



Planification optimale bayésienne d'essais dynamiques

Lieu du stage : CEA/DAM Île-de-France

Date de début du stage : février/mars 2027

Durée du stage : 6 mois

Encadrants : Anthony QUINTIN (CEA/DAM/DIF) et Tom PETIT (CEA/DAM/Gramat)

Contexte et objectif

Le CEA/Gramat, acteur majeur de la recherche au service de la défense, étoffe ses capacités expérimentales de caractérisation des matériaux en dynamique rapide grâce à l'acquisition de deux systèmes de barres d'Hopkinson, en compression et en traction. Chaque essai fournit une courbe de contrainte-déformation du matériau testé et contribue à l'**identification des paramètres d'une loi de comportement**, par exemple ici de type Johnson-Cook (JC) [1]. La loi de JC et les conditions expérimentales définissent ensemble un modèle $G(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta})$, qui prédit la sortie $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^K$ pour une configuration d'essai $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$ et un vecteur de paramètres $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^5$.

Les paramètres $\boldsymbol{\theta}$ étant inconnus pour un matériau donné, l'objectif est de les estimer le plus précisément possible. Cependant, les campagnes expérimentales sont coûteuses et le nombre d'essais réalisables reste limité. Dans ce contexte d'inférence statistique avec peu de données, la **planification d'expériences** s'impose pour tirer le maximum d'information de chaque essai. Le stage vise à développer un algorithme capable de **sélectionner séquentiellement les configurations d'essai $\mathbf{x}$** qui permettent de réduire au mieux l'incertitude d'estimation de $\boldsymbol{\theta}$.

Pour répondre à cet objectif, la **planification optimale d'expériences bayésienne** (*Bayesian Optimal Experimental Design*) [2–4] formule le choix d'un nouvel essai comme un problème d'optimisation d'un **critère d'utilité espérée**. On s'intéressera notamment à l'*Expected Information Gain* (EIG), qui mesure l'information que l'on s'attend à acquérir sur les paramètres $\boldsymbol{\theta}$ grâce à un nouvel essai. Ce critère est défini comme l'espérance, sur les observations futures possibles, de la divergence de Kullback-Leibler entre la loi *a posteriori* des paramètres après l'essai et leur loi *a priori* avant l'essai.

Missions

Le stage se déroulera dans un contexte d'analyse numérique, où le modèle JC jouera le rôle de **générateur virtuel d'essais**. Les essais seront ainsi simulés à partir du modèle G , pour une valeur de référence $\boldsymbol{\theta}_{\text{ref}}$ fixée, en tenant compte d'un bruit gaussien représentant les incertitudes de mesure.

Quatre étapes de difficulté croissante sont envisagées.

1. Réaliser une étude bibliographique de la planification optimale d'expériences bayésienne, des différents critères d'utilité et des méthodes de résolution numérique associées.
2. Estimer la loi *a posteriori* des paramètres $\boldsymbol{\theta}$ par des méthodes de Monte-Carlo par chaînes de Markov (*Markov Chain Monte Carlo*, MCMC). Le travail commencera avec un nombre réduit de paramètres, puis s'étendra au modèle complet.
3. Estimer numériquement le critère d'utilité. Dans le cas de l'EIG, son calcul fait intervenir des espérances emboîtées et peut être approché par un estimateur de Monte-Carlo à double boucle (*Nested Monte Carlo*). Des estimateurs moins coûteux seront également étudiés, notamment à partir d'une approximation de Laplace de la loi *a posteriori*.
4. Optimiser séquentiellement les configurations d'essai $\mathbf{x}$, puis quantifier le gain obtenu par rapport à des plans d'expériences naïfs (grille régulière, tirages aléatoires), à nombre d'essais égal.

Le stage donnera lieu à un rapport scientifique et à une présentation orale des travaux.

Environnement et encadrement

Vous travaillerez au sein d'une unité du **CEA/DAM Île-de-France** développant des méthodes de quantification d'incertitudes et de machine learning. Le stage s'appuiera sur des échanges réguliers avec des collègues du CEA/Gramat spécialisés en mécanique des matériaux.

Profil recherché

Le profil demandé pour ce **stage axé recherche** est celui d'un.e étudiant.e en M2 ou dernière année d'école d'ingénieur avec une spécialisation en mathématiques appliquées / machine learning. Un goût prononcé pour les **probabilités**, les **statistiques**, la **programmation (Python ou R)** et la **recherche** est essentiel. Une appétence pour la mécanique des matériaux est un atout, mais n'est pas indispensable.

Informations pratiques

La gratification est de **1 400 € brut par mois**. Le forfait Navigo est remboursé à hauteur de 75 %. L'accès au site peut s'effectuer par les navettes affrétées par le CEA desservant de nombreuses communes d'Île-de-France.

Engagements et informations réglementaires

Conformément aux engagements pris par le CEA en faveur de l'intégration des personnes handicapées, cet emploi est ouvert à toutes et à tous. Le CEA propose des aménagements et des possibilités d'organisation pour l'inclusion des travailleurs handicapés.

Le CEA participant à la protection nationale, une enquête administrative est réalisée pour tous ses collaborateurs afin d'assurer l'intégrité et la sécurité de la nation.

Candidature

Un **CV**, une **lettre de motivation** et un **relevé de notes de M1** sont à envoyer à anthony.quintin2@cea.fr et tom.petit@cea.fr.

Références

- [1] D. J. Walters, A. Biswas, E. C. Lawrence, D. C. Francom, D. J. Luscher, D. A. Fredenburg, K. R. Moran, C. M. Sweeney, R. L. Sandberg, J. P. Ahrens, and C. A. Bolme. Bayesian calibration of strength parameters using hydrocode simulations of symmetric impact shock experiments of Al-5083. *Journal of Applied Physics*, 124(20) :205105, 2018. doi:[10.1063/1.5051442](https://doi.org/10.1063/1.5051442).
- [2] Elizabeth G. Ryan, Christopher C. Drovandi, James M. McGree, and Anthony N. Pettitt. A review of modern computational algorithms for bayesian optimal design. *International Statistical Review*, 84(1) :128–154, 2016. doi:doi.org/10.1111/insr.12107.
- [3] D.E. Ricciardi, D.T. Seidl, B.T. Lester, A.R. Jones, and E.M.C. Jones. Bayesian optimal experimental design for constitutive model calibration. *International Journal of Mechanical Sciences*, 265 :108881, 2024. ISSN 0020-7403. doi:doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108881.
- [4] Xun Huan, Jayanth Jagalur, and Youssef Marzouk. Optimal experimental design : Formulations and computations. *Acta Numerica*, 33 :715–840, 2024. doi:[10.1017/S0962492924000023](https://doi.org/10.1017/S0962492924000023).