

1<sup>er</sup> CONGRÈS EAU &  
INTELLIGENCE  
ARTIFICIELLE

4-5-6 mars 2026

**ISL**  
Ingénierie

# Modèles hybrides IA-physique en hydrologie: apports et limites face aux approches classiques

ISL Ingénierie

Moez JELLOULI (Analyse numérique, Data Science)  
Jérémy SAVATIER (Hydrologie, Hydraulique)

## PRÉSENTATION D'ISL

### Bureau d'études français

Créé in 1986, initialement  
spécialisé dans les ouvrages  
hydrauliques

En 2025 : 145 collaborateurs

[www.isl.fr](http://www.isl.fr)

#### Activités



Barrages et  
ressource en eau



Mer et côtes



Hydroélectricité & Energies  
nouvelles



Rivières et milieux  
aquatiques



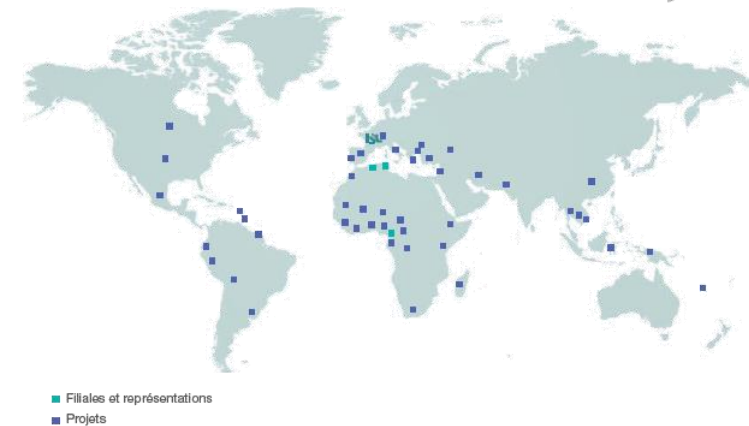
Ports & voies  
navigables



Ouvrages spéciaux



Prévention des  
inondations & ouvrages  
de protection



#### // FRANCE

Paris

Lyon

Montpellier

Angers

Nantes

St Jean de Luz

Lille

Bordeaux

Chambéry



## CONTEXTE DU TRAVAIL

Projet « Jumeaux numériques ISL » lancé en 2021: création de répliques numériques d'un système réel.

**JumHydro**: jumeau numérique d'un bassin versant. Pour l'analyse des données il s'appuie sur des **modèles hybrides IA-physique**.

Étapes réalisées:

- Preuve du concept
- Tests et validation sur quelques exemples simples



## PRINCIPE DES MODÈLES HYBRIDES

### Modèle "physique" :

Basé sur les principes de la physique.

Approche plus rigoureuse, moins souple

+ permet de mieux présenter les phénomènes physiques, en particulier ceux jamais observés

### Modèle "IA" :

Basé sur une approximation statistique empirique à partir des données

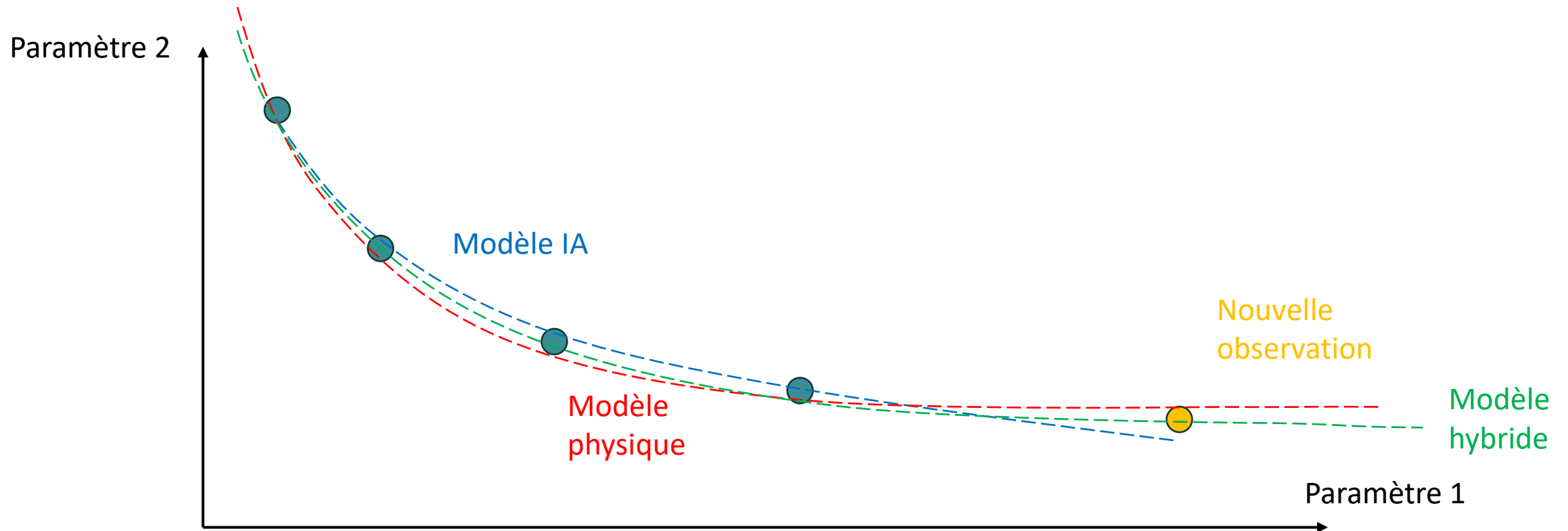
Approche plus intuitive, plus souple, plus spécifique à chaque cas

+ permet de capter des phénomènes qu'on a du mal à représenter par la rigueur scientifique

↑  
Modèle "hybride"

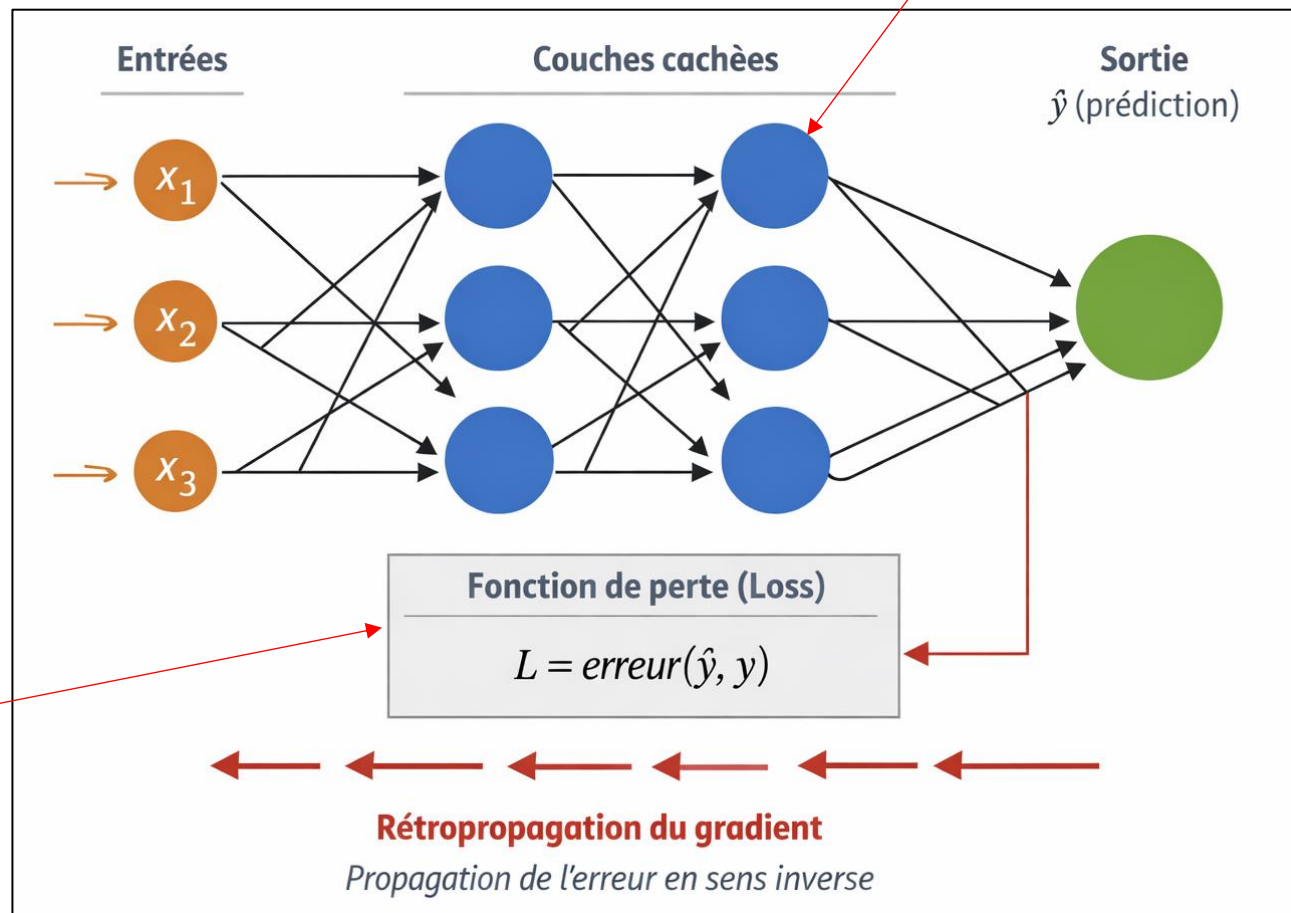


## EXEMPLE D'ILLUSTRATION



## MODÈLE HYBRIDE: EN PRATIQUE

Schéma classique  
d'un réseau de  
neurones



Fonction de perte avec une  
part qui représente les  
écarts par rapport au  
équations physiques



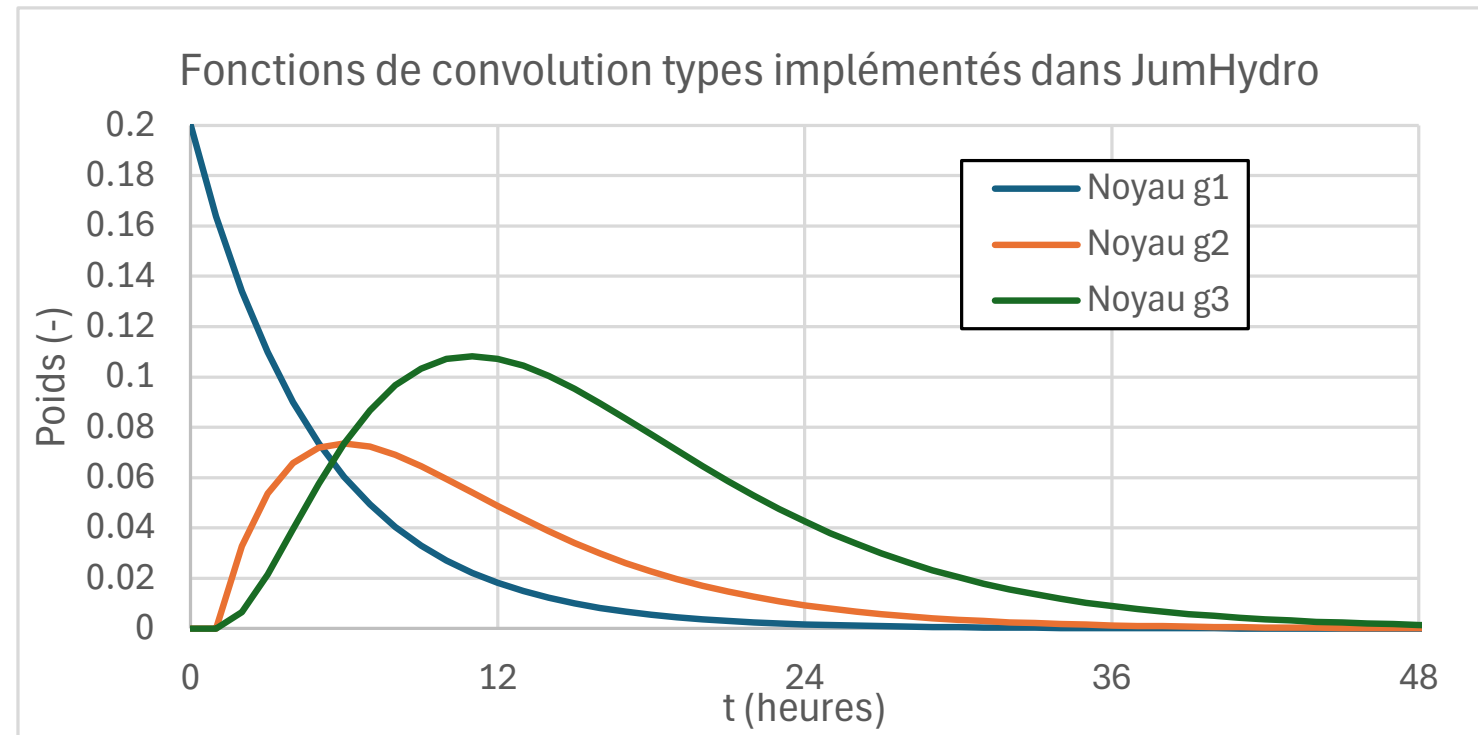
## MODÈLE HYBRIDE: EN PRATIQUE

Neurones de type  
hydrologie  
(2 à 4 paramètres  
variables par  
neurones)



Utilisés pour des couches  
représentant:

- la saturation du sol
- le ruissellement
- l'hydraulique fluviale
- l'hydrogéologie



## APPORTS ATTENDUS DE L'APPROCHE HYBRIDE

- Réduire les interventions humaines, en particulier en prévision d'une évolution dans le « Big Data »
- Plus de flexibilité dans les modèles complexes
- Introduire un certain degré d'empirisme pour combler des incertitudes sur les données d'entrée
- Précision et réactivité plus importante: en particulier pour les crues rapides.



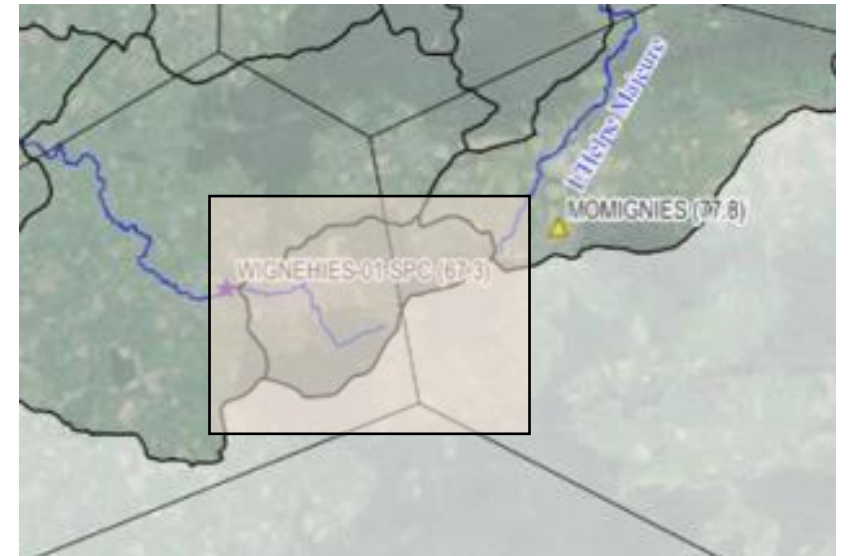


## PREMIER EXEMPLE D'APPLICATION

Modèle simple sur un petit bassin versant (27,4 km<sup>2</sup> sur l'Helpe Mineure).

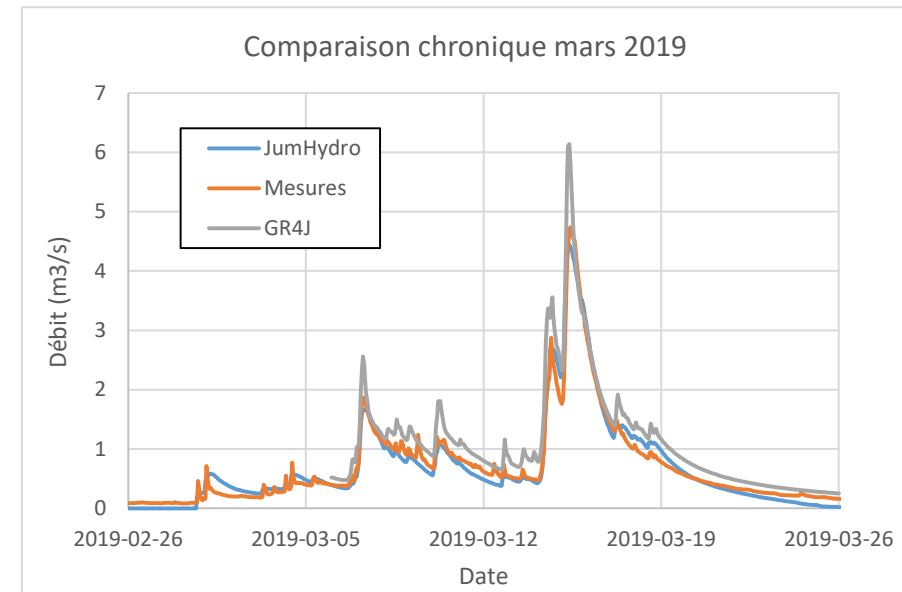
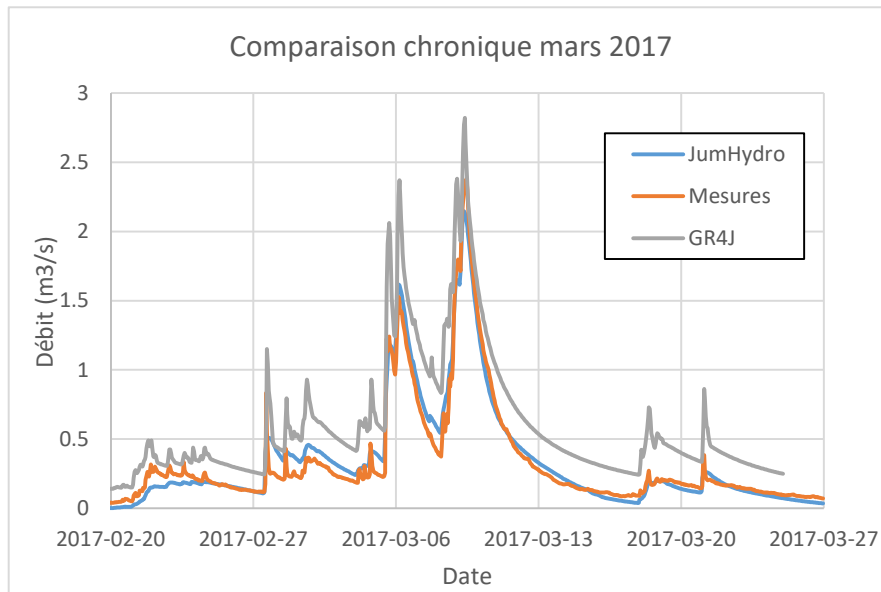
2 stations pluviométriques en périphérie du BV

Modèle hybride avec 9 paramètres calés sous TensorFlow



## PREMIER EXEMPLE D'APPLICATION

Entraînement sur 2 crues récentes

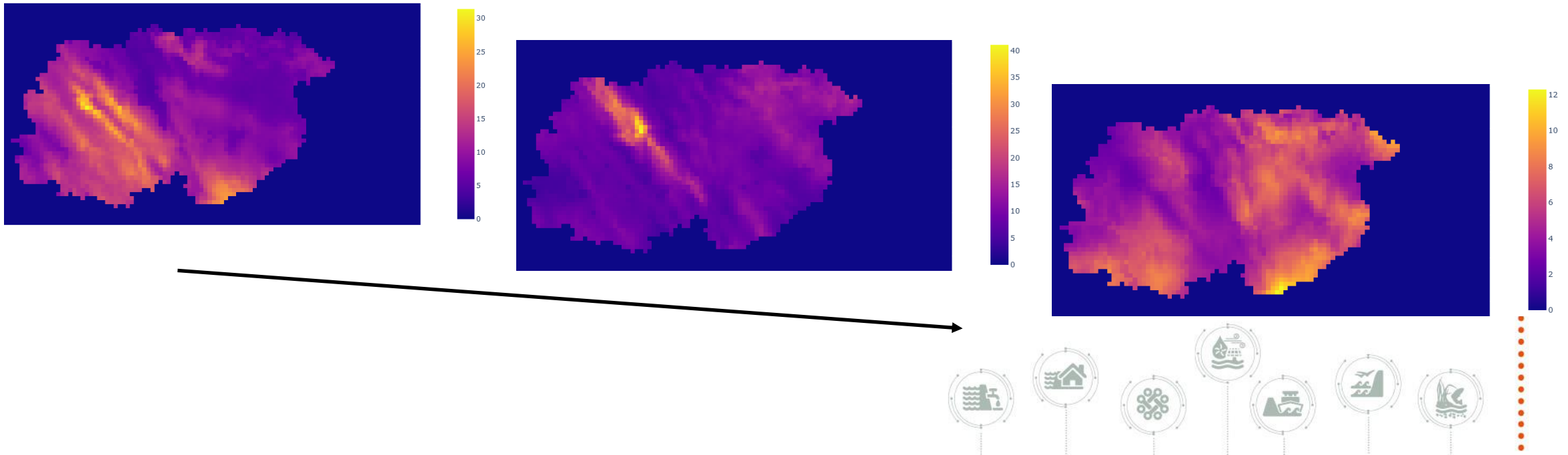


## DEUXIÈME EXEMPLE D'APPLICATION

Bassin versant de l'Argens (station Roquebrune-sur-Argens).

Surface totale de 2503 km<sup>2</sup>

Pluies radar type Antilope (Météo-France): précipitations horaires en mm par pixel de 1 km<sup>2</sup>



## DEUXIÈME EXEMPLE D'APPLICATION

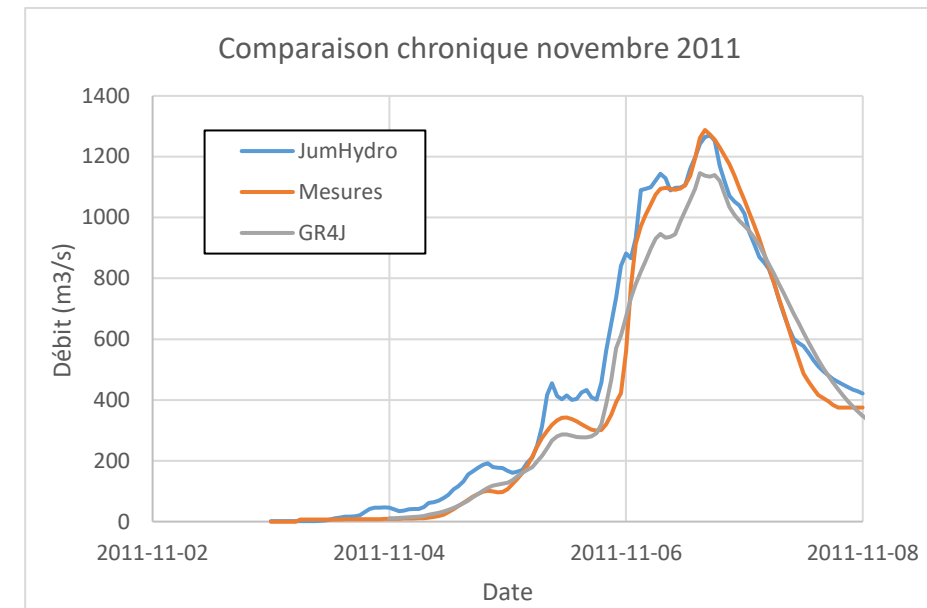
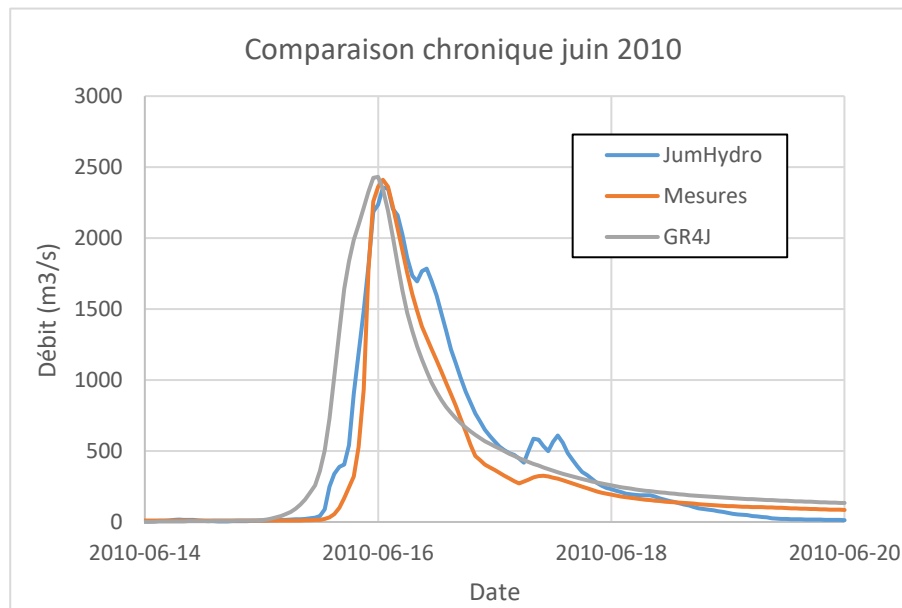
Modèle hybride:

- Pour accélérer les temps de calcul: les pixels sont regroupés en en 6x6.
- Modèle avec 225 paramètres calés sous TensorFlow.
- Ajout d'une part de perte pour lisser les écarts entre pixels voisins.



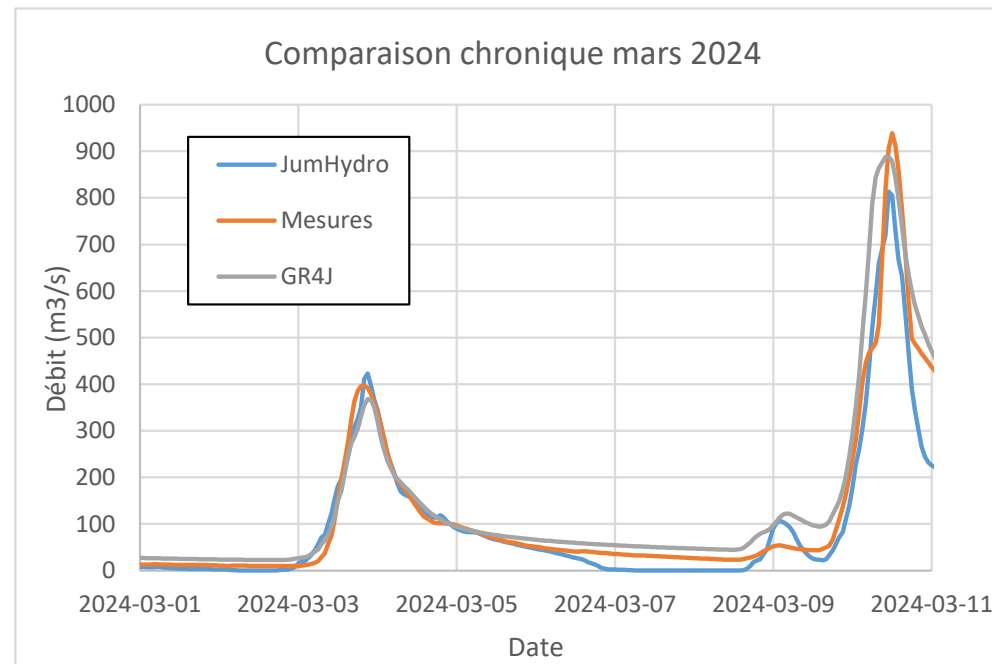
## DEUXIÈME EXEMPLE D'APPLICATION

Résultats de l'entraînement (6 chroniques):



## DEUXIÈME EXEMPLE D'APPLICATION

Résultats d'un test à l'aveugle sur une chronique récente:





## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

**Preuve de concept:** les tests menés sont positifs, avec comme avantages des modèles hybrides:

- Compréhension et calage automatisée du fonctionnement d'un bassin versant.
- Des modèles moins rigides, intégrant une part d'empirisme pour tenir compte des incertitudes et se rapprocher au mieux des mesures disponibles.

**Perspectives:**

- Améliorer la précision des premiers modèles hybrides
- Ajouter de neurones de propagation hydraulique et de gestion d'ouvrages (ponts, barrages, seuils)
- Ajouter de neurones pour coupler avec l'hydrogéologie pour construire un jumeau complet de l'hydrosystème fluvial.
- Passer à la taille supérieure en termes de taille de modèles.





MERCI POUR VOTRE ATTENTION!

CONTACT: [jellouli@isl.fr](mailto:jellouli@isl.fr)