

Modélisation : entre la physique et la donnée

**Chaire Modélisation Mathématique et Biodiversité
21/11/2025, Aubervilliers**

Département des Expertises Scientifiques et Technologiques



EAU



DÉCHETS



ENERGIE



loic.gilbert@veolia.com



domingo.fernandez@veolia.com

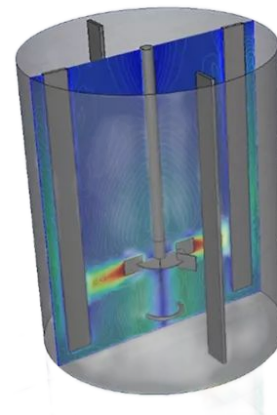
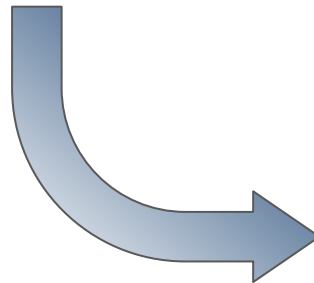
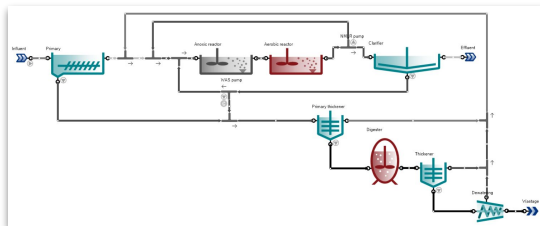
Modélisation : du 0D au 3D

- Modélisation en 0D
 - Mécaniste
 - Data-driven
 - Hybride

→ Vision **globale** du process

- Modélisation 3D
 - Mécaniste

→ Vision **locale** du process

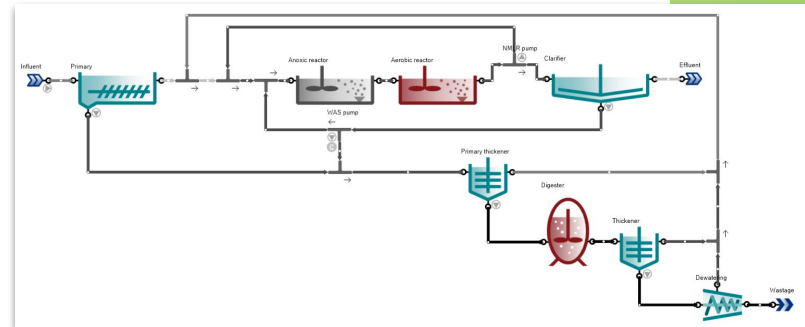


Modélisation physique

Basée sur des
phénomènes
physiques,
chimiques ou
biologiques

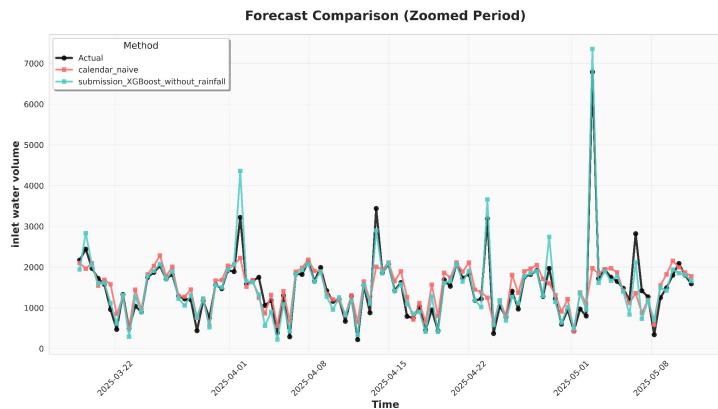
Mécaniste

*Exemple : Simulation de scénarios de station
d'épuration avec une modélisation plant-wide*



Modélisation data-driven

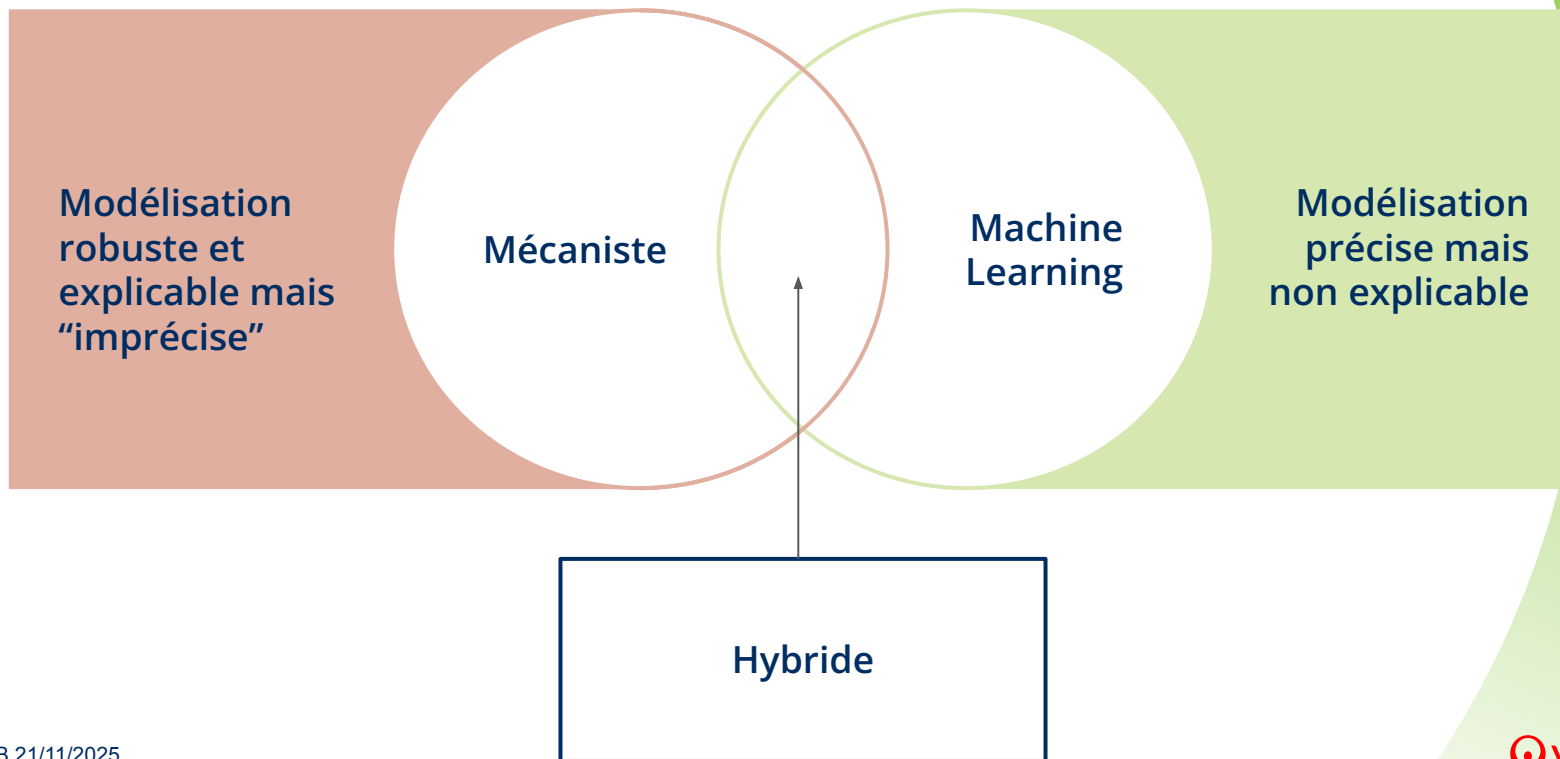
Exemple : Prédiction des volumes d'entrée de WWTP



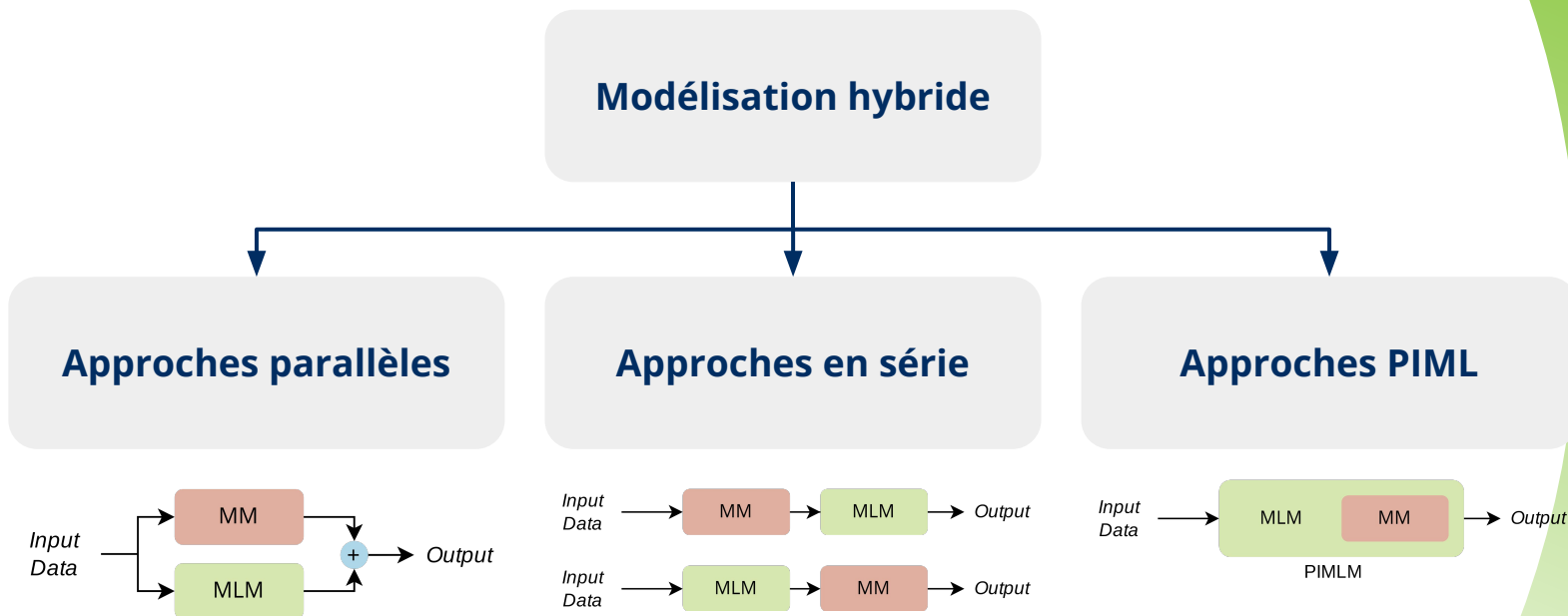
Machine
Learning

Basée sur les
données

Modélisation physique ou data-driven ?



Différents types d'hybridations

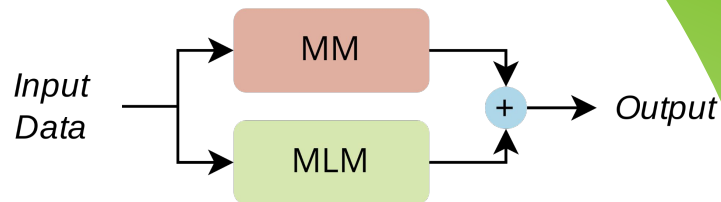


MM : Modèle Mécaniste

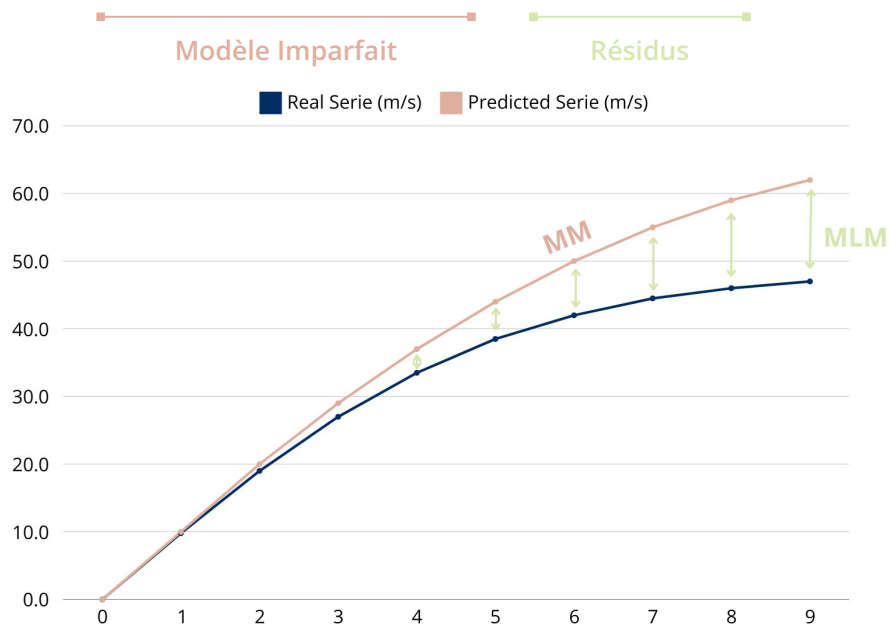
MLM : Modèle Machine Learning

PIMLM : Modèle Physics-informed Machine Learning

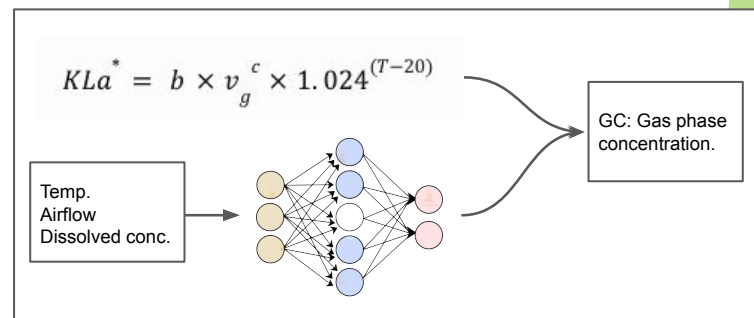
Approches en parallèle



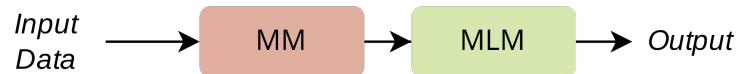
$$\text{Output} = \text{MM}(\text{Input}) + \text{MLM}(\text{Input})$$



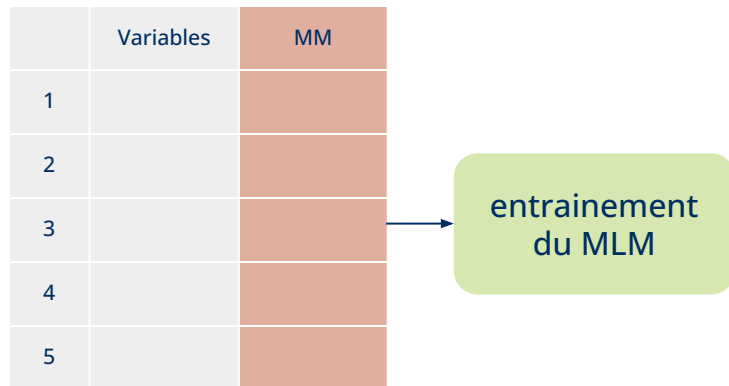
Exemple : Prédire les émissions de gaz avec une approche hybride parallèle



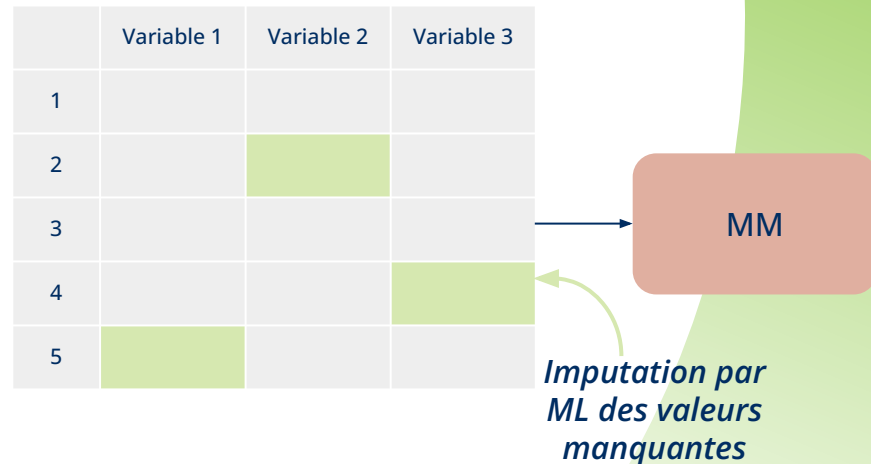
Approches en série



Exemple : MM pour calculer une variable complémentaire



Exemple : Prédiction des valeurs manquantes avec MLM



Approches PIML



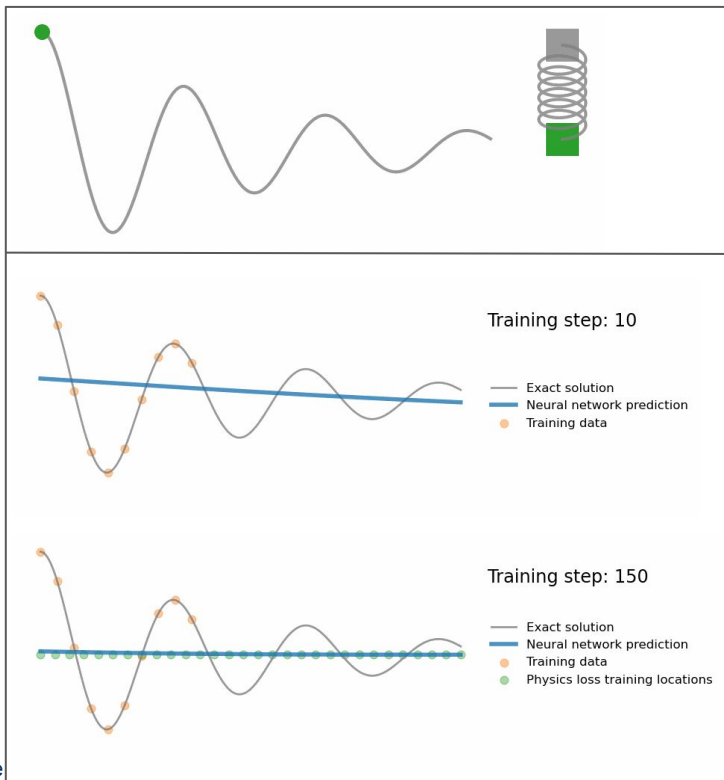
Exemple : Intégrer un terme physique dans la fonction loss du MLM

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 + W_p P$$

Partie standard

Terme basé sur la physique

Ajout d'une partie physique à la fonction loss



Modélisation 3D mécanistique : La CFD

Conservation de la masse

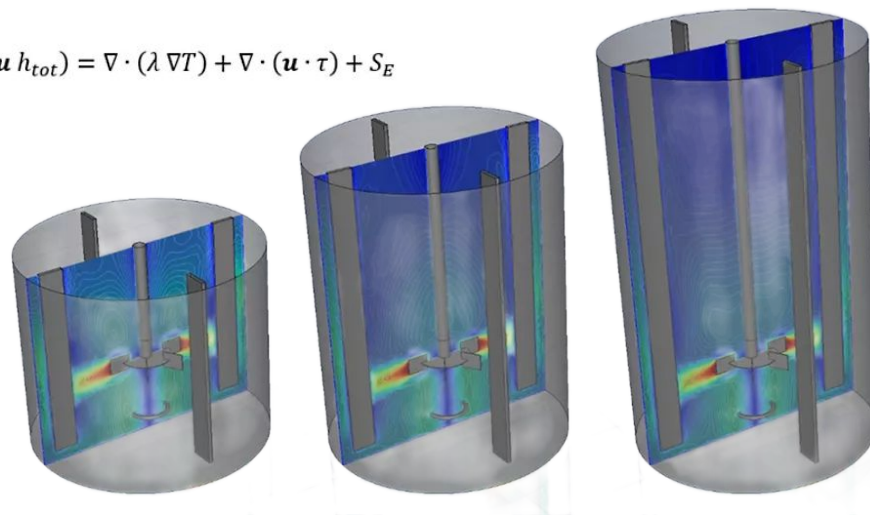
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

Conservation du mouvement

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}_b$$

Conservation de l'énergie

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\tau}) + S_E$$

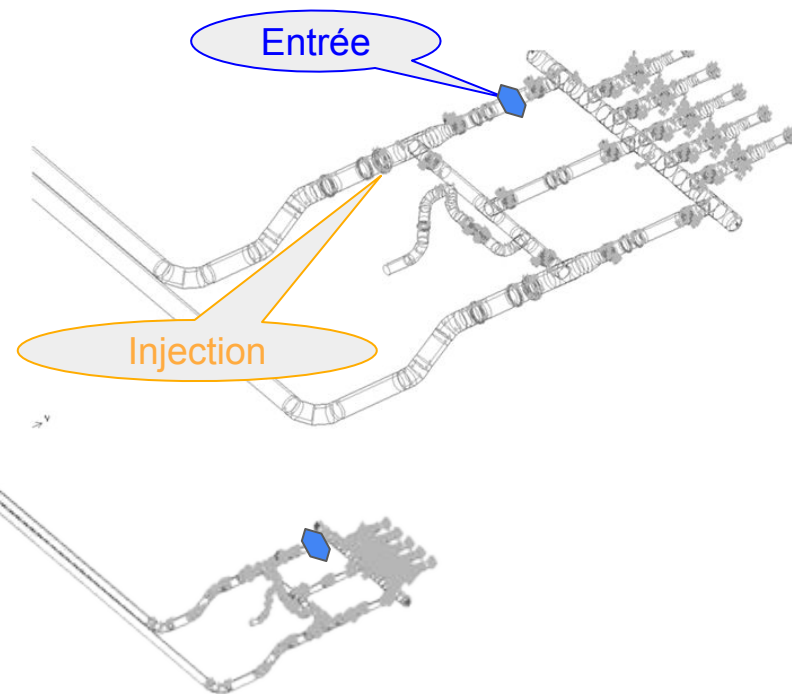


Cas d'étude : injection de réactifs

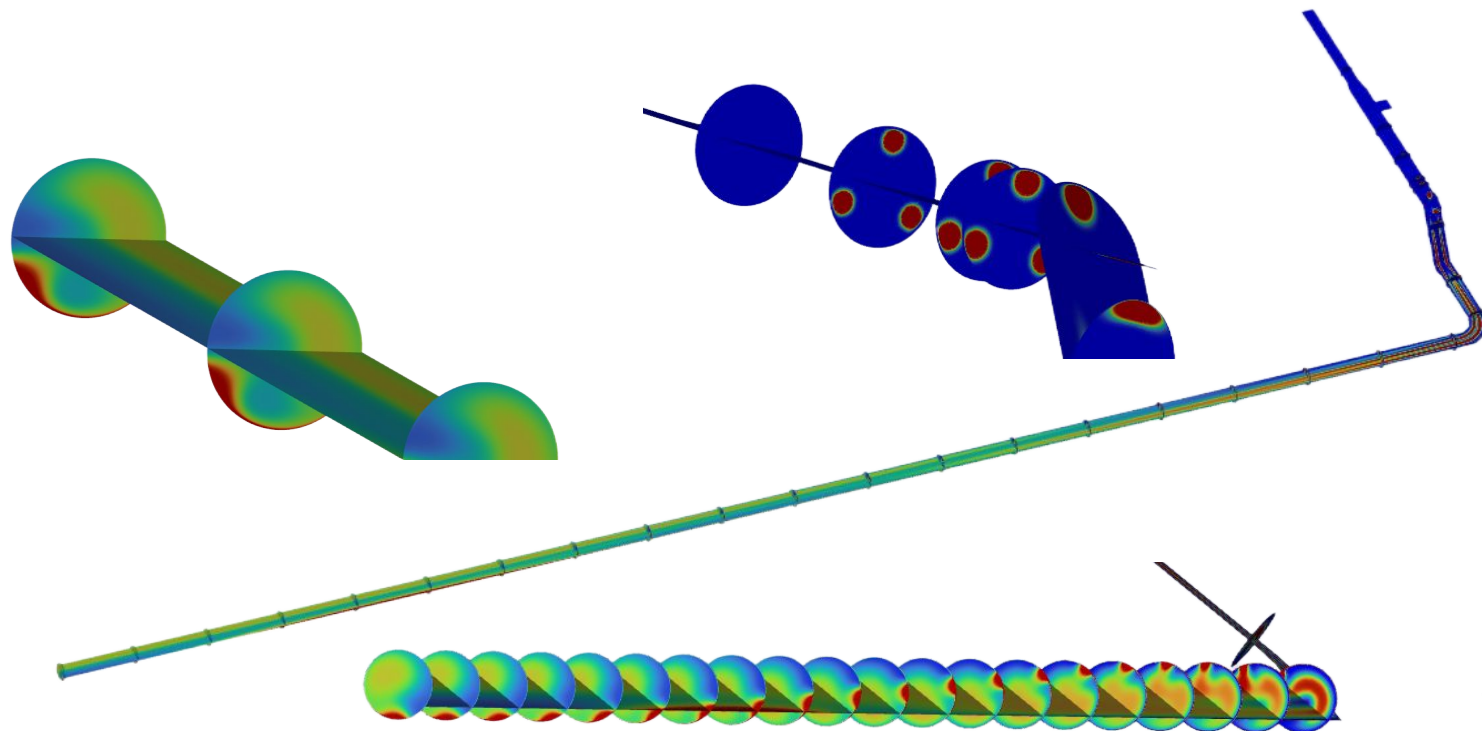
Objectif :
distribution
uniforme sur une
batterie de filtres
en aval

Longueur de mélange ~ 200 m

Sortie

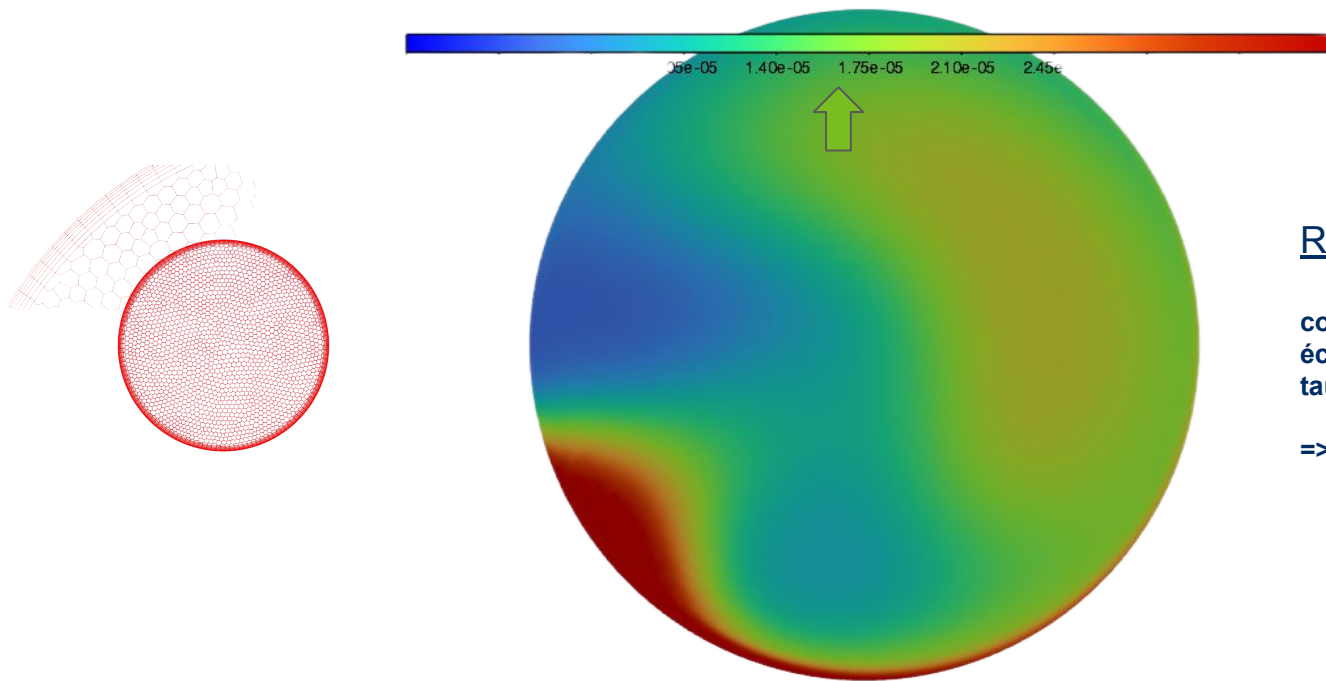


Résultats CFD : aperçu général



Zoom en sortie sur la concentration

Mélange parfait théorique [C] = $1.72 \text{ e-}5$



Résultats CFD

concentration moyenne = $1.73 \text{ e-}5$

écart type = $9.43 \text{ e-}6$

taux de mélange = 55%

=> homogénéité non atteinte

Bénéfices de la Modélisation

- "The right tool for the right job" → Chaque approche présente des avantages et des inconvénients et ils sont plus adaptés à certains types de problèmes ou aux données disponibles. Il n'existe pas de méthode universellement meilleure qu'une autre, et nous devons rester ouverts à leur utilisation.
- La modélisation hybride permet d'apporter du contexte et de la robustesse aux modèles de machine learning.
- La CFD fournit un ensemble d'informations physiques locales détaillées via des données numériques exhaustives (capteur virtuel) ouvrant un traitement statistique fiabilisé et permettant de tester différents designs (démarche conception exploratoire)

Merci!

