

Proposition de Stage de niveau Master 2 en Mathématiques Appliquées

Placement robuste et optimal de capteurs pour les problèmes
inverses bayésiens non-linéaires

IFP Énergies Nouvelles

Lieu : Département de mathématiques appliquées à IFPEN Rueil-Malmaison

Durée du stage : 6 mois (thèse post-stage non-prévus).

Date de démarrage : à partir de Mars 2027

Encadrement : Miguel MUNOZ ZUNIGA (IFPEN) et Jean-Lou PFISTER (IFPEN).

Ce stage se déroulera également dans le cadre d'une collaboration scientifique entre le CEA et l'IFPEN avec des réunions d'échanges prévues.

Contexte et Enjeux

L'optimisation du placement de capteurs (Optimal Experimental Design - OED) est une étape primordiale pour les problèmes inverses bayésiens, où l'on cherche à actualiser la connaissance de paramètres incertains en combinant des données expérimentales et un modèle physique, généralement régi par des équations aux dérivées partielles (EDP) [1]. Lorsque le modèle d'observation présente des incertitudes additionnelles (erreurs de modèle ou paramètres de nuisance), il est nécessaire de formuler un problème de conception d'expériences robuste (ROED) en adoptant une approche pire cas, c'est-à-dire une optimisation de type max-min.

La résolution de ce problème combinatoire est extrêmement exigeante d'un point de vue calculatoire. Des approches récentes proposent de formuler ce problème d'optimisation de manière probabiliste pour les problèmes inverses linéaires [3] avant d'être étendues aux cadres non-linéaires en dimension infinie [2]. Plus spécifiquement, la modélisation de la configuration des capteurs comme une variable aléatoire suivant une loi de Bernoulli conditionnelle permet d'utiliser des méthodes d'optimisation basées sur le gradient, garantissant le respect strict de la contrainte de budget sans avoir à recourir à des méthodes de pénalité [4].

Objectif du stage

L'objectif principal de ce stage est d'étudier cette nouvelle méthodologie de ROED probabiliste pour les problèmes inverses non-linéaires [2] et de la reproduire intégralement sur des cas "jouets" maison. Ce travail permettra de comprendre finement l'architecture algorithmique, de maîtriser le coût calculatoire lié aux EDP et d'évaluer la robustesse des solutions obtenues face aux paramètres de nuisance.

Travail demandé

L'étudiant(e) sera amené(e) à réaliser les tâches suivantes :

- Appropriation du cadre mathématique de l'inversion bayésienne en dimension infinie, incluant l'utilisation de l'approximation de Laplace pour la caractérisation de la mesure a posteriori [2].
- Implémentation du calcul de l'utilité, définie par le gain d'information attendu.
- Développement de l'analyse de sensibilité par la méthode de l'adjoint (incrément de l'état et de l'adjoint) pour évaluer de manière efficace le Hessien de la fonction coût [1].
- Mise en œuvre d'une approximation de rang faible du Hessien pour accélérer le calcul du gain d'information espéré.
- Développement de l'algorithme d'optimisation ROED en utilisant une formulation probabiliste où le budget maximal de capteurs est strictement géré par une distribution de Bernoulli conditionnelle [4].
- Résolution du problème d'optimisation de type pire cas (max-min) via l'algorithme de Polyak.
- Validation numérique sur des codes maison appliqués à des modèles EDP simples en 1D ou 2D.

Pré-requis

- Solides connaissances en mathématiques appliquées : probabilités, statistiques bayésiennes, et optimisation continue.
- Notions en équations aux dérivées partielles et en méthodes de résolution numérique (éléments finis ou différences finies).
- Maîtrise d'un langage de programmation scientifique (Python, R, C, etc.).

Références

- [1] A. Alexanderian, R. Nicholson, and C. Petra, *Optimal design of large-scale nonlinear Bayesian inverse problems under model uncertainty*, **Inverse Problems**, IOP Publishing, 40(9), 095001, 2024.
- [2] A. Chowdhary, A. Attia, and A. Alexanderian, *Robust Optimal Experimental Design of Infinite-Dimensional Bayesian Nonlinear Inverse Problems*, **SIAM Journal on Scientific Computing**, vol.48, 2025.
- [3] A. Attia, S. Leyffer, and T. Munson, *Robust A-Optimal Experimental Design for Sensor Placement in Bayesian Linear Inverse Problems*, **SIAM/ASA Journal on Uncertainty Quantification**, 13(2), 744-774, 2025.
- [4] A. Attia, *Probabilistic approach to black-box binary optimization with budget constraints : application to sensor placement*. **Inverse Problems**, IOP Publishing, 42(8), 085002, 2026.

Contacts

Un CV, une lettre de motivation et vos relevés de notes les plus récents sont à envoyer à Miguel MUNOZ ZUNIGA : miguel.munoz-zuniga@ifpen.fr
Jean-Lou PFISTER : jean-lou.pfister@ifpen.fr