

Offre de thèse (36 mois)

Reconstruction de champs et identification de source dans les écoulements de polluants en milieu ventilé par apprentissage profond informé par la physique

LEMMA (UMR 7563 CNRS – Université de Lorraine) · INRS · ASNR
Vandœuvre-lès-Nancy | Début : octobre 2026 – janvier 2027

Contexte et problématique

Dans les environnements de travail, les salariés peuvent être exposés à des polluants gazeux ou particulaires issus de procédés industriels. Ces émissions chimiques, biologiques ou radiologiques surviennent aussi bien en situation normale qu'accidentelle. Les mesures ambiantes permettant de suivre la dispersion des polluants dans le local sont généralement limitées à quelques capteurs ponctuels, insuffisants pour caractériser finement la répartition spatiale des concentrations.

La dispersion du polluant dans l'air ventilé est régie par l'équation d'advection-diffusion :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) c = \nabla \cdot (D \nabla c) + S(\mathbf{x}, t; \boldsymbol{\theta}),$$

où c est la concentration du polluant, $\mathbf{u}$ le champ de vitesse de l'air, D la diffusivité effective, et S le terme source paramétré par $\boldsymbol{\theta}$ (position, forme, intensité d'émission). En situation réelle, le champ $c(\mathbf{x}, t)$ et les paramètres $\boldsymbol{\theta}$ sont *inconnus* : on ne dispose que d'un signal discret de capteurs, bruité et éparé.

La thèse s'attaque à deux problèmes distincts et complémentaires :

- la **reconstruction de champ** : estimer $c(\mathbf{x}, t)$ sur l'ensemble du domaine à partir des mesures disponibles, en exploitant l'EDP comme contrainte physique ;
- l'**identification de source** : retrouver $\boldsymbol{\theta}$ à partir du signal des capteurs, avec une exigence de **temps réel** pour permettre une réponse opérationnelle rapide.

Approche scientifique

Reconstruction de champ : PINNs comme régularisation variationnelle

Les *Physics-Informed Neural Networks* (PINNs) formulent la reconstruction comme la minimisation d'une fonctionnelle combinant un terme d'attache aux données de capteurs et un résidu de l'équation d'advection-diffusion, imposant la physique comme régularisant. La sensibilité au placement des capteurs et aux hyperparamètres de pondération sera analysée rigoureusement.

Un prototype 2D développé lors d'un stage M2 préparatoire valide l'approche sur un cas de fuite gaussienne stationnaire. La thèse étendra ce socle au cas 3D instationnaire dans un local ventilé et au problème inverse de source couplé.

Identification de source et reconstruction en temps réel : pipeline surrogat–inversion

Pour répondre à l'exigence opérationnelle du temps réel, la thèse développera un pipeline en deux phases :

1. **Surrogat rapide.** Un opérateur neuronal (Fourier Neural Operator ou DeepONet) sera entraîné pour approcher l'opérateur solution $\theta \mapsto c(\cdot; \theta)$. Ce surrogat permet d'évaluer le champ de concentration pour un très grand nombre de configurations sources en un temps négligeable.
2. **Génération de données et apprentissage de l'inversion.** Le surrogat est exploité pour produire une base de données synthétique massive de paires (configuration source, signal capteurs). Un réseau d'inversion apprend alors la correspondance directe

$$\text{signal capteurs} \mapsto \theta,$$

entraîné hors ligne et déployable en temps réel lors d'un incident.

Cette partie constitue la composante la plus exploratoire de la thèse ; son développement sera conditionné aux résultats obtenus sur la reconstruction de champ par PINNs.

Données

Les simulations CFD servant de données d'entraînement et de référence seront produites par l'INRS. Des données expérimentales acquises à l'ASNR en enceinte ventilée instrumentée serviront de validation finale. Un intérêt pour les techniques d'élaboration des bases de données numériques et expérimentales est attendu.

Objectifs

- Reconstruire un champ 3D de concentration à partir de mesures éparées en imposant la contrainte EDP ; quantifier l'influence du nombre et du placement des capteurs sur la qualité de reconstruction.
- Formuler et résoudre le problème inverse d'identification de source couplé à la reconstruction de champ.
- Développer le pipeline surrogat–inversion pour l'identification de source en temps réel.
- Valider l'ensemble sur données expérimentales réelles (enceinte ventilée INRS/ASNR).

Profil recherché

Formation : Master recherche ou diplôme d'ingénieur en **mathématiques appliquées** ou en **mécanique/physique à forte composante numérique**, avec une base solide en :

- équations aux dérivées partielles et analyse numérique ;
- optimisation et/ou méthodes inverses ;
- mécanique des fluides ou méthodes spectrales (atout fort).

Compétences attendues : programmation scientifique Python (NumPy, PyTorch), pratique de l'apprentissage profond, capacité à travailler à l'interface mathématiques–physique–calcul numérique.

Atouts appréciés : connaissance des méthodes d'assimilation de données, expérience avec les opérateurs neuronaux ou les méthodes de réduction de modèle, traitement de données expérimentales.

Cadre et partenaires

La thèse s'inscrit dans une collaboration entre trois partenaires aux expertises complémentaires :

- **LEMETA** (UMR 7563 CNRS – Université de Lorraine) : encadrement académique, expertise en apprentissage informé par la physique et mécanique des fluides numérique.
- **INRS** (Institut National de Recherche et de Sécurité) : expertise en ventilation industrielle, production de données CFD, données expérimentales en environnement de travail.

— **ASNR** (Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection) : moyens expérimentaux, physique des aérosols, problématiques de radioprotection.

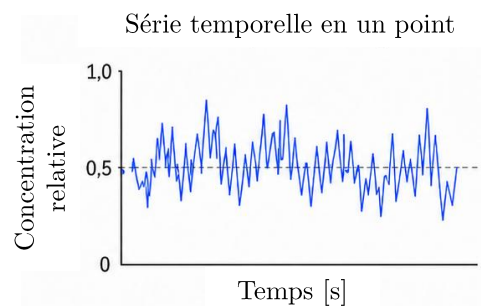
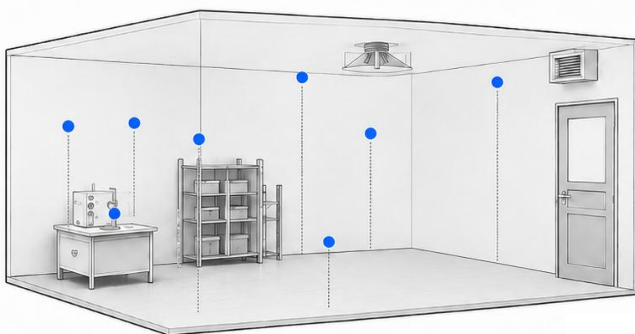
Cette thèse offre l'opportunité de travailler à l'interface entre mécanique des fluides, mathématiques appliquées et apprentissage profond, avec des retombées directes en évaluation de l'exposition professionnelle, optimisation de la ventilation et radioprotection.

Mots-clés : problèmes inverses, assimilation de données, reconstruction de champs, identification de source, équation d'advection-diffusion, Physics-Informed Neural Networks, opérateurs neuronaux, apprentissage profond, mécanique des fluides, ventilation.

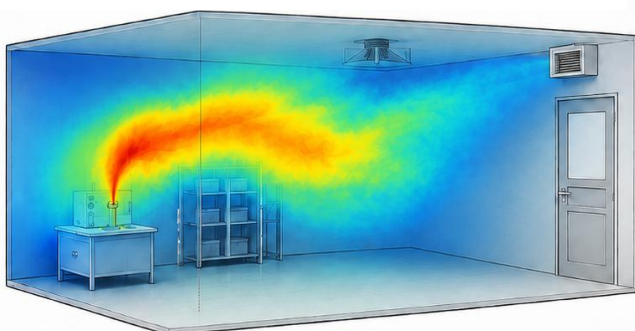
Contact :

Yoann CHENY (Maître de conférences, LEMTA, Université de Lorraine) yoann.cheny@univ-lorraine.fr

De mesures partielles...



...à un champ de concentration complet



Faible  Elevée
Concentration relative

Applications

-  Evaluation de l'exposition des travailleurs
-  Optimisation de la ventilation
-  Aide à la décision et à la prévention
-  Validation de modèles et de dispositifs de protection