



## **Expériences numériques avec des modèles spatio-temporels**

Rencontre Ingénieurs–Chercheurs  
« Appréhender la grande dimension »

6 juin 2019

Sylvain Girard

[girard@phimeca.com](mailto:girard@phimeca.com)

# Porte-folio d'applications

## 0. 3 méthodes en bref

- ▶ Analyse en composantes principales (ACP)
- ▶ Régression inverse par tranches
- ▶ Modèle auto-associatif

1. **Sûreté nucléaire** : scalaires → séries temporelles

2. **Usines en mer** : signaux oscillants → scalaire

3. **Pollution atmosphérique** : séries temporelles → cartes

# Analyse en composantes principales (ACP)



Méthode centenaire, robuste, facile à comprendre et appliquer.

← Karl Pearson (1901) « *On lines and planes of closest fit to systems of points in space* »

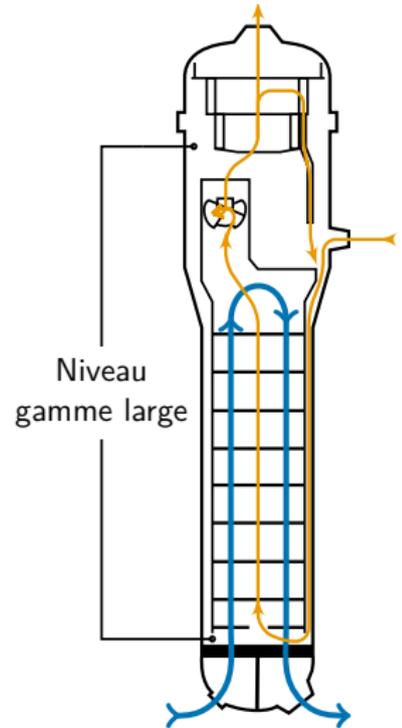
- ▶ Trouver successivement les directions de **plus grande étendue du nuage de point**
- ↔ Minimiser la moyenne quadratique des résidus de projection sur des **espaces vectoriels** de dimension croissante

# Régression inverse par tranches

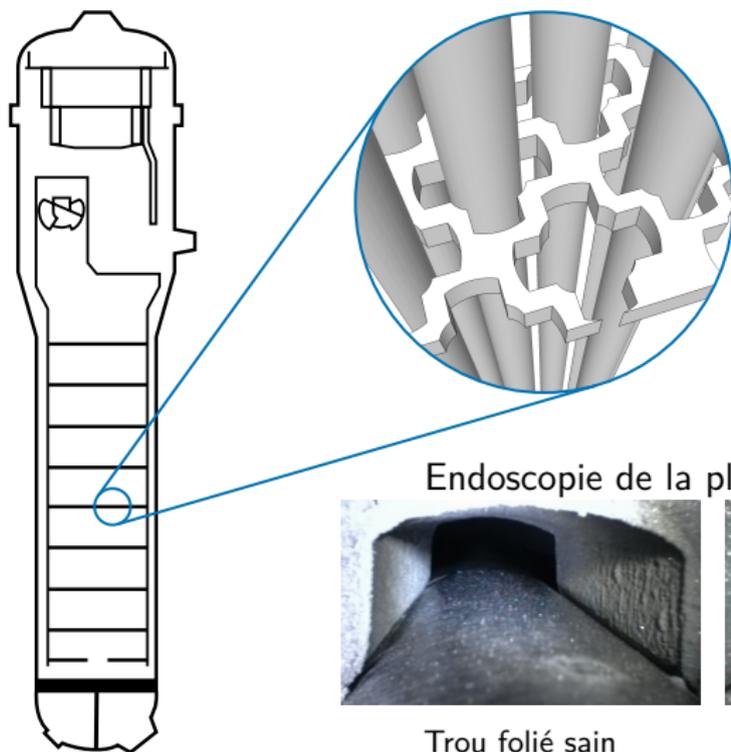
## *Sliced inversed regression*

- ▶ Soit une fonction  $f : \mathbf{X} \mapsto Y$ . L'espace vectoriel de réduction de dimension efficace est tel qu'il est équivalent de conditionner  $Y$  par  $\mathbf{X}$  ou par sa projection.
- ▶ Sous des conditions peu contraignantes sur  $\mathbf{X}$ , la courbe de régression inverse  $E(\mathbf{X}|y)$  est contenue dans cet espace.
- ▶ Algorithme :
  1. Approximation par morceaux (*slices*) de la régression inverse
  2. Estimation de l'espace la contenant au mieux par ACP

# 1. Colmatage des générateurs de vapeur



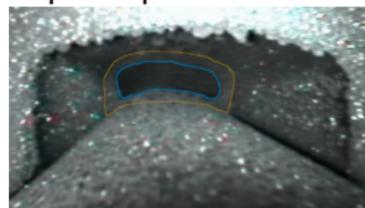
# Le phénomène de colmatage



Endoscopie de la plaque supérieure :

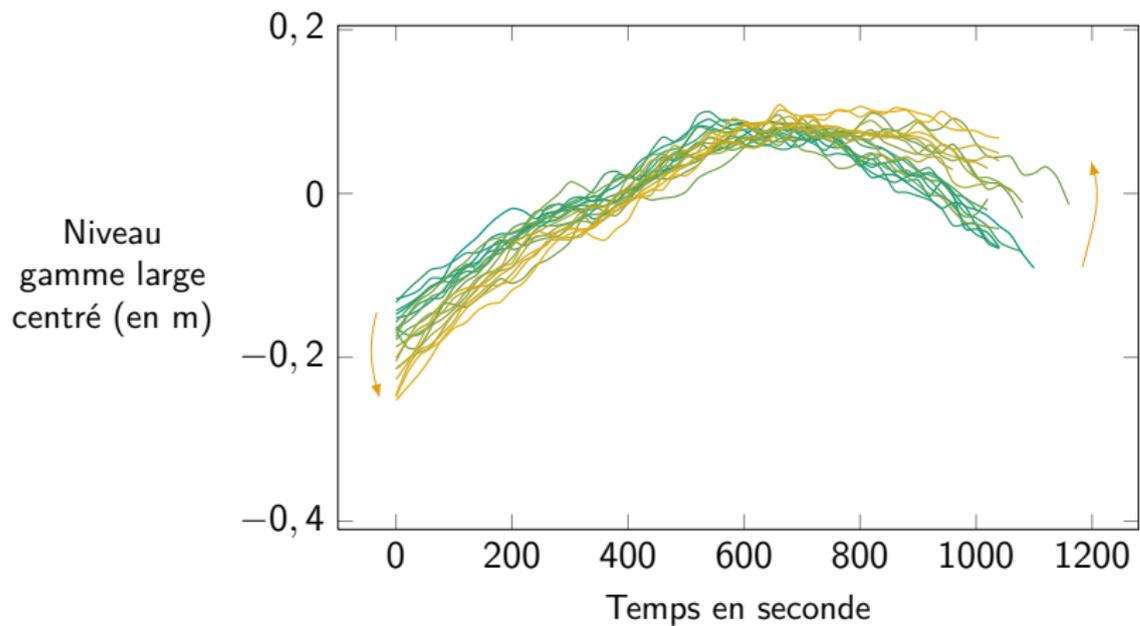


Trou folié sain



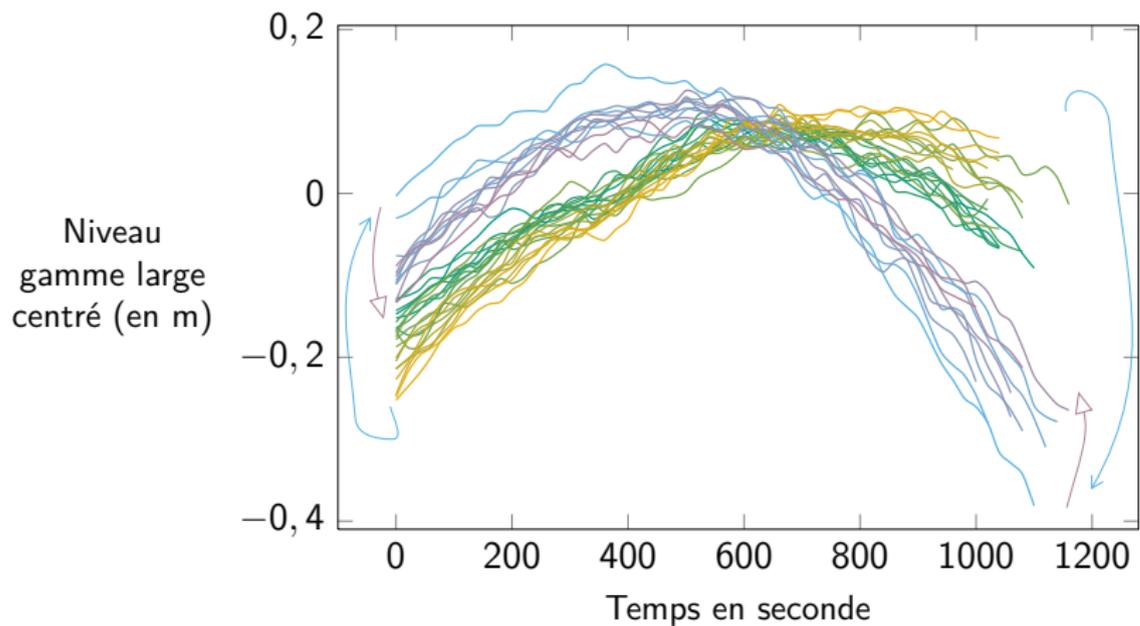
Trou folié colmaté

# Effet du colmatage



↗ : évolution avant nettoyage chimique

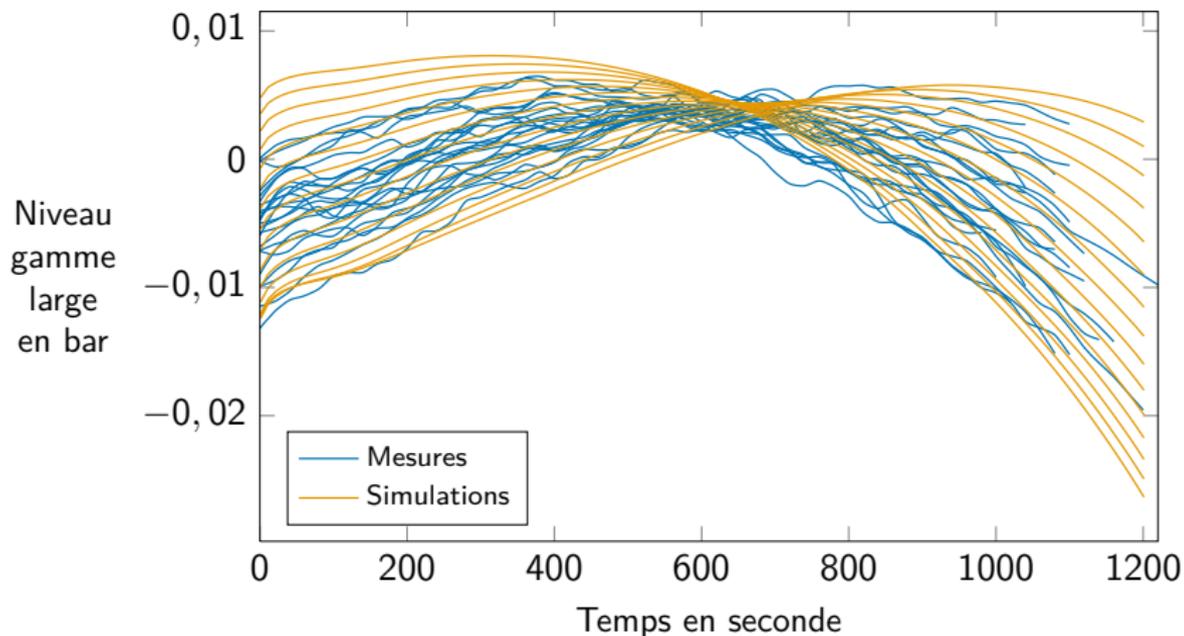
# Effet du colmatage



↗ : nettoyage chimique

↘ : évolution après nettoyage chimique

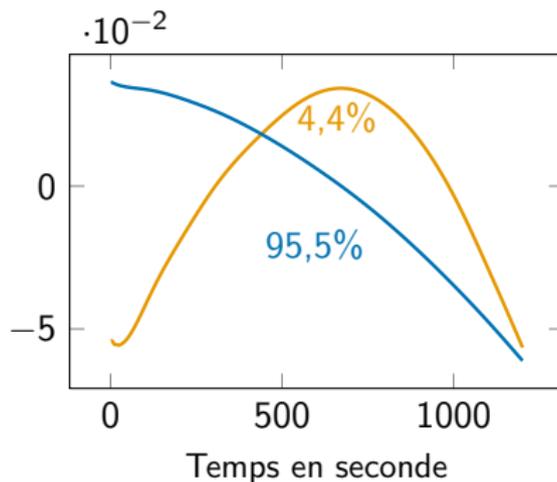
# Modèle numérique (Modelica)



- **Objectif** : prédire les taux colmatage en observant la réponse dynamique (problème inverse mal posé).

# ACP de la sortie dynamique

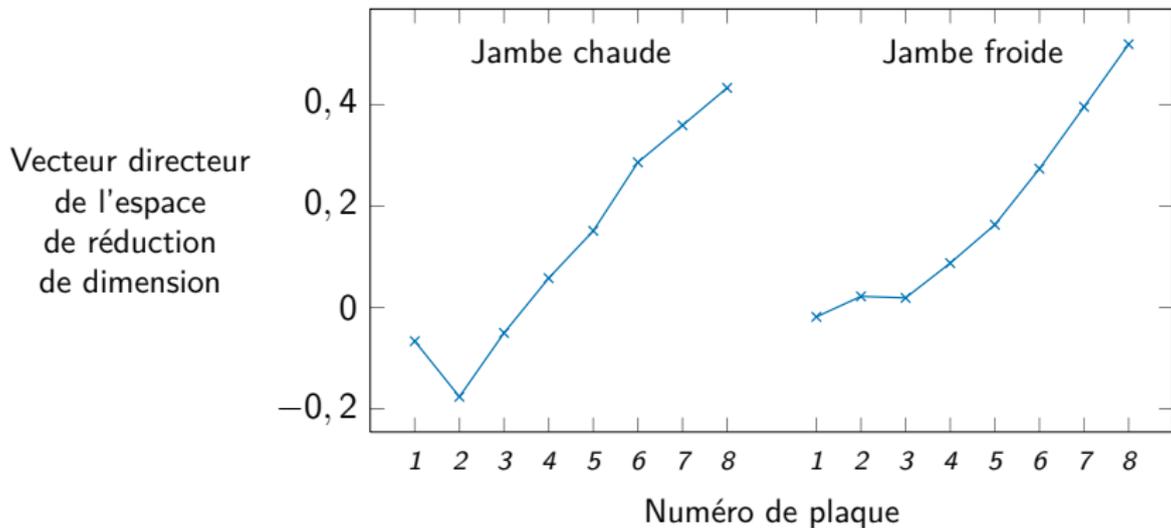
- ▶ Les 2 premières composantes expliquent toute la variance.



- ▶ Le colmatage modifie essentiellement la **pen**te, et en moindre mesure la **cour**bure.

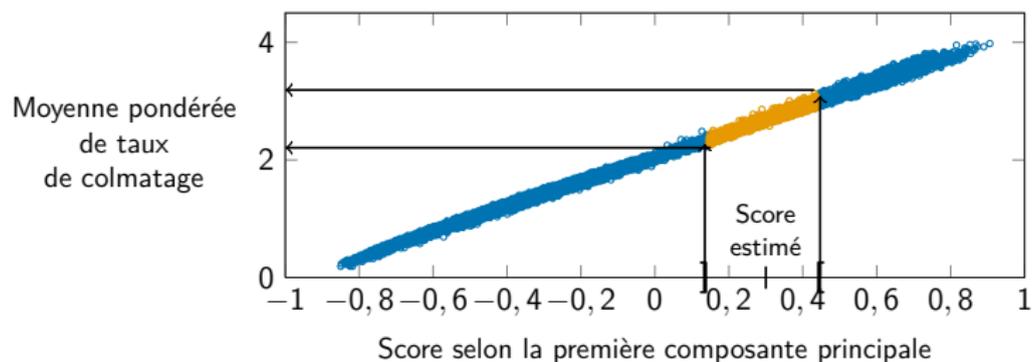
# Régression inverse du premier score (effet « pente »)

- Une seule direction de réduction de dimension efficace

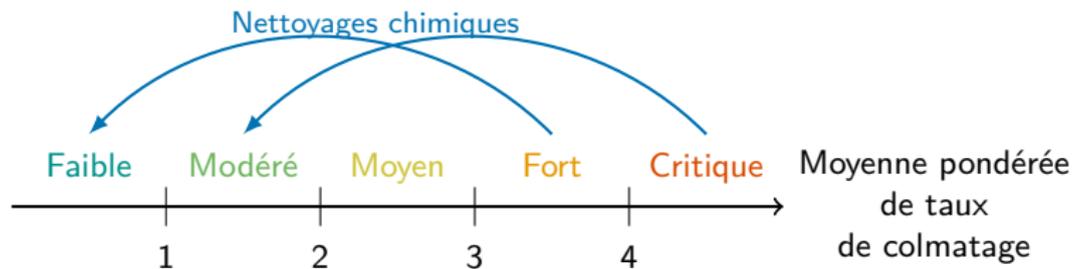


# Méthode de diagnostic

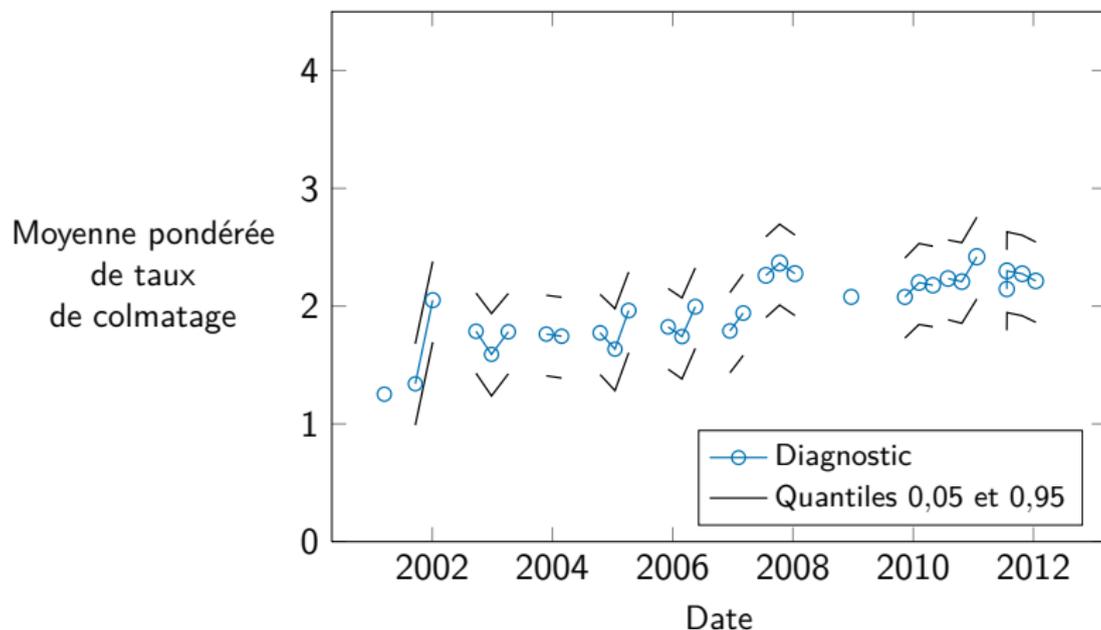
- L'inversion est devenue triviale.



- Échelle de gravité établie empiriquement

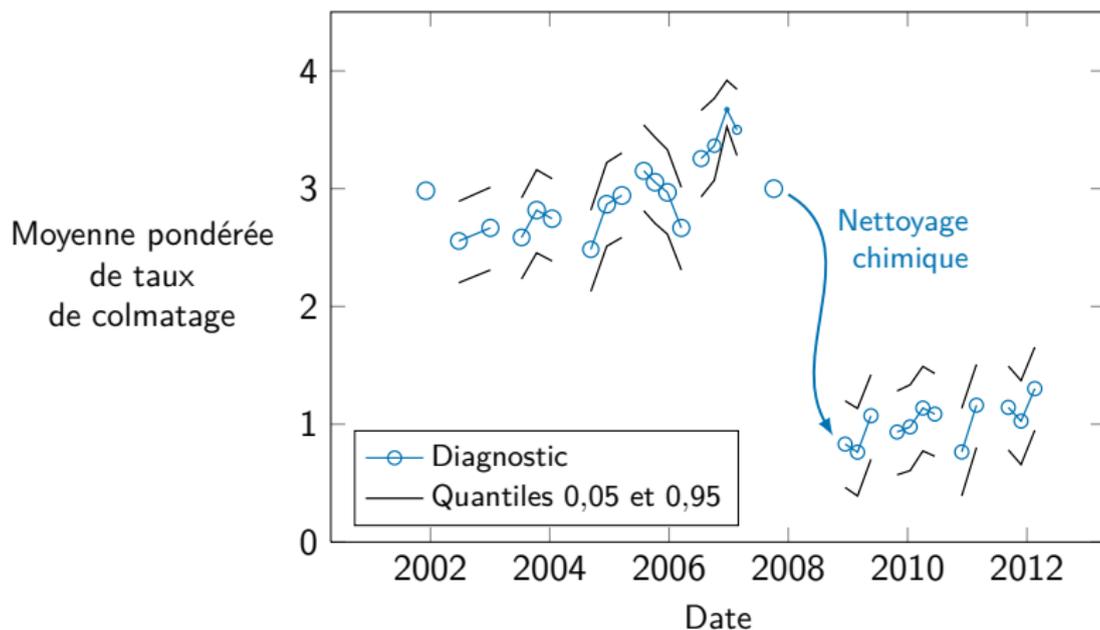


## Exemple de diagnostic 1/2



- Générateur de vapeur en bon état.

## Exemple de diagnostic 2/2



- La fissuration d'un tube a causé un arrêt fortuit.

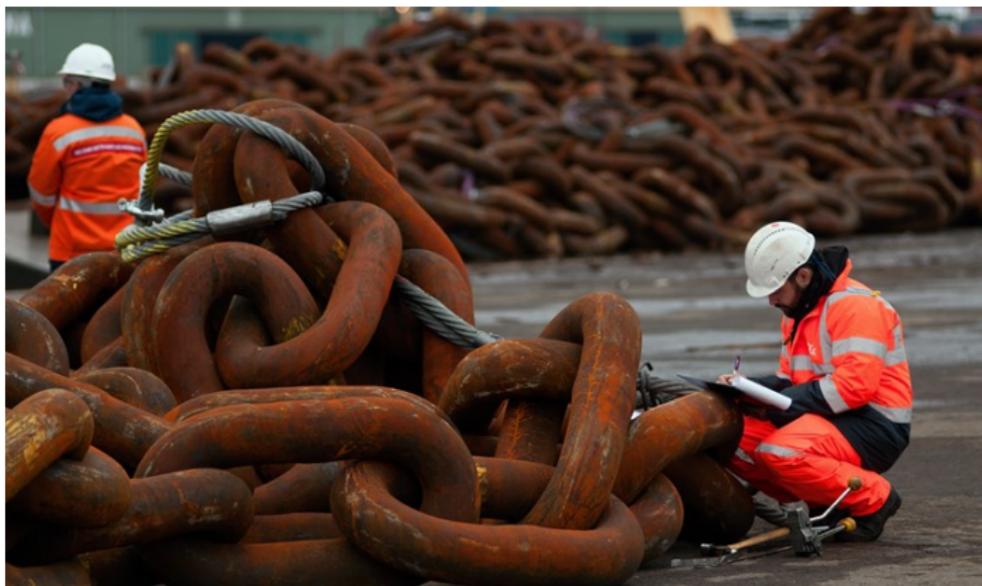
## 2. Fatigue en mer

- ▶ Les ancrages des usines en mer sont soumis au **mouvement continu de la houle**.

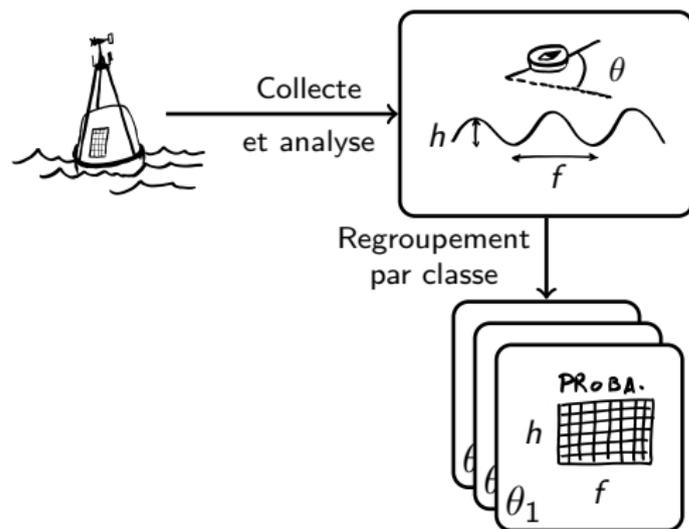


- ▶ **Objectif** : prédire l'endommagement en fatigue pour prolonger la durée de vie des installations

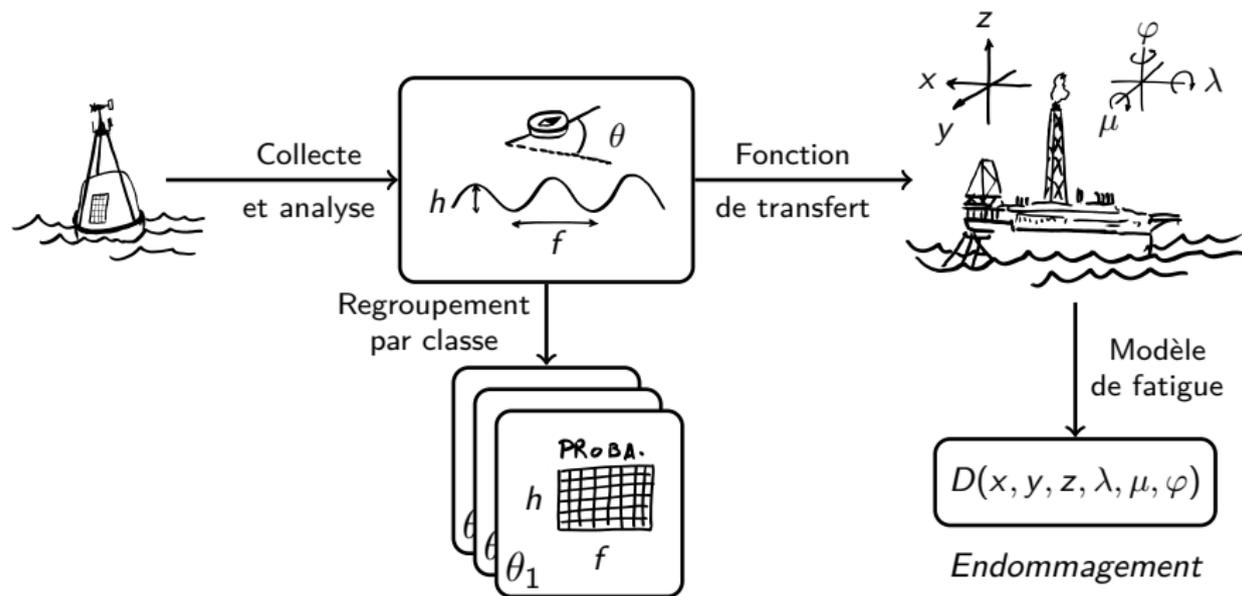
# Lignes d'ancrage



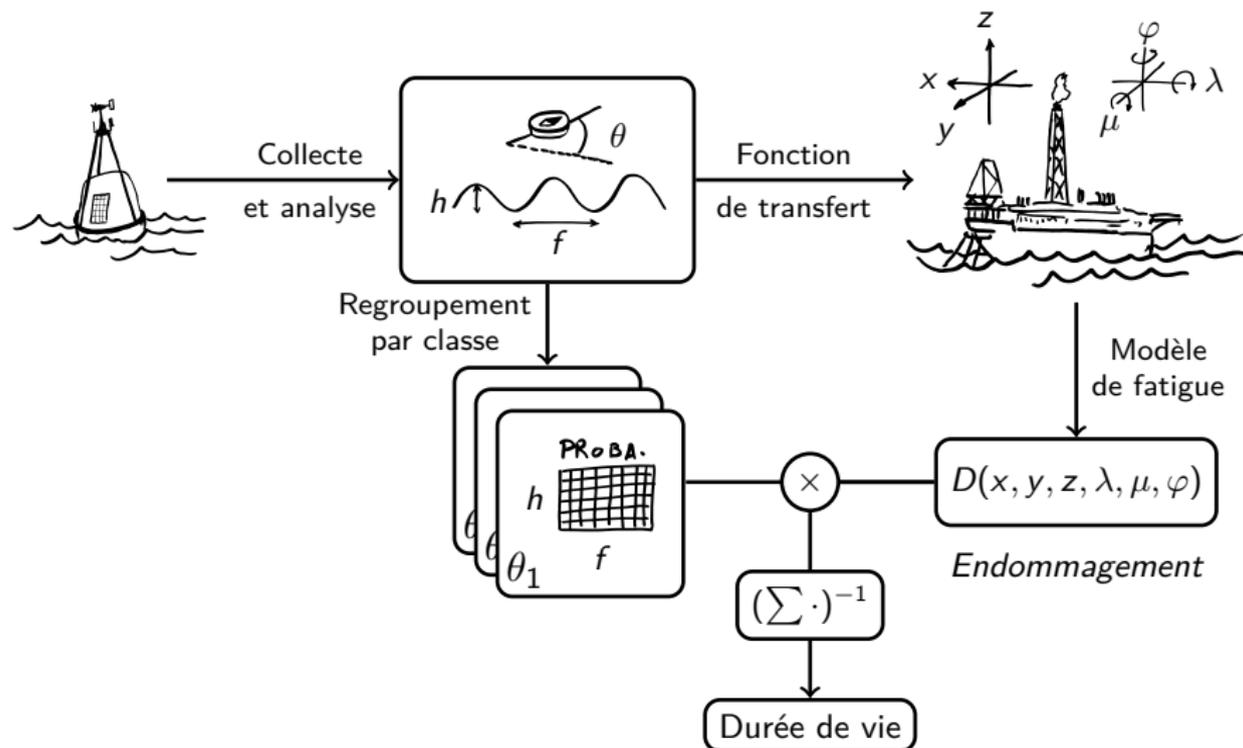
# Méthode classique de pronostic



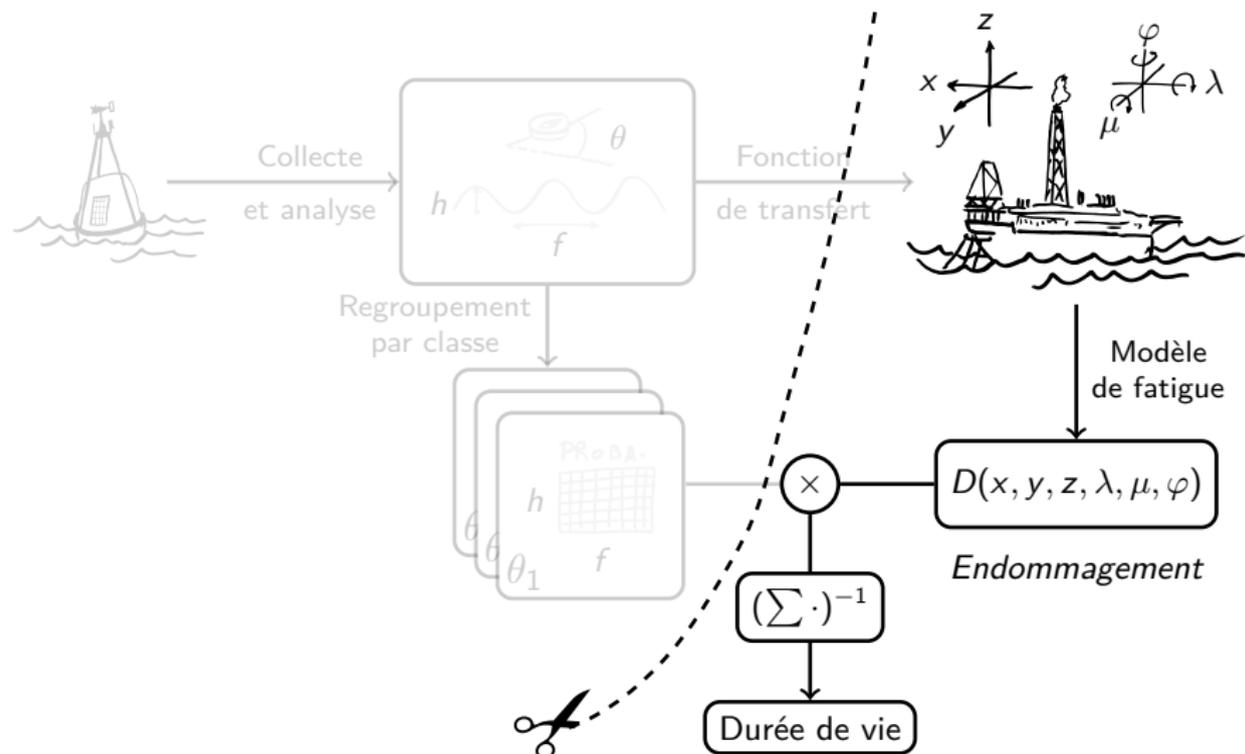
# Méthode classique de pronostic



# Méthode classique de pronostic

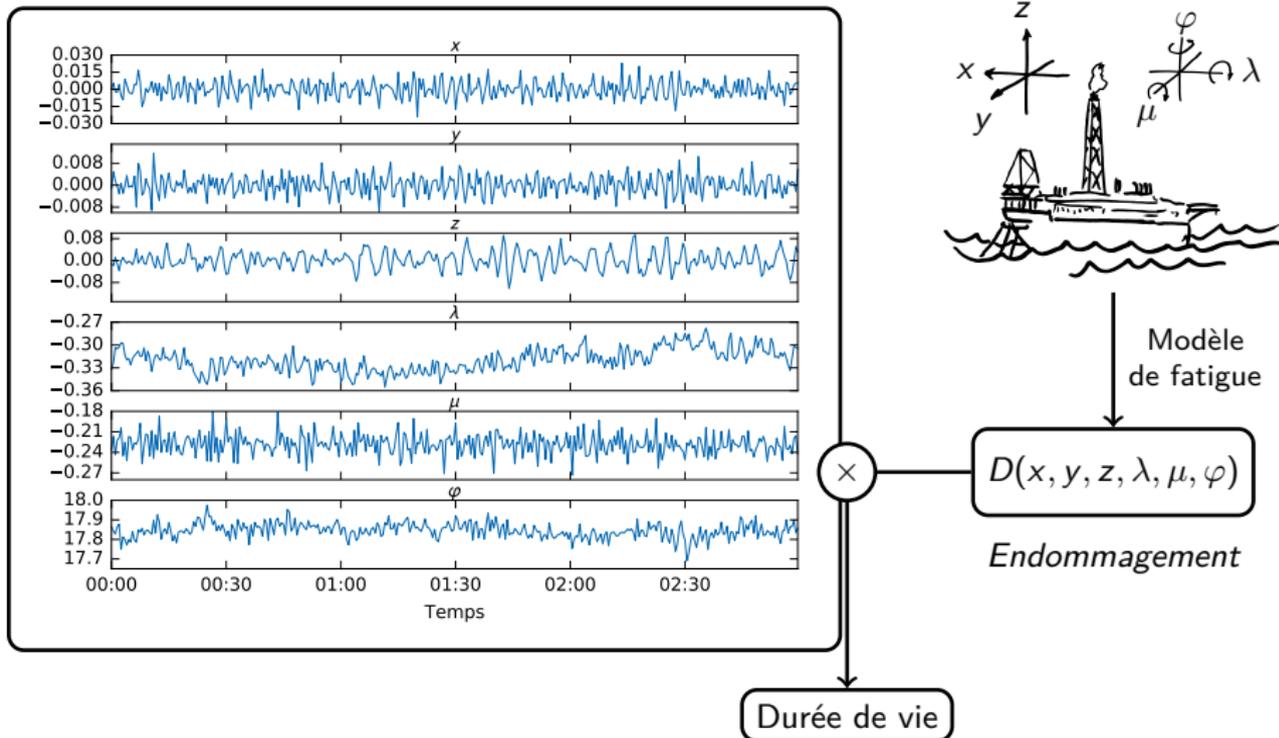


# Innovation : utiliser les mesures embarquées



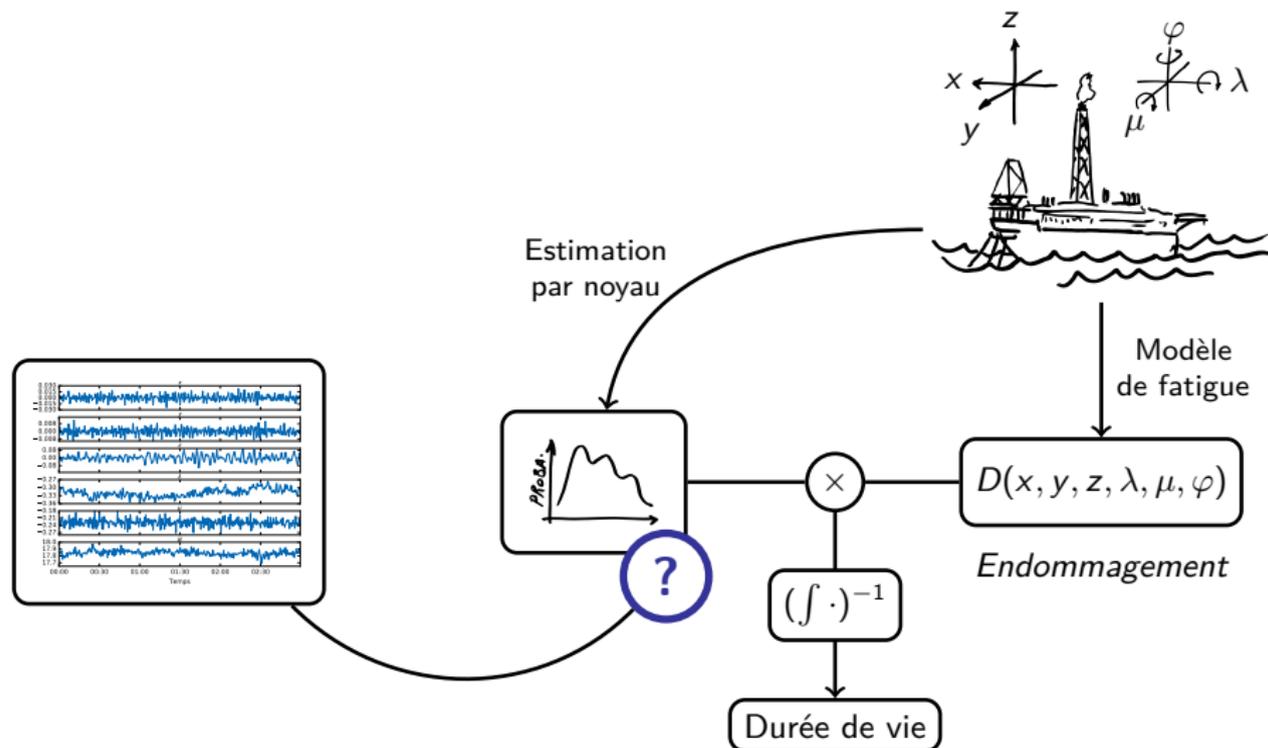
- C'est le mouvement du bateau et non les vagues qui nous intéresse !

# Innovation : utiliser les mesures embarquées



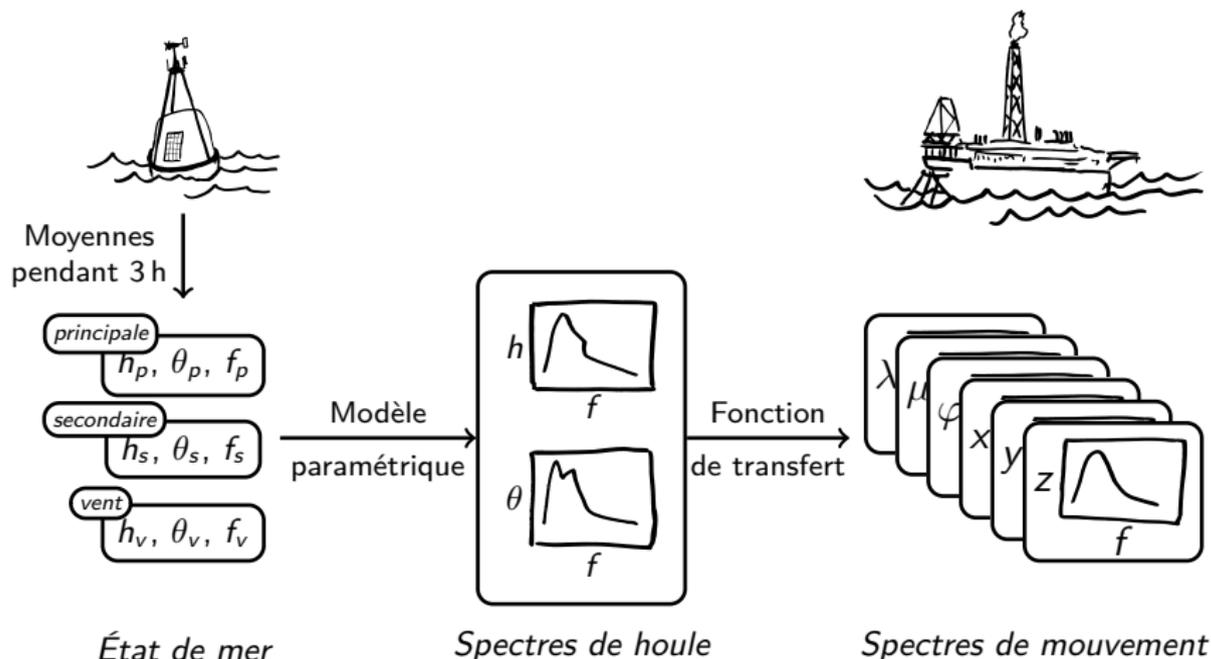
- ▶ Exemple d'épisode de mouvement de 3 heures.

# Problème de dimension



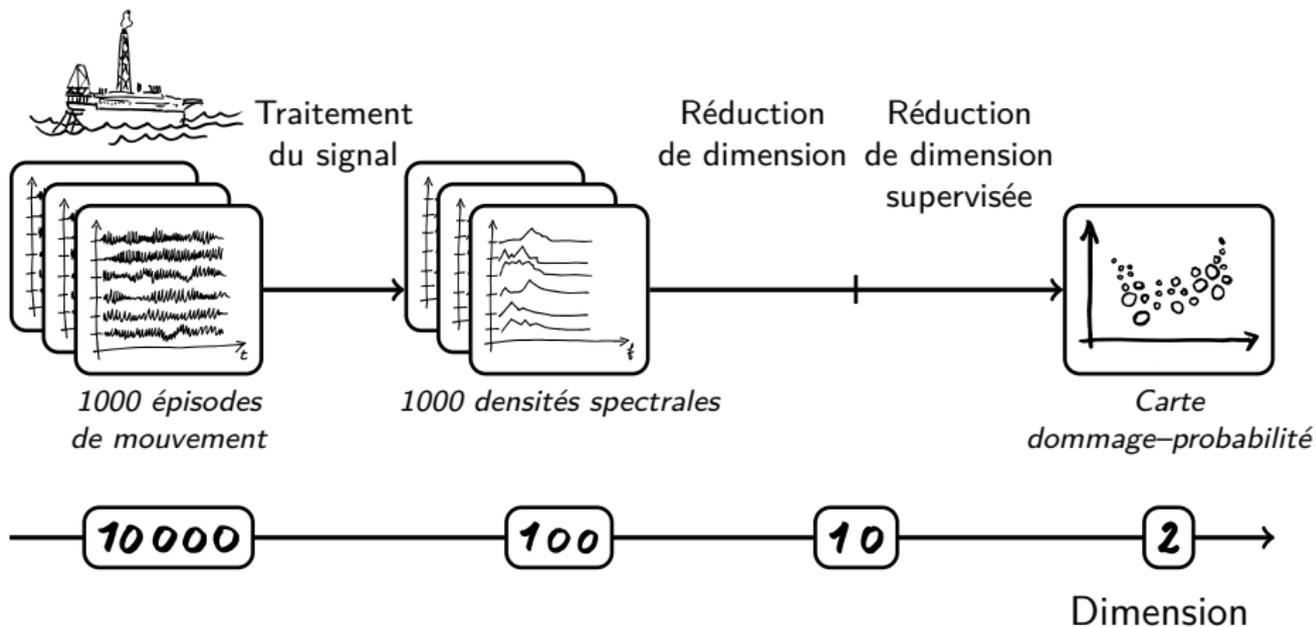
- Les données d'entrée sont **structurées** et de **grande dimension**.

# Réduction de dimension dans la méthode classique



- ▶ Chaque étape repose sur des **hypothèses fortes**, parfois implicites.

# Réduction de dimension dans la nouvelle méthode



- La réduction de dimension est dédiée à l'objectif de pronostic.

## Extrapolation dans la méthode classique

Probabilité

Domage

$$\sum \left( \begin{array}{c} h \\ \theta \\ f \end{array} \times \begin{array}{c} h \\ \theta \\ f \end{array} \right)^{-1} = \text{durée de vie}$$

- L'homogénéité des classes de dommage n'est pas garantie.

# Extrapolation dans la nouvelle méthode

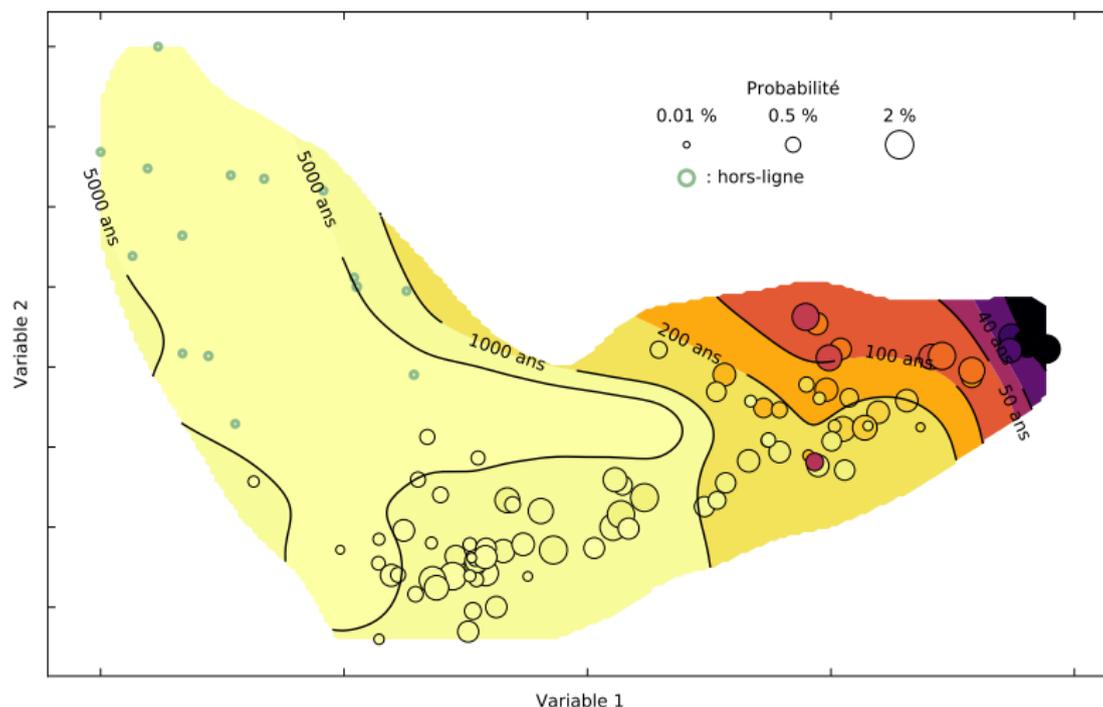
Probabilité

Domage

$$\int \left( \begin{array}{c} \text{Graphique d'une courbe de probabilité} \\ \text{Estimation par noyau} \end{array} \times \begin{array}{c} \text{Graphique de points de données} \\ \text{Émulation (processus gaussien)} \end{array} \right)^{-1} = \text{durée de vie}$$

- ▶ La pertinence de la **représentation concise des mouvements** est déterminante.

# Carte probabilité–dommage



- ▶ Cette carte issue de simulations sera mise à jour continuellement au fil de la collecte des données.

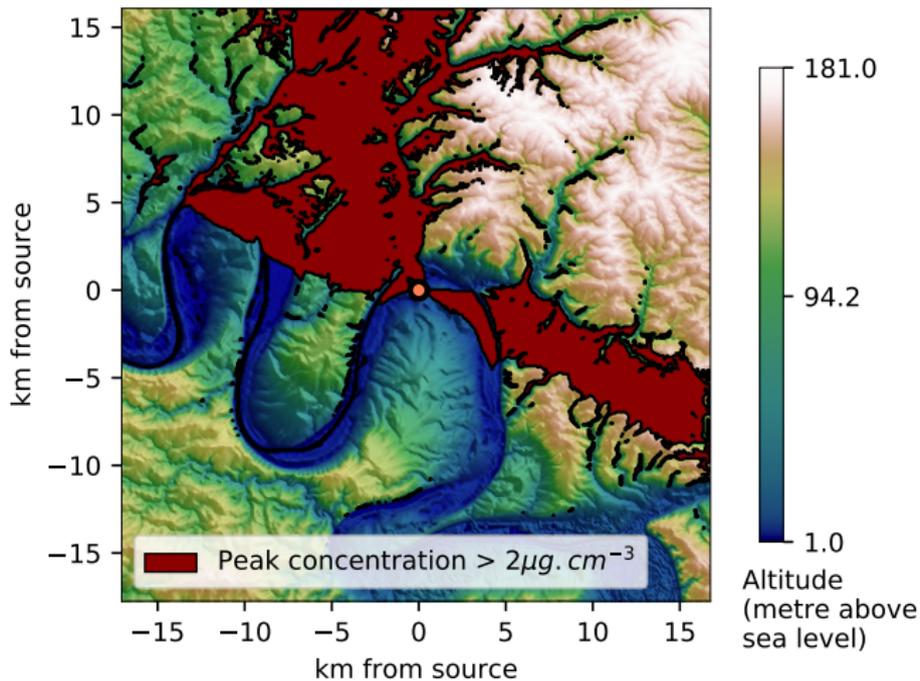
### 3. Dispersion de polluants dans l'atmosphère

- ▶ Exemple inspiré de l'incident de l'usine Lubrizol (Rouen, 2013)

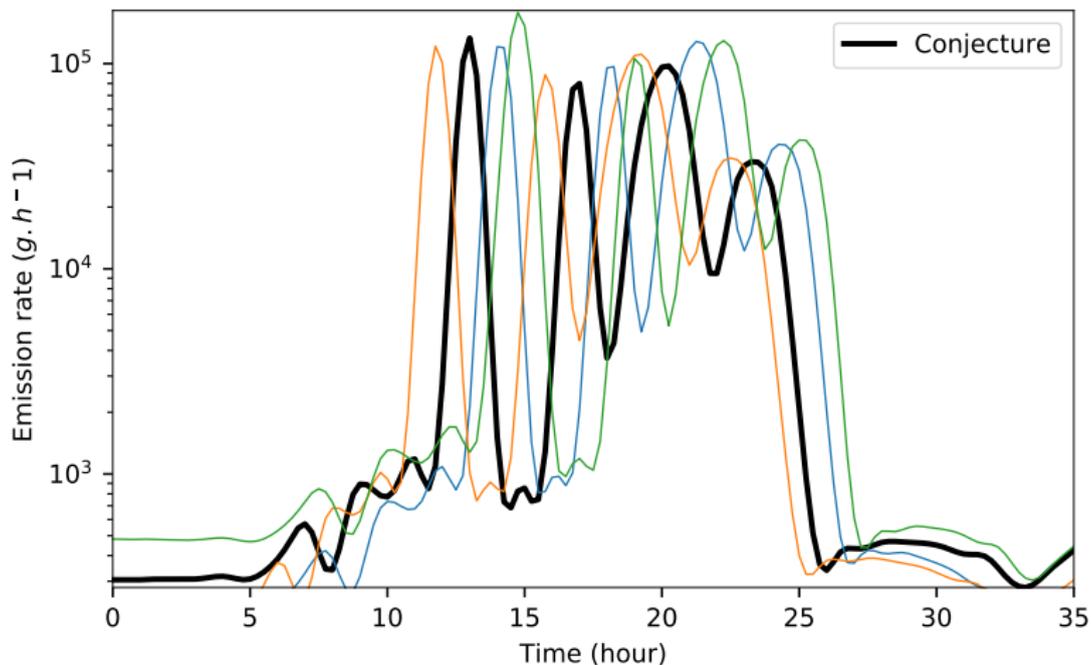


- ▶ **Objectif** : prédire où la concentration dépassera  $2 \mu\text{g cm}^{-3}$

# Carte de décision déterministe

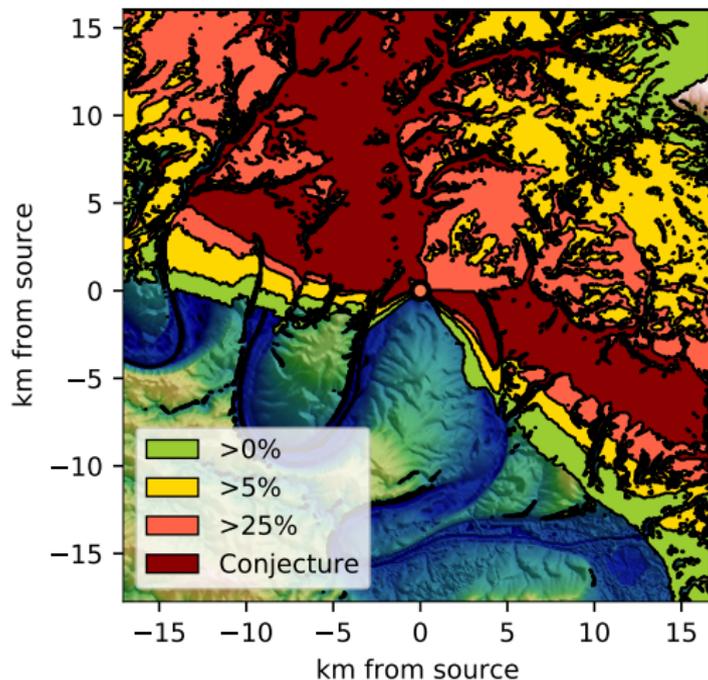


# Processus stochastique du débit d'émission



- ▶ Sont également perturbés : intensité de la pluie, vitesse et direction du vent

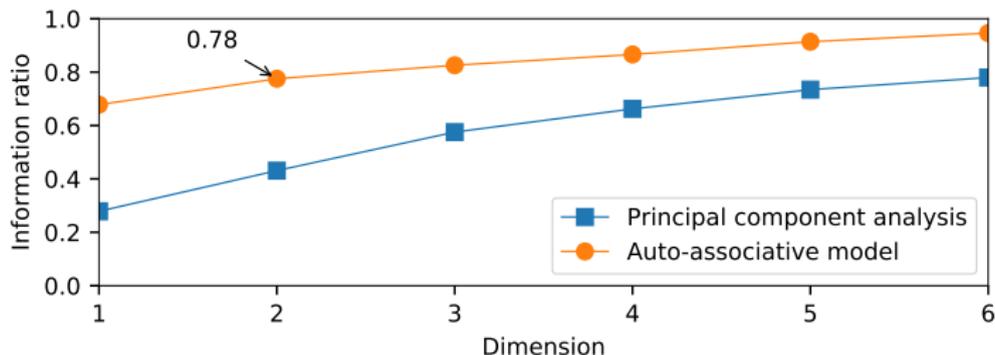
# Carte de décision probabiliste



- Probabilités de dépassement estimées avec 100 simulations

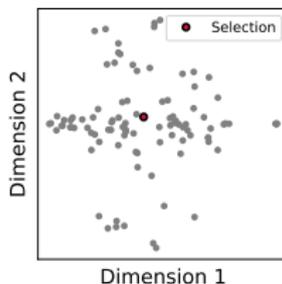
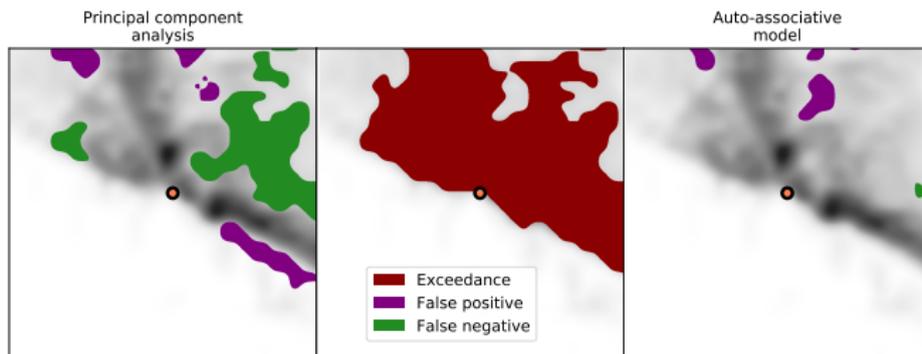
# Modèle auto-associatif

- ▶ Extension **non linéaire** de l'ACP alternant
  - ▶ **Projection** préservant au mieux les plus proches voisins
  - ▶ **Régression** des *Résidus* par les *Projections*
- ▶ Rappel : l'ACP minimise globalement les résidus de projection



# Décision après projection 2D

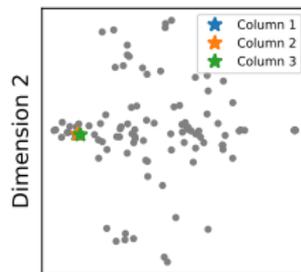
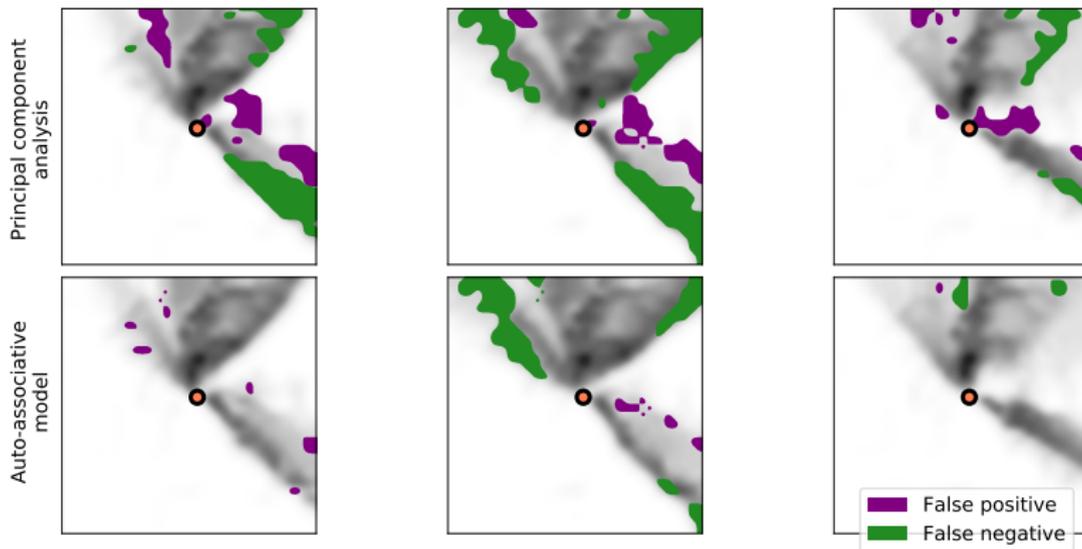
0/3



- ▶ Faux positif (resp. négatif) = prédiction erronée de dépassement (resp. non dépassement)

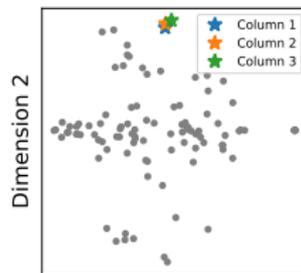
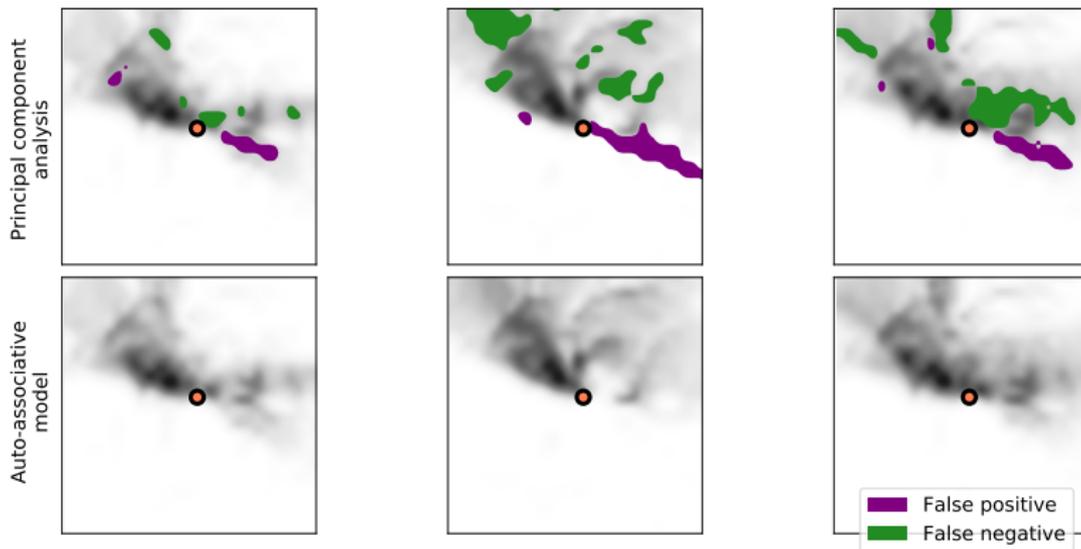
# Décision après projection 2D

1/3



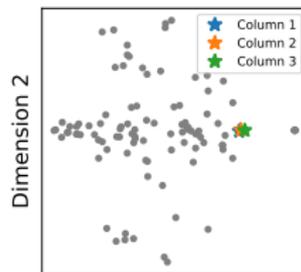
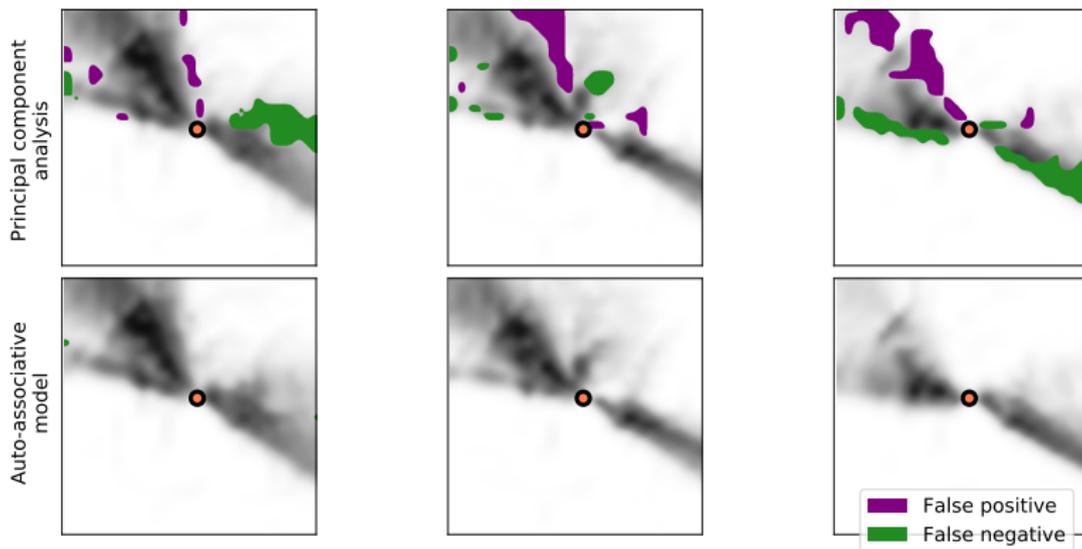
# Décision après projection 2D

2/3



# Décision après projection 2D

3/3



# Défi

- ▶ Propagation d'incertitude dans des modèles
  - ▶ coûteux,
  - ▶ grande dim. → grande dim.,
  - ▶ lorsque l'ACP est prise en défaut
  
- ▶ Quels pré-traitements appliquer au courbes ou cartes ?
- ▶ Comment échantillonner efficacement l'espace d'entrée ?
- ▶ Comment émuler ces modèles ?

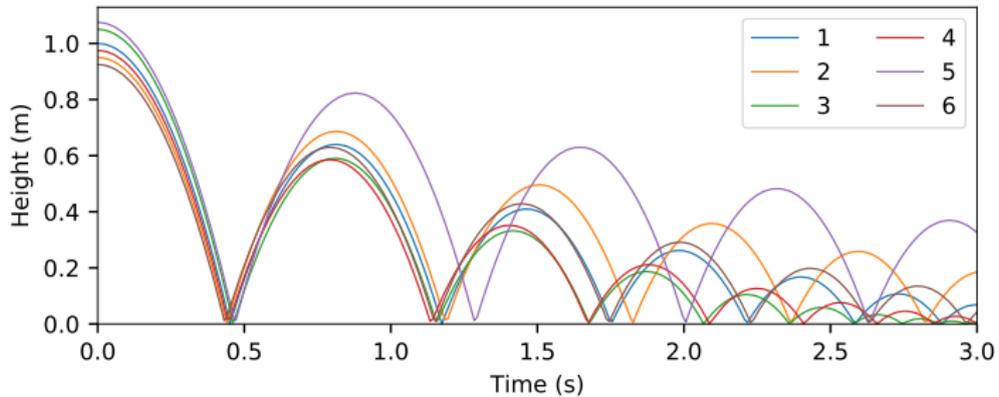
**Merci de votre attention.**



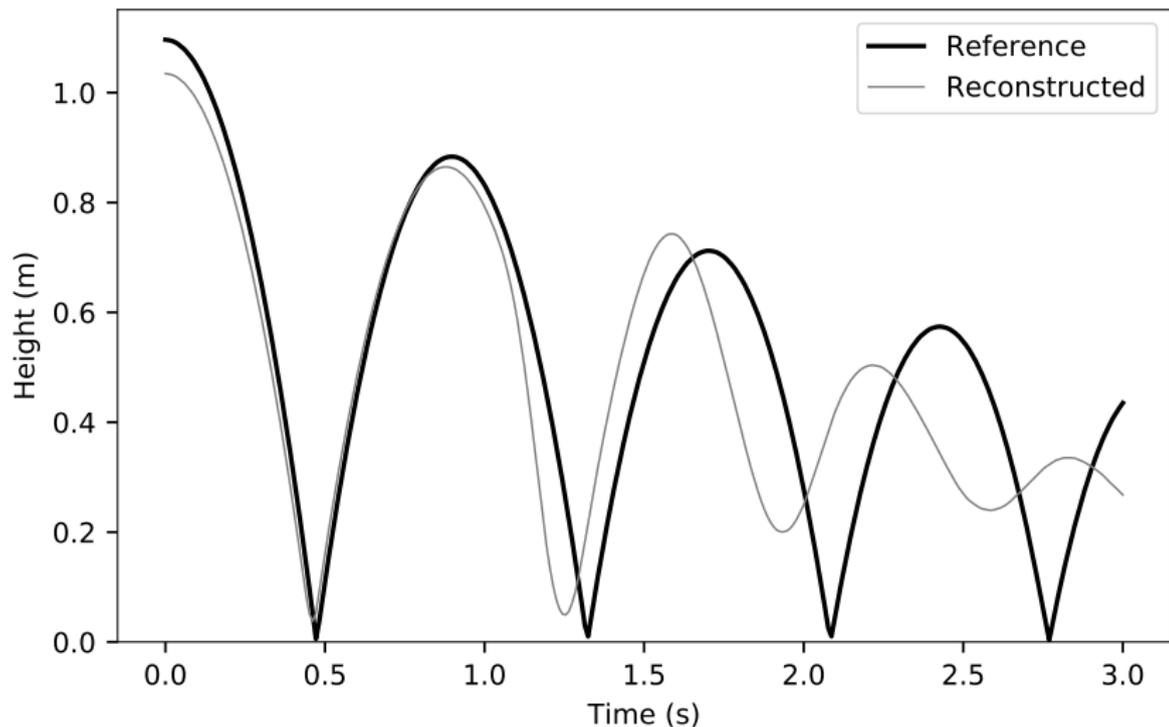
# Limites du cadre linéaire : balle rebondissante



Simulation des rebonds successifs d'une balle en variant la hauteur initiale et l'élasticité

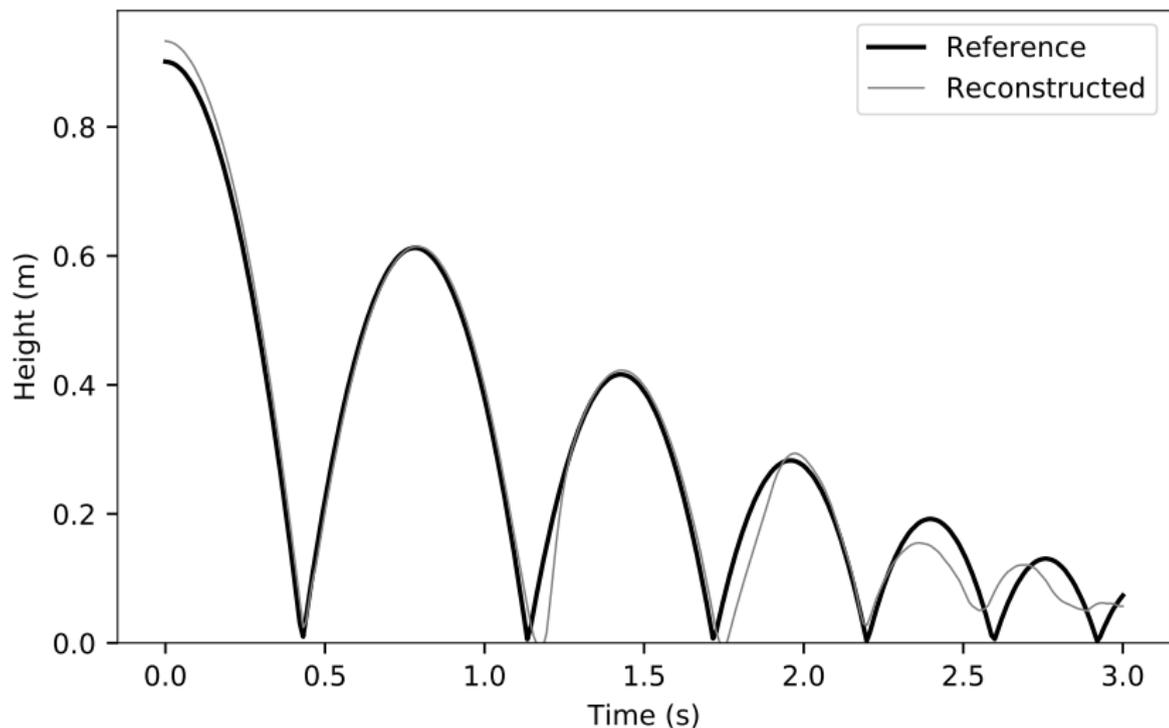


# L'ACP est prise en défaut



- Pire reconstruction après projection 2D (échantillon de test)

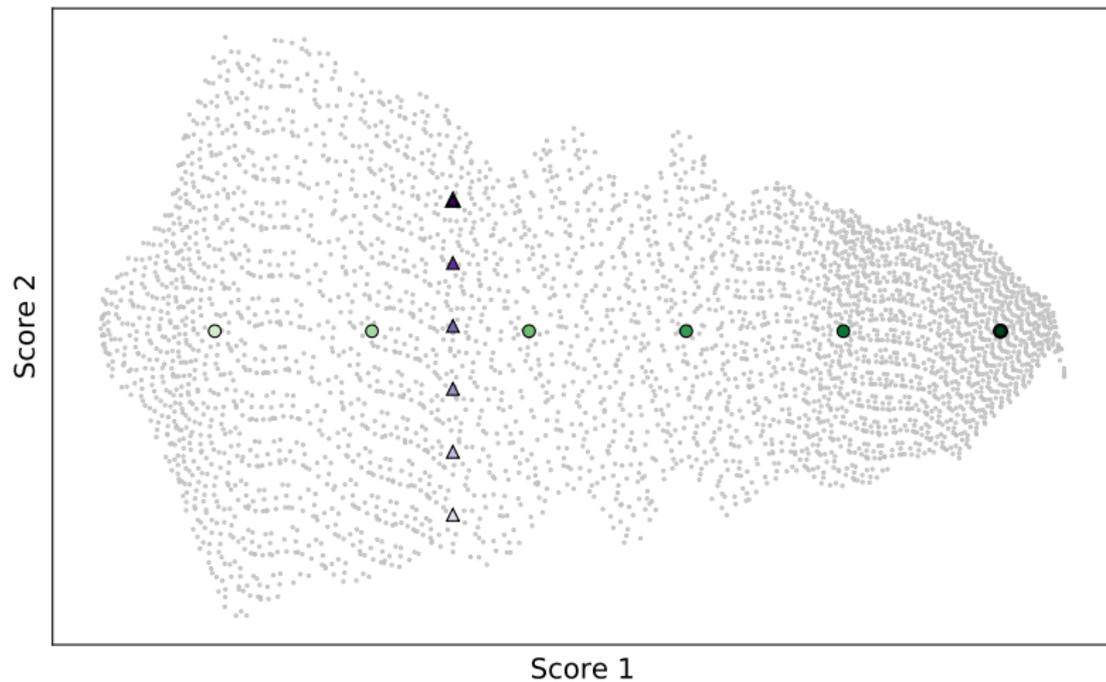
# Un modèle auto-associatif fonctionne mieux



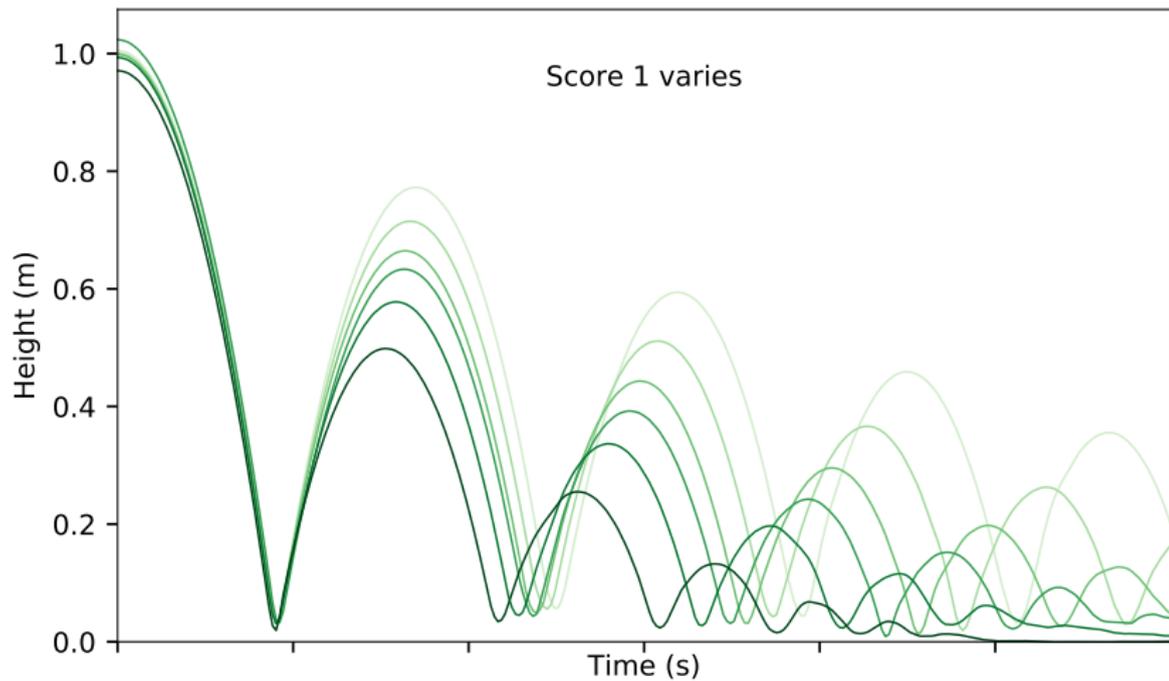
► Pire reconstruction après projection 2D (échantillon de test)

# « Vue en coupe » de la projection 1/3

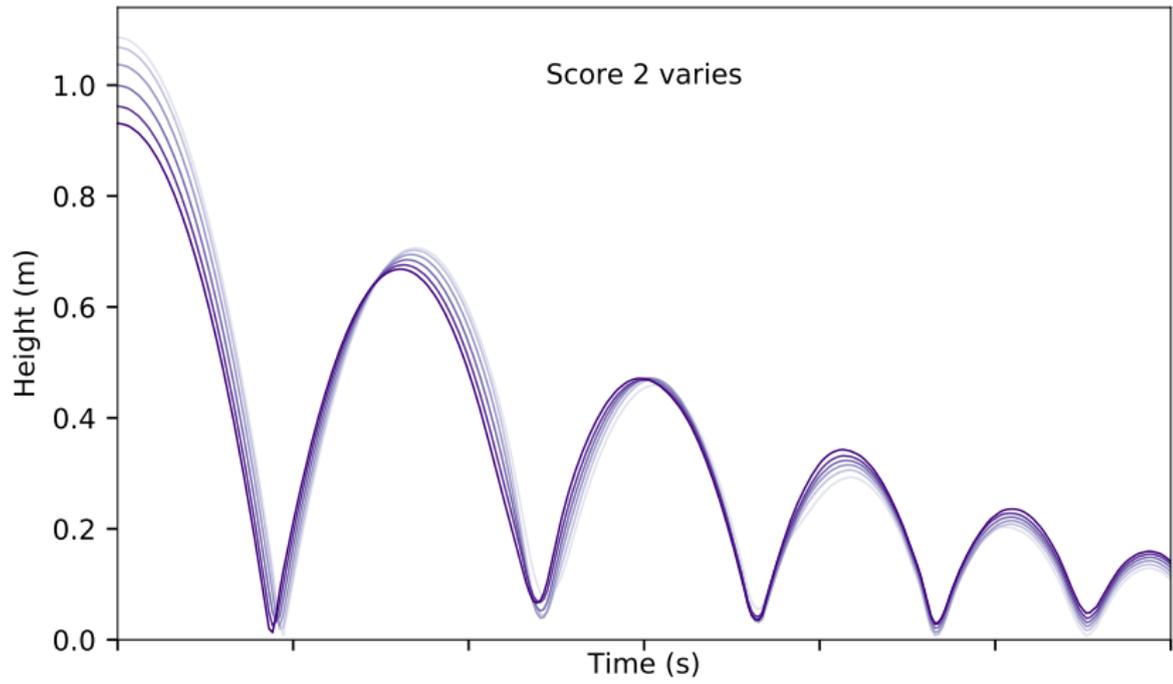
(modèle auto-associatif)



# « Vue en coupe » de la projection 2/3



# « Vue en coupe » de la projection 2/3



# Émulation d'un modèle sismique

- ▶ Modèle simplifié de Bouc–Wen : **non linéaire**, avec **hystérésis**
  - ▶ **Entrée** : somme de cosinus de phases aléatoires  
≈ processus gaussien
  - ▶ **Sortie** : maximum de déformation
  
- ▶ ACP = transformation de Fourier
- ▶ Analyse de sensibilité de Morris : entrées en forte interaction
- ▶ La régression inverse par tranche semblait fonctionner...