

Sujet de postdoc: Modélisation statistique des déformations des alvéoles de stockage de déchets nucléaires

M. Pereira¹, J. Cotton²

¹Mines Paris – PSL

²ANDRA

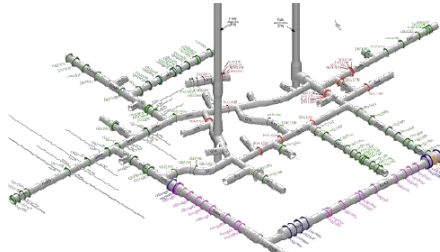
Séminaire de la chaire Geolearning

13-14 Novembre 2023



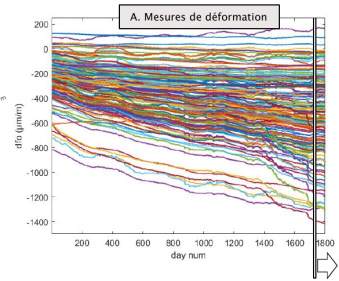
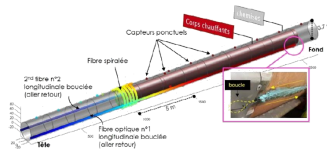
■ CONTEXTE: SURVEILLANCE DES ALVÉOLES

- Objectif: Pouvoir l'évolution de la galerie durant sa phase de fonctionnement à partir de mesures effectuées par des capteurs (ex: température, déformation)
- Challenges: En pratique,
 - Nombre limité de capteurs → Mesures non exhaustives
 - Pannes → Données manquantes
 - Bruits de mesure et défaillances des capteurs → Données bruitées, biaisées ou incohérentes
- Besoin de méthodes robustes permettant de pallier à ces limites



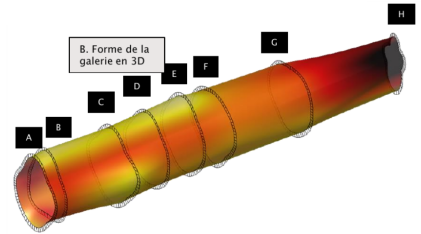
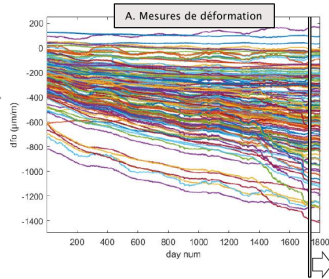
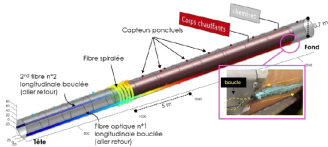
■ CAS D'ÉTUDE: DONNÉES DU DÉMONSTRATEUR D'ALVÉOLE HA

- Dispositif expérimental permettant d'étudier l'impact d'un chargement thermique sur l'alvéole
 - Permet de reproduire au moyen de résistances chauffantes la montée en température due à la présence de déchets Haute Activité (HA) dans une alvéole
 - Défaillances observées sur certaines fibres (discontinuités optiques)
- Instrumentation exhaustive (fibres optiques, capteurs ponctuels): mesures de température et de déformation



■ CAS D'ÉTUDE: DONNÉES DU DÉMONSTRATEUR D'ALVÉOLE HA

- Dispositif expérimental permettant d'étudier l'impact d'un chargement thermique sur l'alvéole
 - Permet de reproduire au moyen de résistances chauffantes la montée en température due à la présence de déchets Haute Activité (HA) dans une alvéole
 - Défaillances observées sur certaines fibres (discontinuités optiques)
- Reconstruction de la surface de l'alvéole par interpolation des mesures

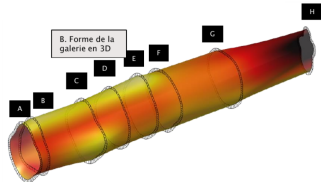
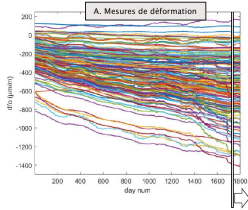


Reconstruction de la surface par interpolation

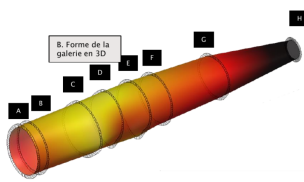
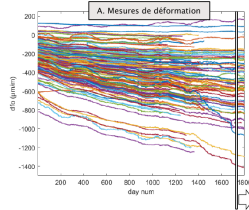
■ TRAVAUX PRÉLIMINAIRES (ANDRA)

- Étude de la résilience vis-à-vis de pannes de capteurs: “Simulation” de pannes et reconstruction de la surface de l'alvéole (par interpolation)

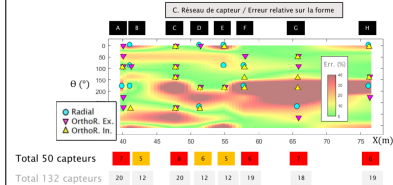
Données complètes (sans panne)



Données incomplètes (pannes)



Comparaison



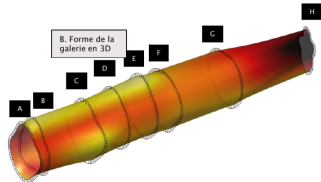
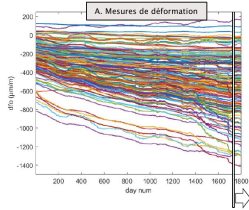
Écarts importants dus aux données manquantes

→ Idée: Estimer les données manquantes (par un algorithme de ML)

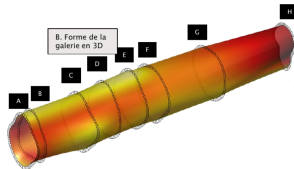
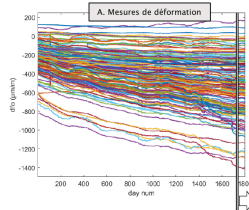
■ TRAVAUX PRÉLIMINAIRES (ANDRA)

- Étude de la résilience vis-à-vis de pannes de capteurs: “Simulation” de pannes et reconstruction de la surface de l'alvéole (par interpolation)

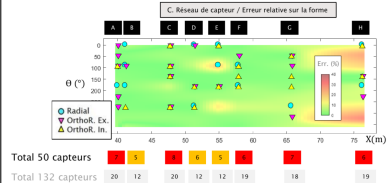
Données complètes (sans panne)



Données reconstruites par ML (Robust PCA)



Comparaison



Grosse réduction des erreurs ...
... Mais aucune quantification d'incertitudes



Objectif: Développer un modèle statistique permettant:

- La reconstruction de données manquantes (interpolation temporelle)
- La reconstruction de champs de déformation définis sur toute la surface de l'alvéole (interpolation spatiale)
- La prédiction de l'évolution future des déformations
- La quantification de l'incertitude de ces prédictions/reconstructions
- Une robustesse vis-à-vis de données manquantes (provenant par exemple de pannes de certains capteurs) et/ou bruitées
- L'identification de potentielles dérives de certains capteurs



Challenges

- Prendre en compte les corrélations spatiales et temporelles observées dans les données
- Construire des modèles statistiques pour des données spatio-temporelles distribuées sur des surfaces
- Méthodes efficaces de calculs des interpolations
- Méthodes efficaces d'inférence du modèle et de quantification d'incertitudes

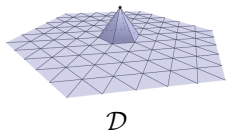
■ POINT DE DÉPART: L'APPROCHE SPDE

- Champ aléatoire Z sur un domaine $\mathcal{D}$, défini comme solution d'une équation à dérivées partielles stochastique (SPDE en anglais)

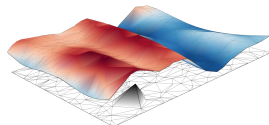
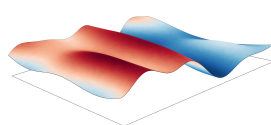
$$(\kappa^2 - \Delta)^\alpha Z = \tau \mathcal{W}$$

- κ^2 : Portée de corrélation
- α : Différentiabilité du champ
- τ : Variance du champ

- Permet d'allier complexité du modèle (non-stationarité, domaines non euclidiens) à l'efficacité numérique des méthodes de résolution d'EDP (éléments finis) (cf. [Lindgren et al. \(2011\)](#), [Lindgren et al. \(2022\)](#), [Pereira et al. \(2022\)](#))



$$\rightarrow Z(p) = \sum_{j=1}^n Z_j \psi_j(p) \rightarrow$$



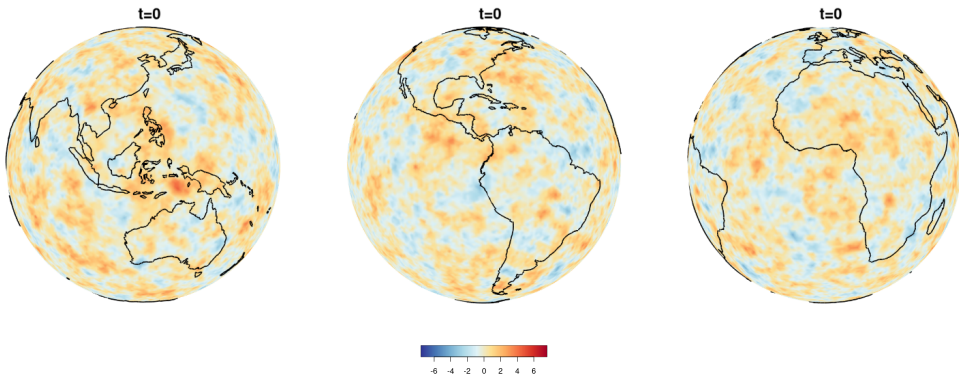
"Vraie" solution (*Gauche*) et son approximation par éléments finis (*Droite*)

■ CHAMPS ALÉATOIRE SPATIO-TEMPOREL SUR UNE SURFACE



- Équation d'advection-diffusion stochastique (cf. [Clarotto et al. \(2022\)](#))

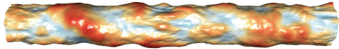
$$\frac{\partial \mathcal{Z}}{\partial t} + \frac{1}{c} \left((\kappa^2 - \Delta_{\mathcal{M}})^{\alpha} \mathcal{Z} + \operatorname{div}_{\mathcal{M}}(\mathcal{Z} \gamma) \right) = \frac{\tau}{\sqrt{c}} \mathcal{W}_T \otimes \mathcal{Y}_S,$$



■ EX: MODÉLISATION DE DÉFORMATIONS SUR UN TUBE



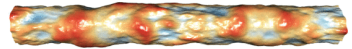
t=1



t=1



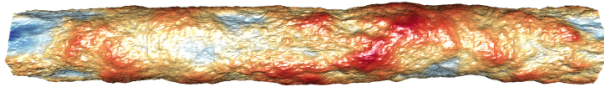
t=1



■ EX: MODÉLISATION DE DÉFORMATIONS SUR UN TUBE



$t=1$





■ REFERENCES

- Clarotto, L., Allard, D., Romary, T., and Desassis, N. (2022). The spde approach for spatio-temporal datasets with advection and diffusion. *arXiv preprint arXiv:2208.14015*.
- Lindgren, F., Bolin, D., and Rue, H. (2022). The spde approach for gaussian and non-gaussian fields: 10 years and still running. *Spatial Statistics*, 50:100599.
- Lindgren, F., Rue, H., and Lindström, J. (2011). An explicit link between gaussian fields and gaussian markov random fields: the stochastic partial differential equation approach. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 73(4):423–498.
- Pereira, M., Desassis, N., and Allard, D. (2022). Geostatistics for large datasets on riemannian manifolds: a matrix-free approach. *arXiv preprint arXiv:2208.12501*.