

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

M. Pereira¹, J. Cotton²

¹Mines Paris – PSL

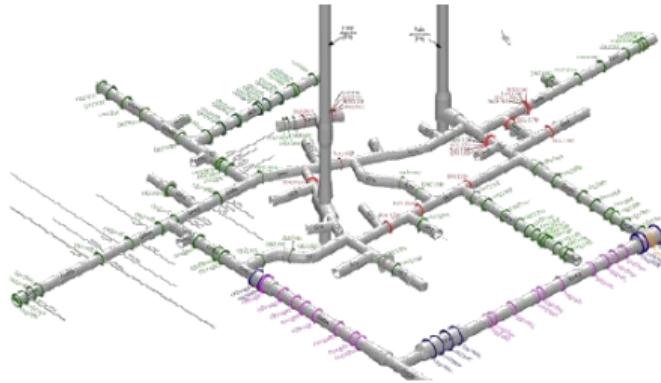
²ANDRA

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

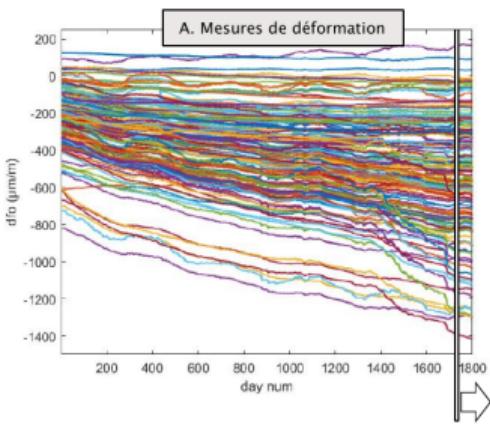
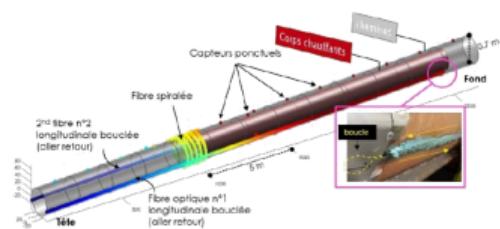


Postdoc Geolearning - ANDRA

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



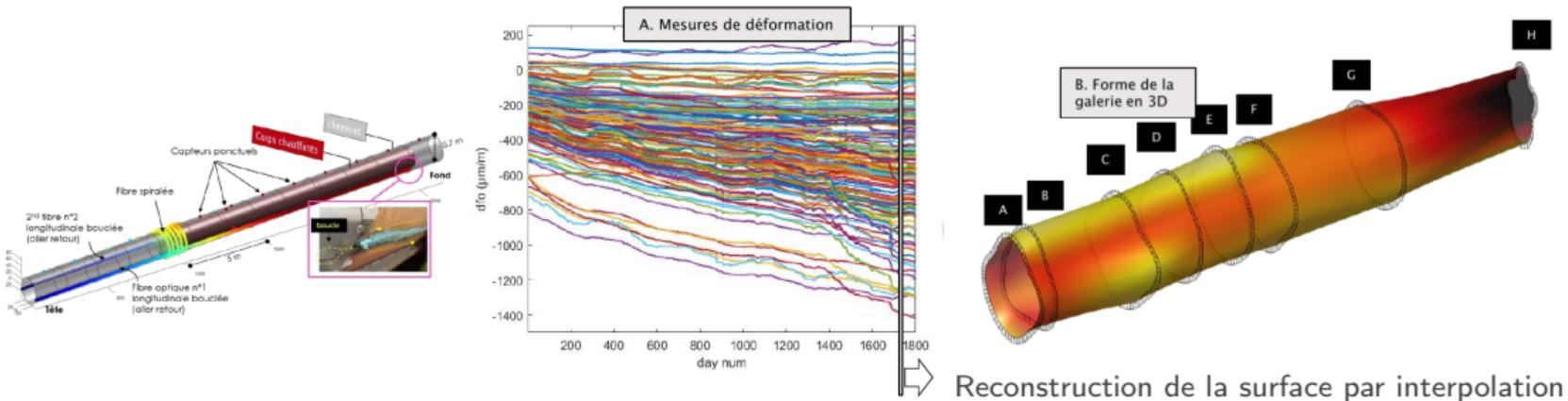
- Dispositif expérimental permettant d'étudier l'impact d'un chargement thermique sur l'alvéole
 - Permet de reproduire au moyen de résistances chauffantes la montée en température due à la présence de déchets Haute Activité (HA) dans une alvéole
 - Défaillances observées sur certaines fibres (discontinuités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



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



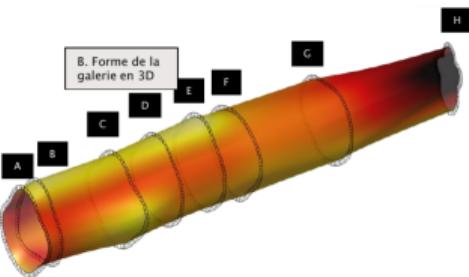
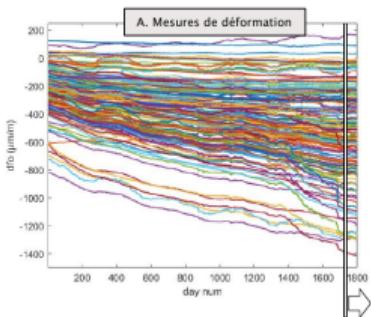
- Dispositif expérimental permettant d'étudier l'impact d'un chargement thermique sur l'alvéole
 - Permet de reproduire au moyen de résistances chauffantes la montée en température due à la présence de déchets Haute Activité (HA) dans une alvéole
 - Défaillances observées sur certaines fibres (discontinuités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



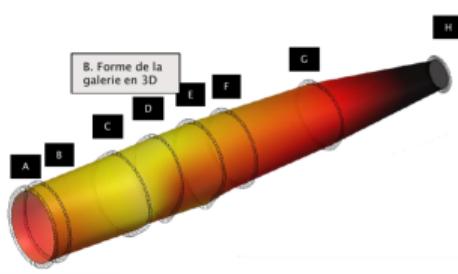
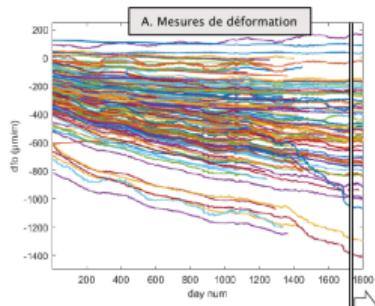
■ TRAVAUX PRÉLIMINAIRES (ANDRA)

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

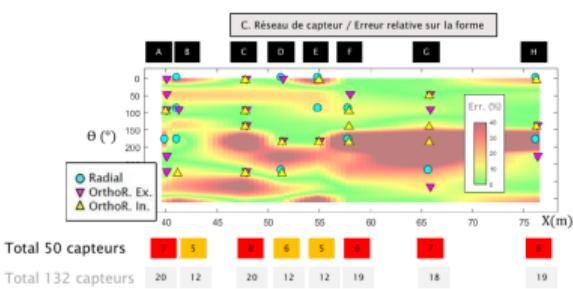
Données complètes (sans panne)



Données incomplètes (pannes)



Comparaison



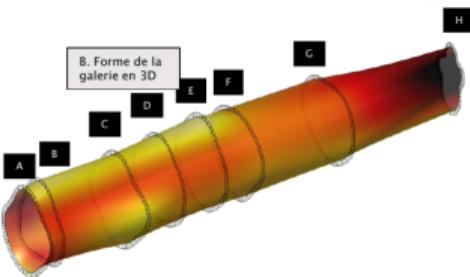
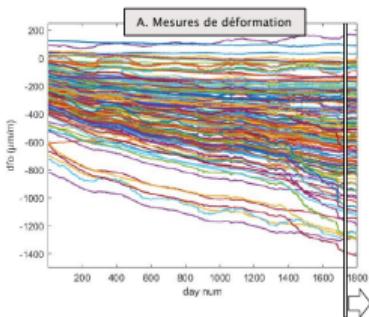
Écarts importants dus aux données manquantes

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

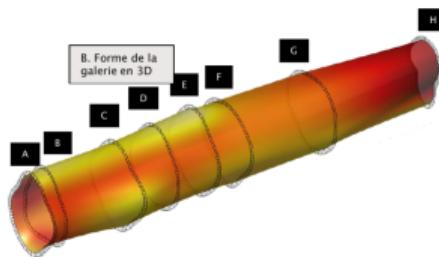
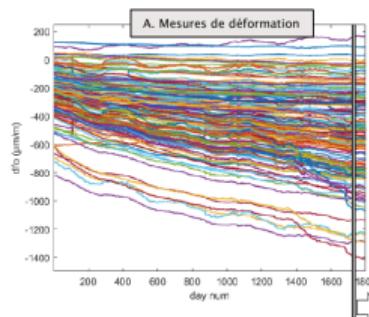
■ TRAVAUX PRÉLIMINAIRES (ANDRA)

- 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)

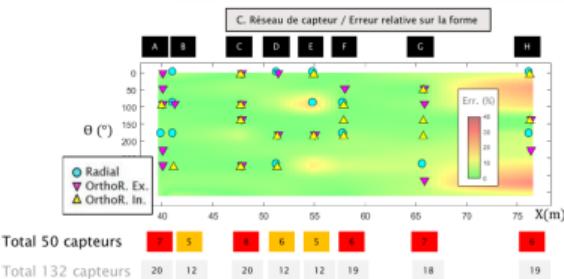


Données reconstruites par ML (Robust PCA)



Postdoc Geolearning - ANDRA

Comparaison



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



■ OBJECTIFS ET CHALLENGES DU PROJET DE POSTDOC

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



■ OBJECTIFS ET CHALLENGES DU PROJET DE POSTDOC

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

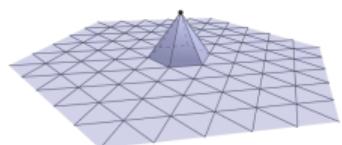
■ POINT DE DÉPART: L'APPROCHE SPDE

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

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

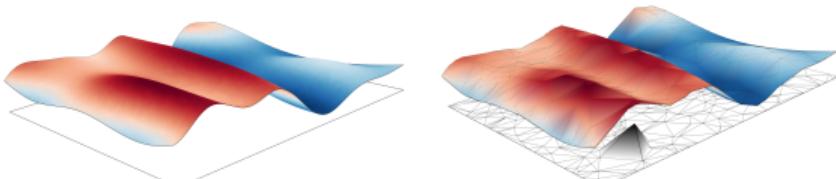
- κ^2 : Portée de corrélation
- α : Différentiabilité du champ
- τ : Variance du champ

- Permet d'allier complexité du modèle (non-stationnarité, 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. \(2022\)](#))



\mathcal{D}

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

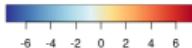


“Vraie” solution (*Gauche*) et son approximation par éléments finis (*Droite*)

■ 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



■ EX: MODÉLISATION DE DÉFORMATIONS SUR UN TUBE



■ 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*.