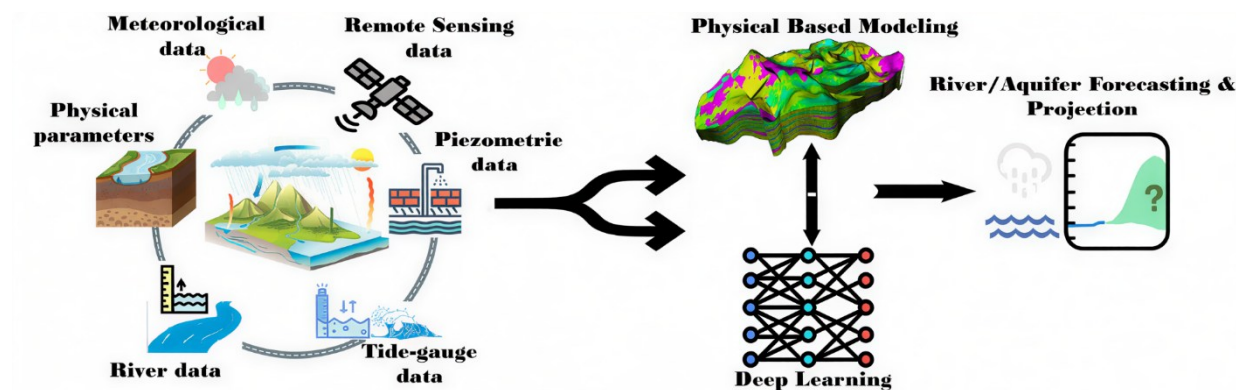


Congrès Eau & IA 2026

Reconstruction de chroniques de débits à l'aide de techniques d'apprentissage profond : application à l'estuaire de la Seine



HYDROLINK (ANR-AAP2024)

- *Redouane BOUGLIA*¹
- *Abderrahim JARDANI*²
- *Vanessya LABORIE*¹
- *Minh Tan VU*¹

¹CEREMA Risques, Eaux et Mer / Équipe de recherche RHITME— CEREMA Risques, Eaux et Mer / Équipe de recherche RHITME, associée au laboratoire M2C, UMR 6143 — Laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière, France

²Université de Rouen Normandie, CNRS, UMR 6143 M2C — Morphodynamique Continentale et Côtière, Mont-Saint-Aignan, France

Projet HYDROLINK

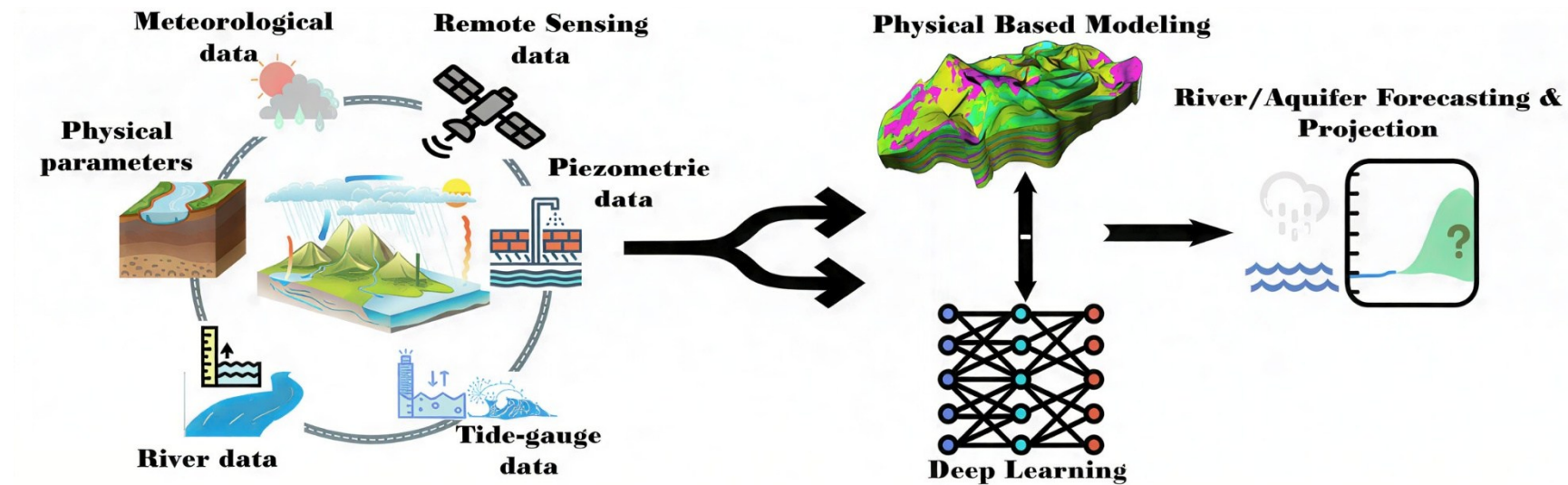
- Projet financé par l'ANR
- Le changement climatique accentue les événements extrêmes.
- Les estuaires sont des zones critiques à enjeux



Estuaire de la Seine

Projet HYDROLINK

- Mieux comprendre et présenter la dynamique de l'estuaire de la Seine.
- Anticiper les impacts du changement climatique,
- Fournir des indicateurs et des outils aux acteurs régionaux et nationaux.

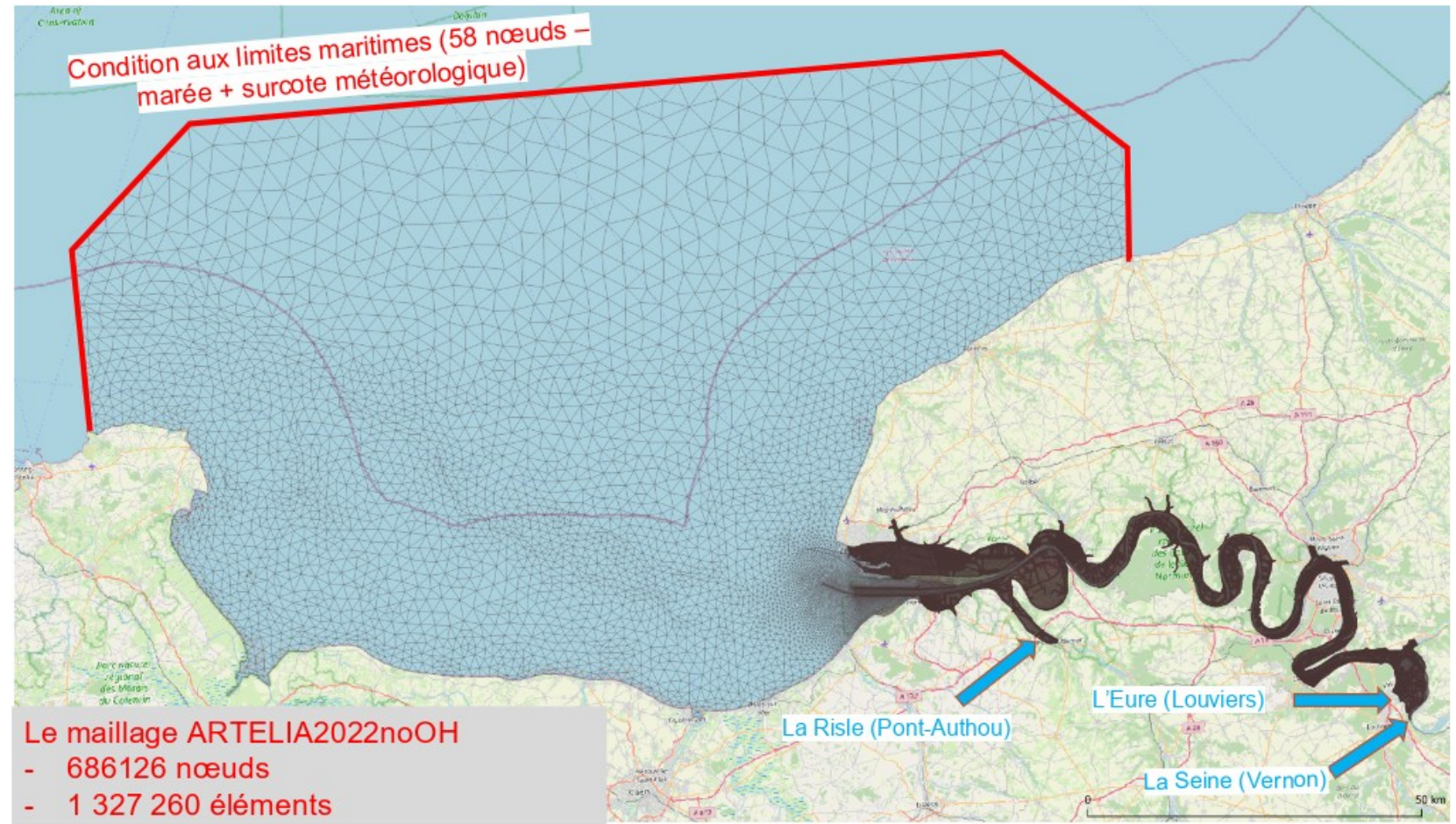


Jardani & al, univ. Rouen, 2024

Stratégie → Coupler modèles physiques et intelligence artificielle (IA)

Couplage de TELEMAC 2D avec l'IA :

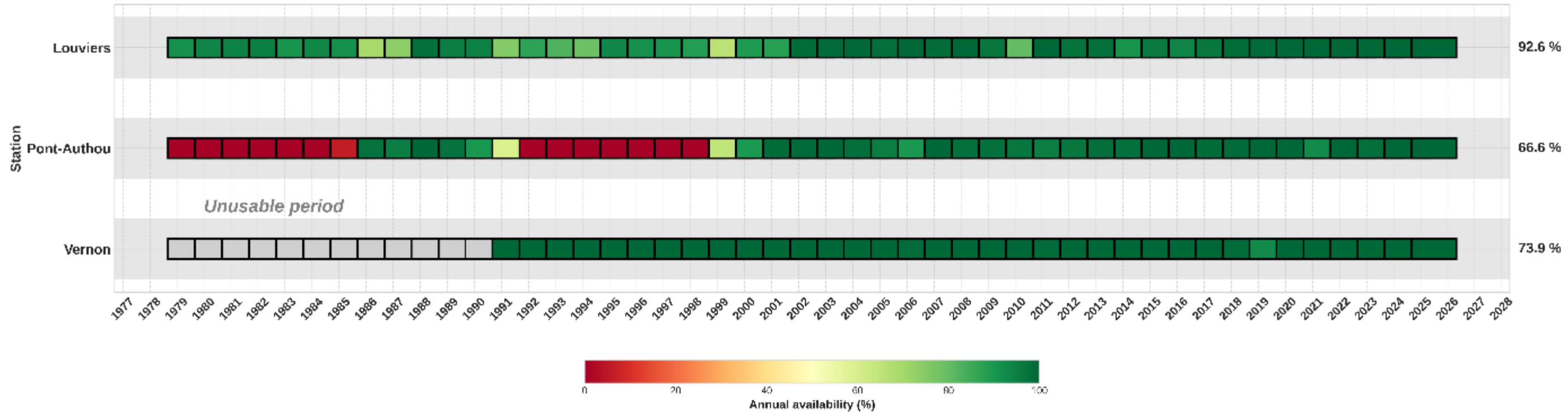
- Modèle développé pour le projet GIPSA-ATLANTIS
- Basé sur TELEMAC 2D (V.LABORIE 2025)
- Modèle fonctionnel mais limité



Modèle de l'estuaire de la Seine (V.LABORIE 2025)

Reconstruction des données de débit

- **Objectif : reconstruire débits depuis 1979**
- **Reconstruction précises même en extrêmes**
- **Modèle également utilisable pour simuler des scénarios climatiques.**

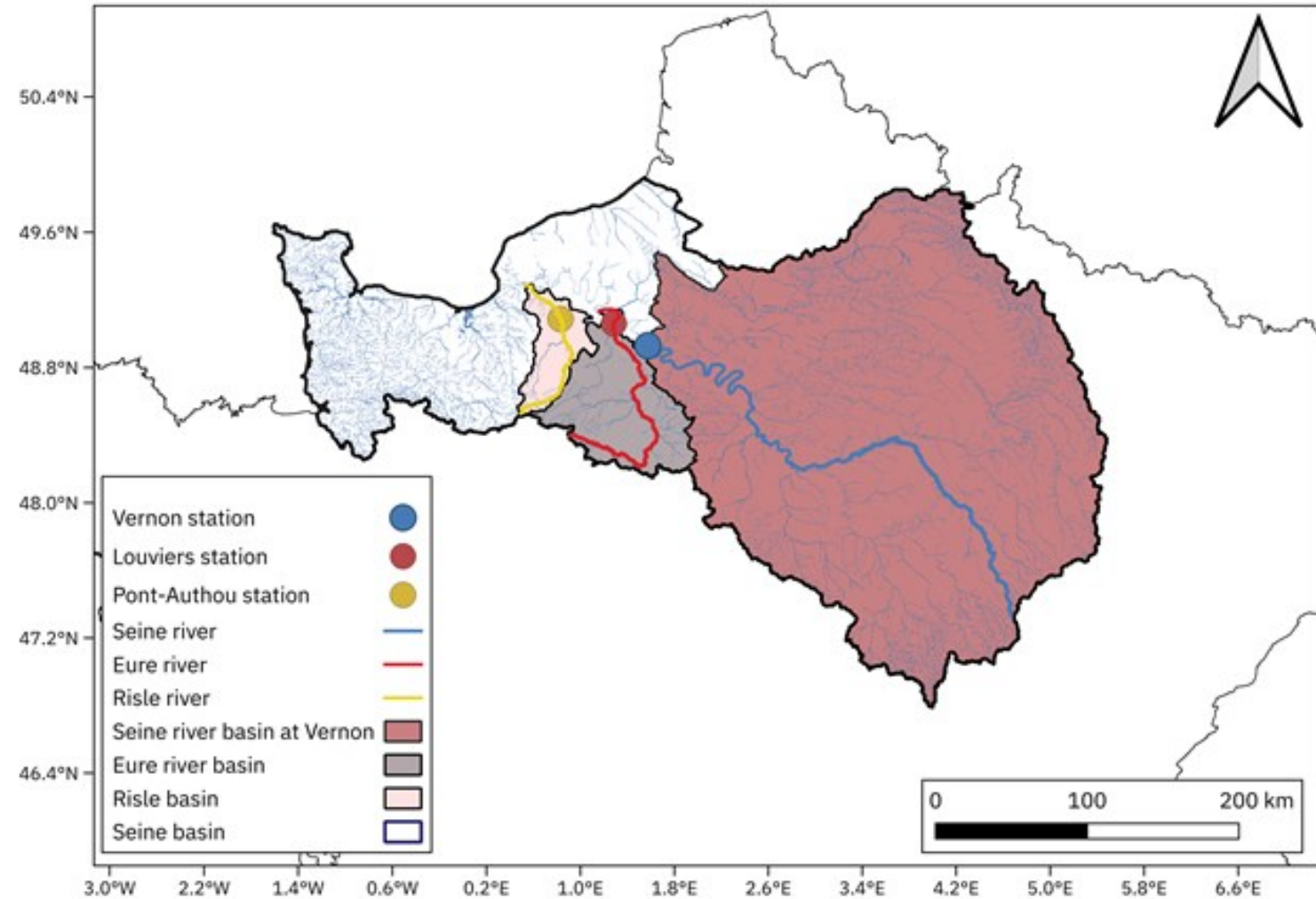


Données utilisées

SAFRAN : Système d'analyse fournissant principalement des données météorologiques fines pour la France.

- Résolution spatiale : $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ ($\approx 0.072^\circ$),
- Résolution temporelle : Quotidienne

Données utilisées : **précipitations** et **température**



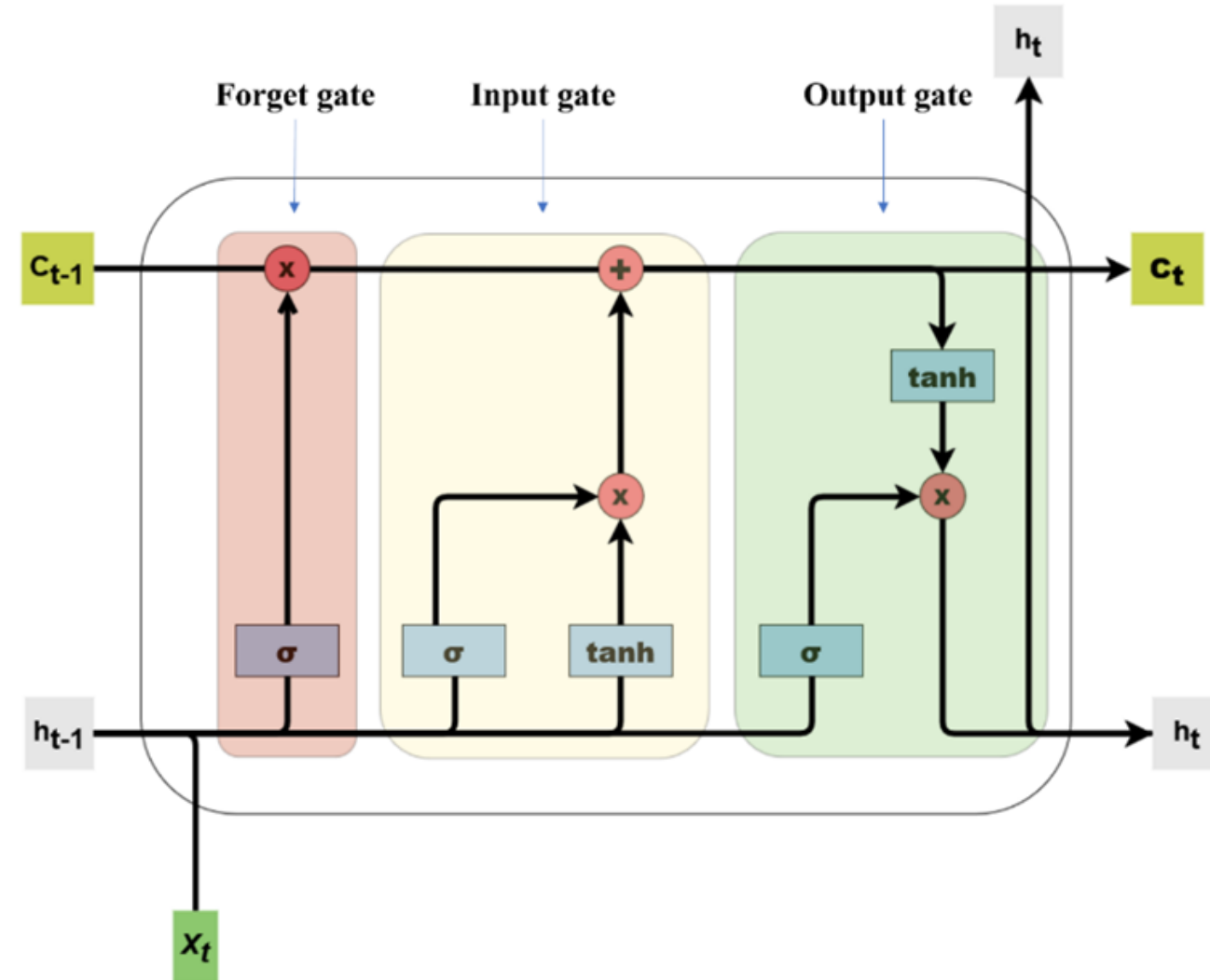
Méthodologie : LSTM

Avantages :

- Gestion des dépendances temporelles
- Capacité à traiter des séquences non linéaires
- Robustesse aux séries bruitées

Limites :

- Données spatiales
- Hyperparamètres sensibles



LSTM

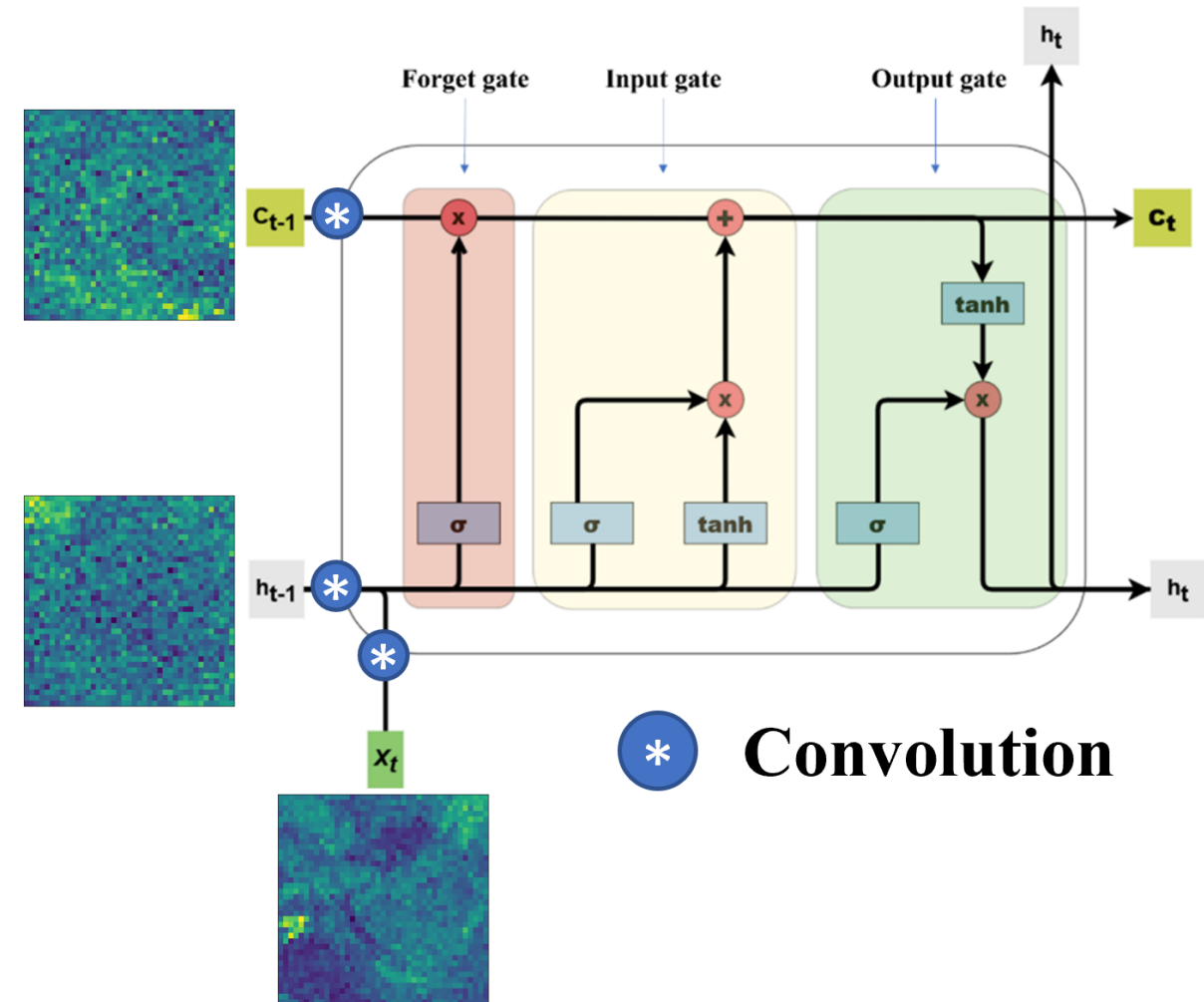
Méthodologie : ConvLSTM

Avantages :

- Captures des dépendances spatiales et temporelles
- Meilleure performance sur données en grille
- Robustesse aux variations locales

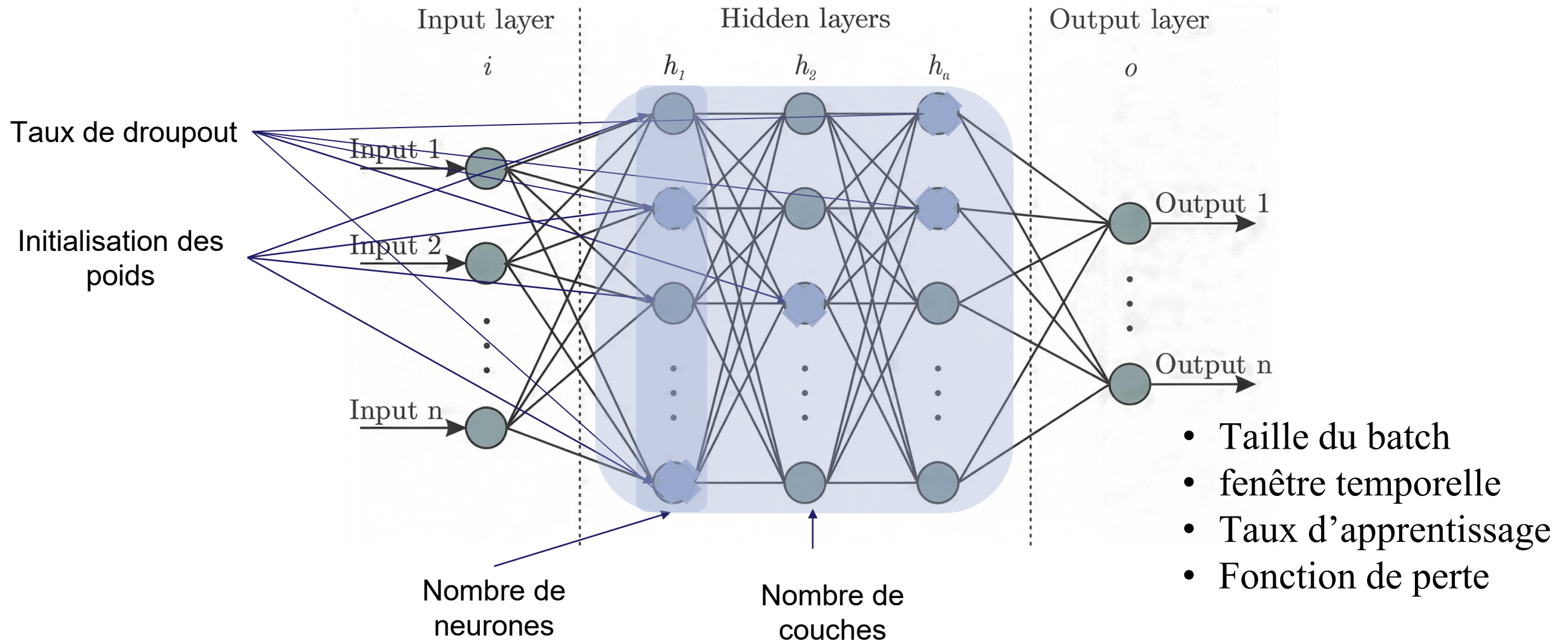
Limites :

- Complexité computationnelle élevée Données importantes nécessaires
- Hyperparamètres sensibles



ConvLSTM

Méthodologie : optimisation des hyperparamètres avec Optuna



Méthodologie : évaluation des modèles

- **Statistiques classiques** : NSE, RMSE pour obtenir une vision globale de la performance des modèles.

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

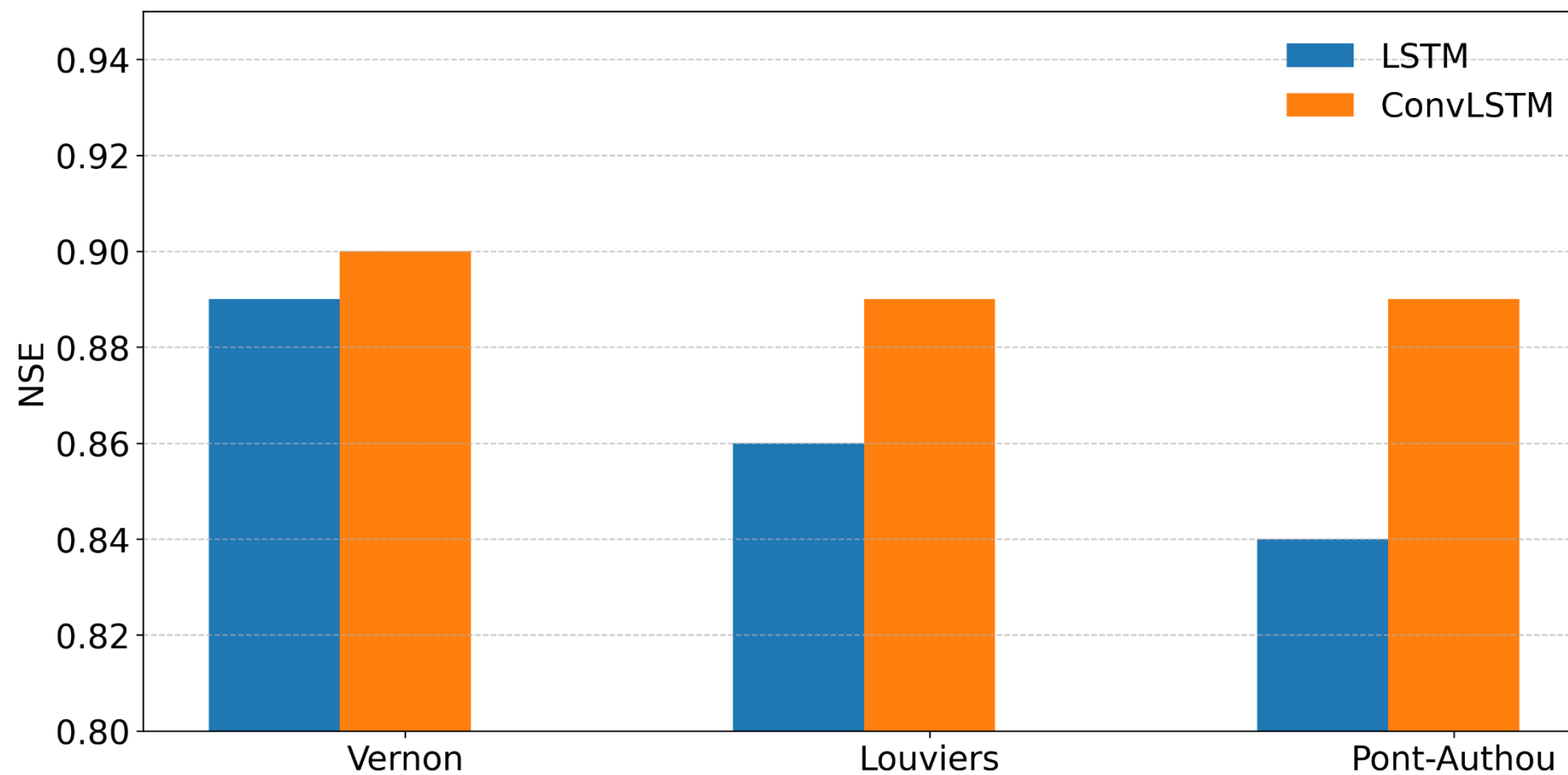
- **Évaluation durant les événements extrêmes** :
 - erreur sur le débit de pointe
 - erreur sur le volume de crue

- **Indicateurs hydrologiques** : QJXA, moyenne annuelle, etc., pour évaluer la capacité du modèle à reproduire :
 - les débits moyens,
 - la variabilité,
 - les extrêmes (crues et étiages)

- Comparaison avec les résultats du projet **Explore2**

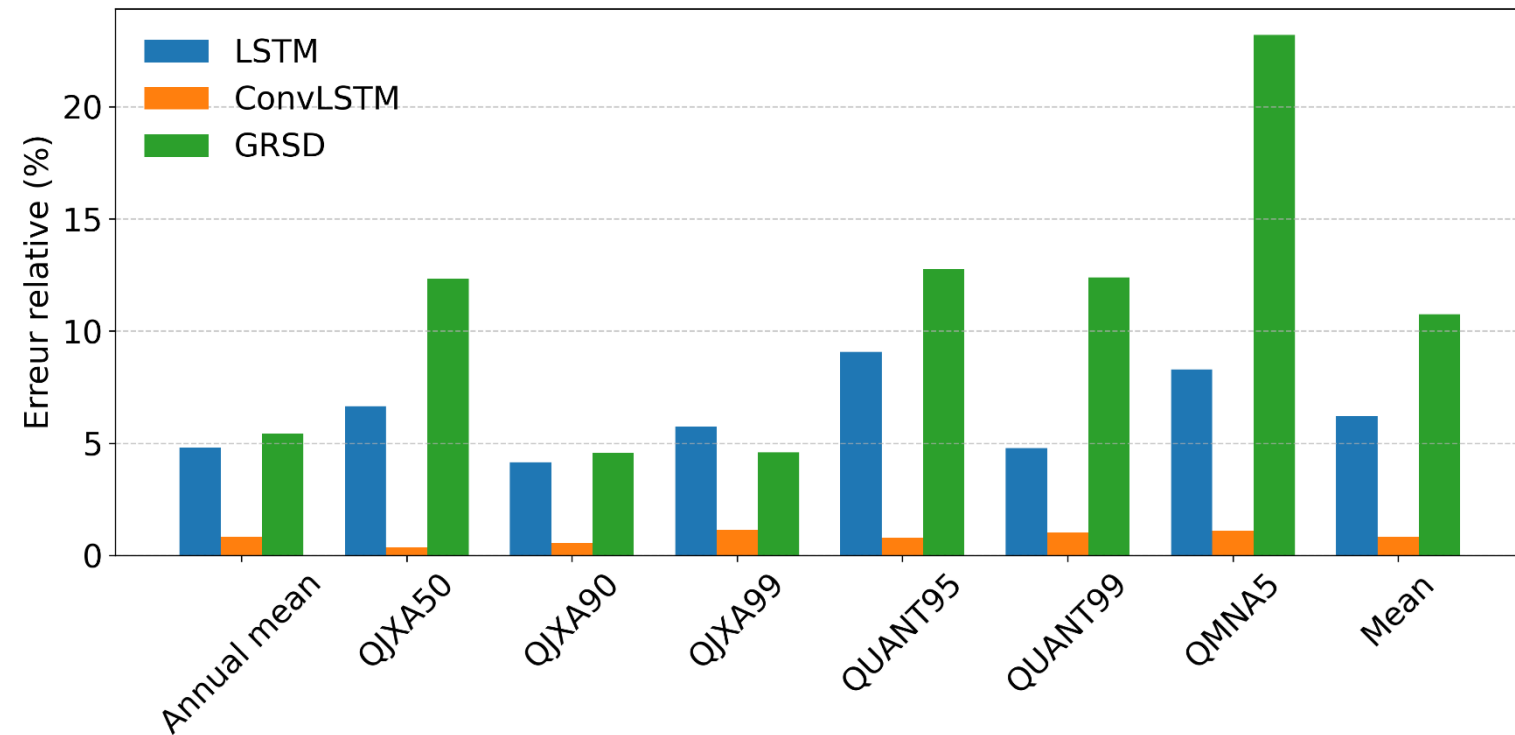


NSE moyen pour les périodes de test (1980-2006 et 2020-2025)



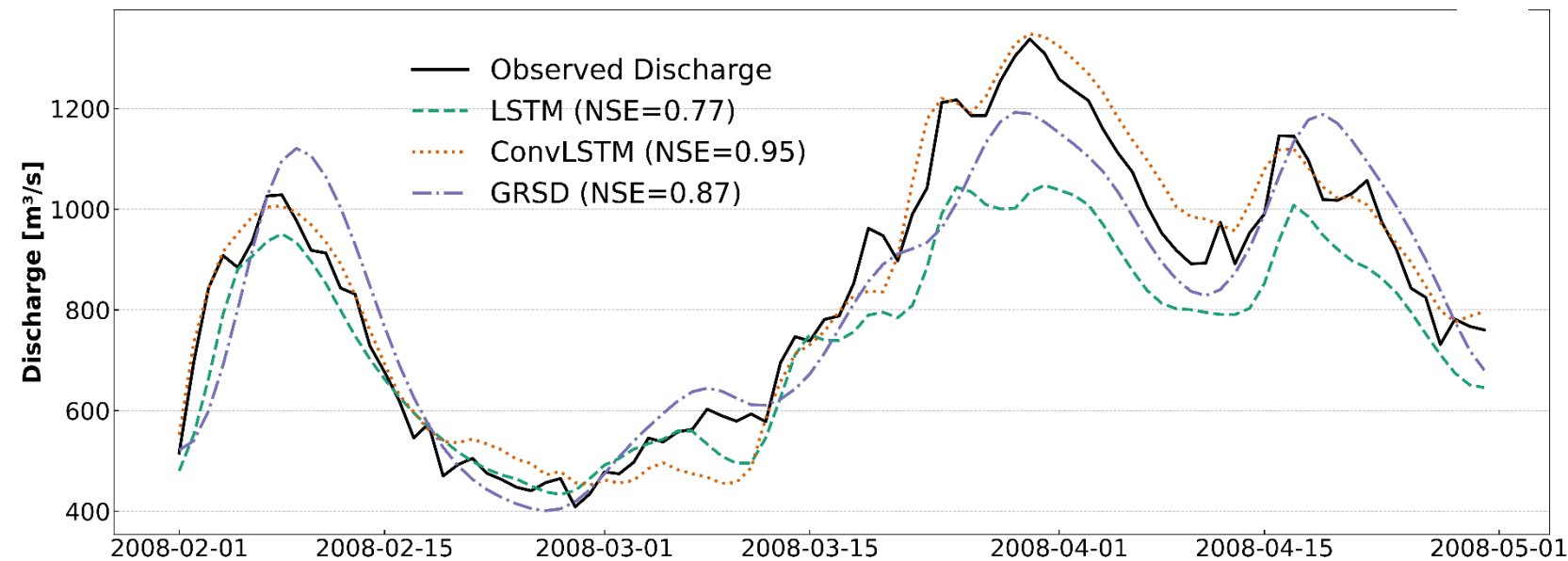
Métriques hydrologiques des modèles pour Vernon

- **ConvLSTM** : Très faible erreur (≤ 1 %) et cohérence sur tous les régimes de débit.
- **LSTM** : Déviations modérées (5–9 %) et précision limitée sur les extrêmes.
- **EXPLORE2 (GRSD)** : Erreurs élevées (15–25 %) et mauvaise capture des débits extrêmes.



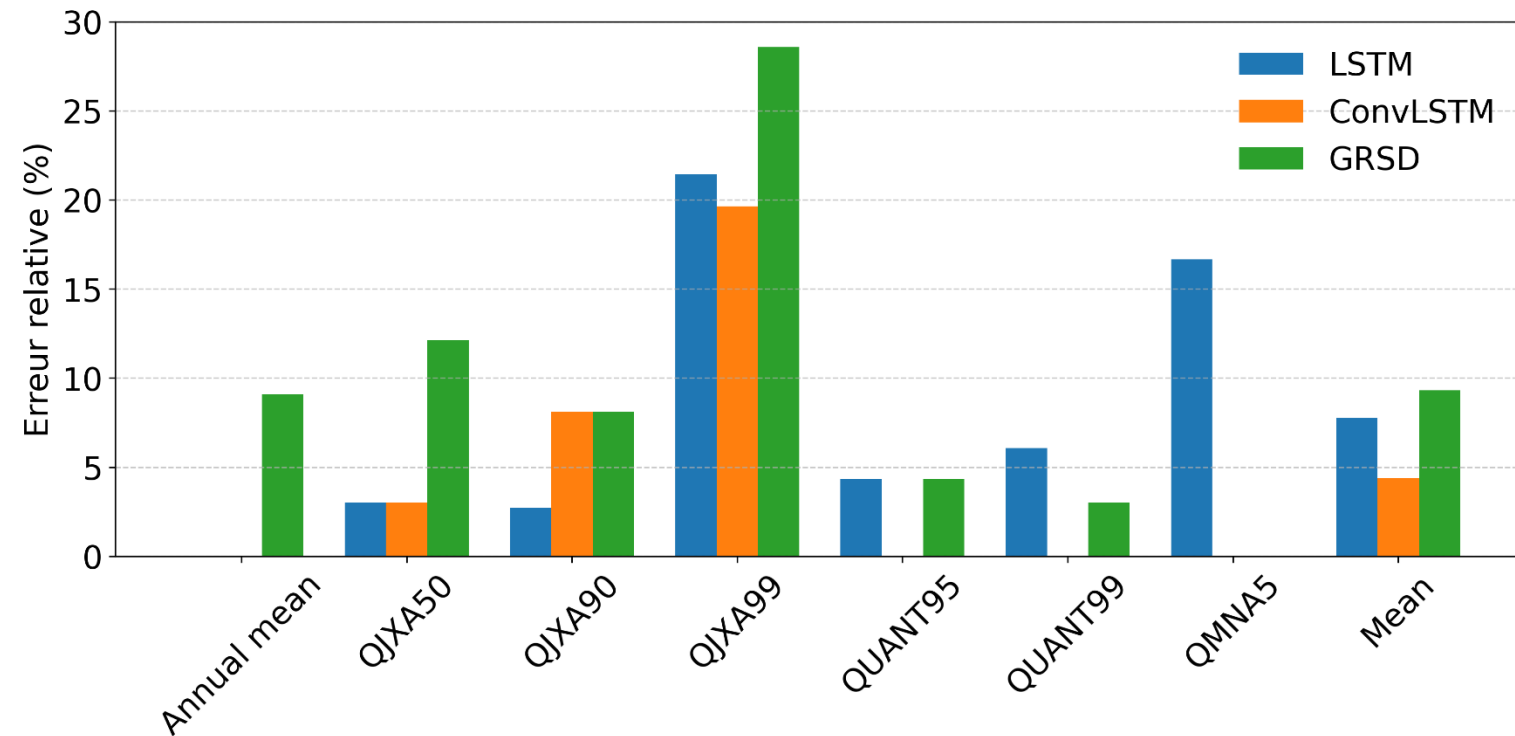
Performance durant les événements extrêmes pour Vernon

- **ConvLSTM** : Atteint les débits de pointe observés, représentation précise des crues extrêmes.
- **LSTM** : Sous-estime généralement les pics de débit.
- **EXPLORE2 (GRSD)** : Moins précis pour les débits extrêmes, performances inférieures à ConvLSTM.



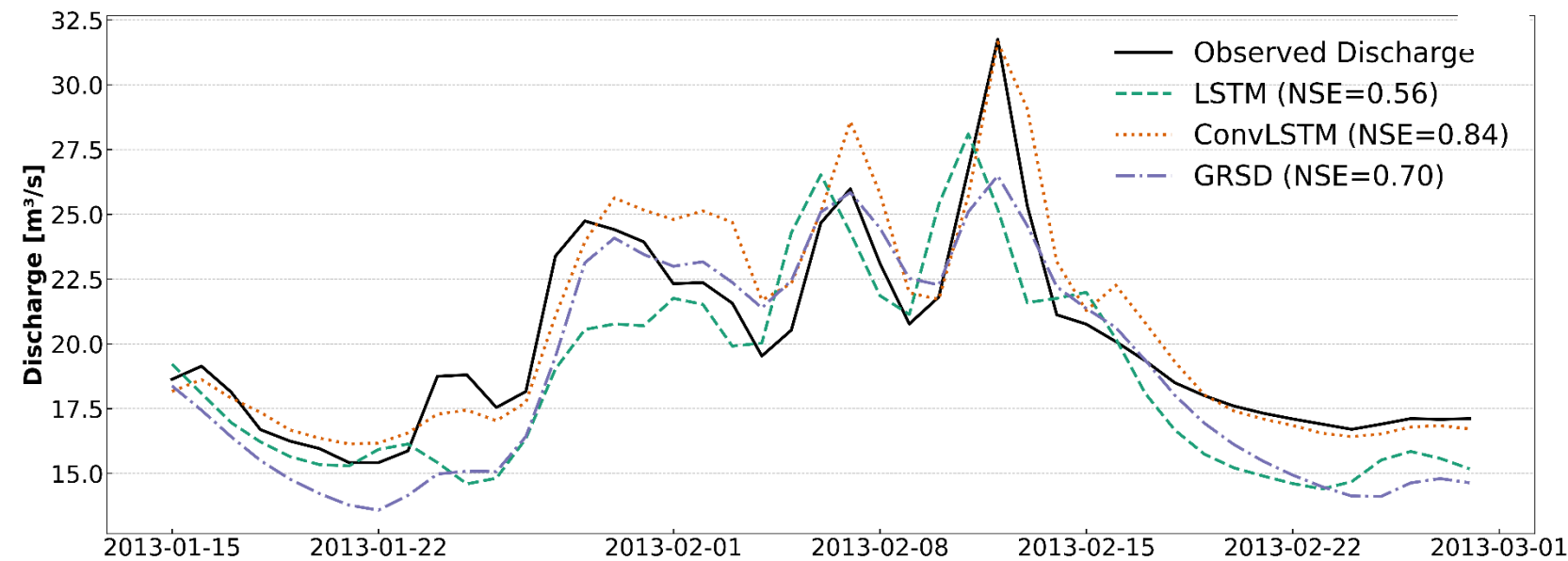
Métriques hydrologiques des modèles pour Pont-Authou

- **ConvLSTM** : Cohérence élevée sur hautes et basses eaux, QJXA90 moins précis.
- **LSTM** : Débit moyen correct, mais erreurs notables pour QJXA99 et QMNA5.
- **EXPLORE2 (GRSD)** : Erreurs importantes pour extrêmes et variabilité des débits



Performance durant les événements extrêmes pour Pont-Authou

- **ConvLSTM** : Reconstruction équilibrée et robuste des crues extrêmes.
- **LSTM** : Sous-estimation systématique des débits de pointe.
- **EXPLORE2 (GRSD)** : Surestime fortement les pics de crue, valeurs de haut débit irréalistes.



Conclusion

- Le deep learning permet de reconstruire chroniques de débit même avec des données lacunaires sur la Seine et ses affluent.
- **ConvLSTM**, qui intègre des données météorologiques en grille, a de meilleures performances LSTM.
- **Limites :**
 - Performances réduites dans les bassins karstiques où les processus souterrains ne sont pas capturés.
 - **ConvLSTM** très coûteux en calcul, limitant son optimisation et sa scalabilité.
- **Perspectives :**
 - Simplifier le modèle tout en préservant sa capacité à saisir les dépendances spatiotemporelles.
 - Ajouter de nouvelles variables en entrée afin de mieux représenter la dynamique interne.

Merci pour votre attention

www.cerema.fr

