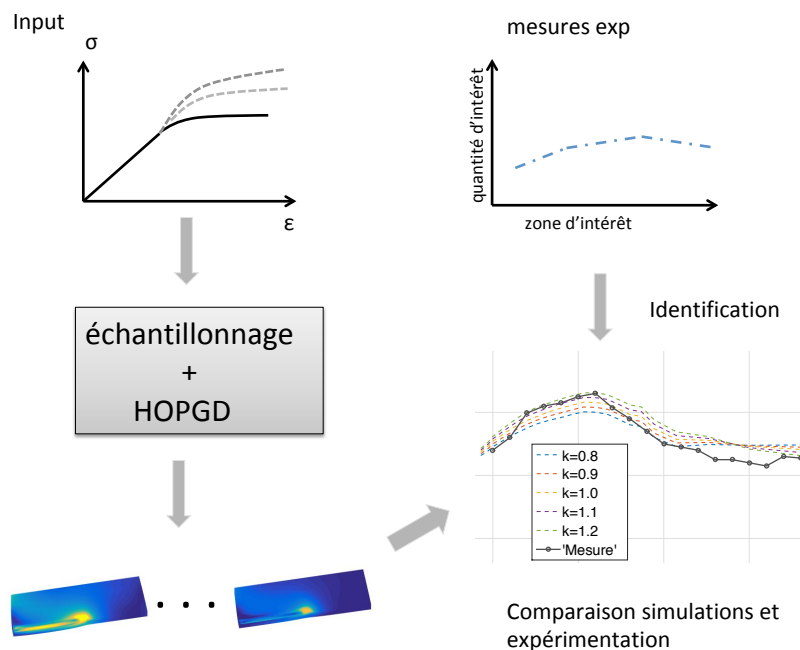


Figure 1 : schéma illustratif de la stratégie d'identification proposée (cas du TG4)

L'ensemble des concepts théoriques utilisés dans cette thèse est aujourd'hui bien maîtrisé. Les limitations concernent essentiellement le nombre de paramètres mis en jeu, l'exploitation de données expérimentales incomplètes et l'effet des incertitudes de mesure sur la stratégie d'identification.

### ***Déroulement de la thèse et planning de l'avancement sur 3 ans***

Cette thèse sera conduite conjointement par EDF R&D et le laboratoire du LaMCoS. L'encadrement académique sera assuré par Anthony Gravouil Professeur à l'INSA LYON et Nawfal Blal Maître de Conférences à l'INSA de LYON.

La première année débutera avec une étude bibliographique des techniques de data driven appliquées aux lois de comportement non-linéaires en mécanique du solide. On profitera dans cette phase pour étudier l'impact sur l'architecture de Code\_Aster des nouveaux algorithmes proposés. La phase offline de la construction des abaques numériques correspondants couplée à une approche de type data-driven pour l'identification du comportement sera d'abord effectuée à l'aide d'un démonstrateur de type matlab avec application au soudage. Pour cela, un modèle numérique de référence servira pour valider la stratégie d'identification.

La seconde année consistera à développer l'ensemble de la stratégie dans Code\_Aster à partir de modèles numériques de références déjà existants. Pour cela, la phase offline de construction de l'abaque numérique par réduction de modèle (HOPGD et sparse grids) sera validée par rapport au démonstrateur matlab. Ensuite, l'approche data-driven d'identification sera testée sur un modèle numérique de référence dédié au soudage. Ici, la précision, la robustesse et l'efficacité de la méthode sera testée au sein de Code\_Aster sur des applications de type soudage à vocations industrielles.

La troisième année sera consacrée à la mise en œuvre de la nouvelle approche d'identification sur des résultats expérimentaux. Dans ce contexte, une attention toute particulière sera donnée à la présence de données expérimentales non complètes, voire entachées d'erreurs de mesures. On démontrera à cette occasion la plus-value et la robustesse de la nouvelle méthode comparativement aux approches conventionnelles d'identification. La partie expérimentale sera traitée hors thèse. Les essais et maquettes TG6 pourront servir de support à la mise en œuvre des techniques numériques.

Il est prévu en deuxième et troisième année de thèse des communications scientifiques dans des conférences nationales et internationales, et au moins une publication dans une revue internationale à comité de lecture au cours de la thèse. Le temps de répartition du futur doctorant sera 1/3 au laboratoire LaMCoS et de 2/3 au sein de l'équipe de développement de Code\_Aster.

### ***Profil souhaité***

- Développement informatique dans un code de calcul élément fini ;
- Bonnes connaissances en mécanique numérique (thermodynamique non-linéaire des milieux continus solides + analyse numérique dédiée aux éléments finis) ;
- Capacité d'adaptation et d'autonomie dans un environnement de développement de code.

### ***Bibliographie***

1) Lu Y., Blal N., Gravouil A, Multi-parametric space-time computational vademecum for parametric studies : application to real time welding simulations, FEAD, 2017, accepted.

- 2) Lu Y., Blal N., Gravouil A, Adaptative sparse grid based HOPGD : towards a non-intrusive strategy for constructing space-time computational vademecum of welding, IJNME, 2017, under review.
- 3) Lu Y., Blal N., Gravouil A, Real time space-time POD based computational vademecums for parametric studies : application to thermo-mechanical problems, AMSES, 2017, accepted.
- 4) Russell, S., Norvig, P., Intelligence, A., 1995. A modern approach. Artif. Intell. 25, 27. Prentice-Hall, Englewood Cliffs
- 5) Raghavan, B., Xia, L., Breitkopf, P., Rassineux, A., Villon, P., 2013. Towards simultaneous reduction of both input and output spaces for interactive simulation-based structural design. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 265, 174–185.
- 6) Meng, L., Breitkopf, P., Raghavan, B., Mauvoisin, G., Bartier, O., Hernot, X., 2015. Identification of material properties using indentation test and shape manifold learning approach. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 297, 239–257.
- 7) Meng, L., Breitkopf, P., Quilliec, G.L., Raghavan, B., Villon, P., 2016. Nonlinear shape-manifold learning approach: concepts, tools and applications. Arch. Comput. Methods Eng. 1–21.. doi:10.1007/s11831-016-9189-9.
- 8) González, D., Cueto, E., Chinesta, F., 2016. Computational patient avatars for surgery planning. Ann. Biomed. Eng. 44 (1), 35–45.
- 9) Xia, L., Raghavan, B., Breitkopf, P., Zhang, W., 2013. Numerical material representation using proper orthogonal decomposition and diffuse approximation. Appl. Math. Comput. 224, 450–462.
- 10) Le Quilliec, G., Raghavan, B., Breitkopf, P., 2015. A manifold learning-based reduced order model for springback shape characterization and optimization in sheet metal forming. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 285, 621–638.