



Modélisation prédictive de la quantité et de qualité de l'eau par machine learning et avec un modèle couplé ML-base physique

Mathilde Joffre^{a,b,c}, Roxelane Cakir^c, Pierre Chevalier^c, Joana Roussillon^b, Jean-Michel Martinez^b, José-Miguel Sánchez-Pérez^a, Sabine Sauvage^a

^a Centre de Recherche sur la Biodiversité et l'Environnement (CRBE), Université de Toulouse, CNRS, IRD, Toulouse INP, Toulouse, France

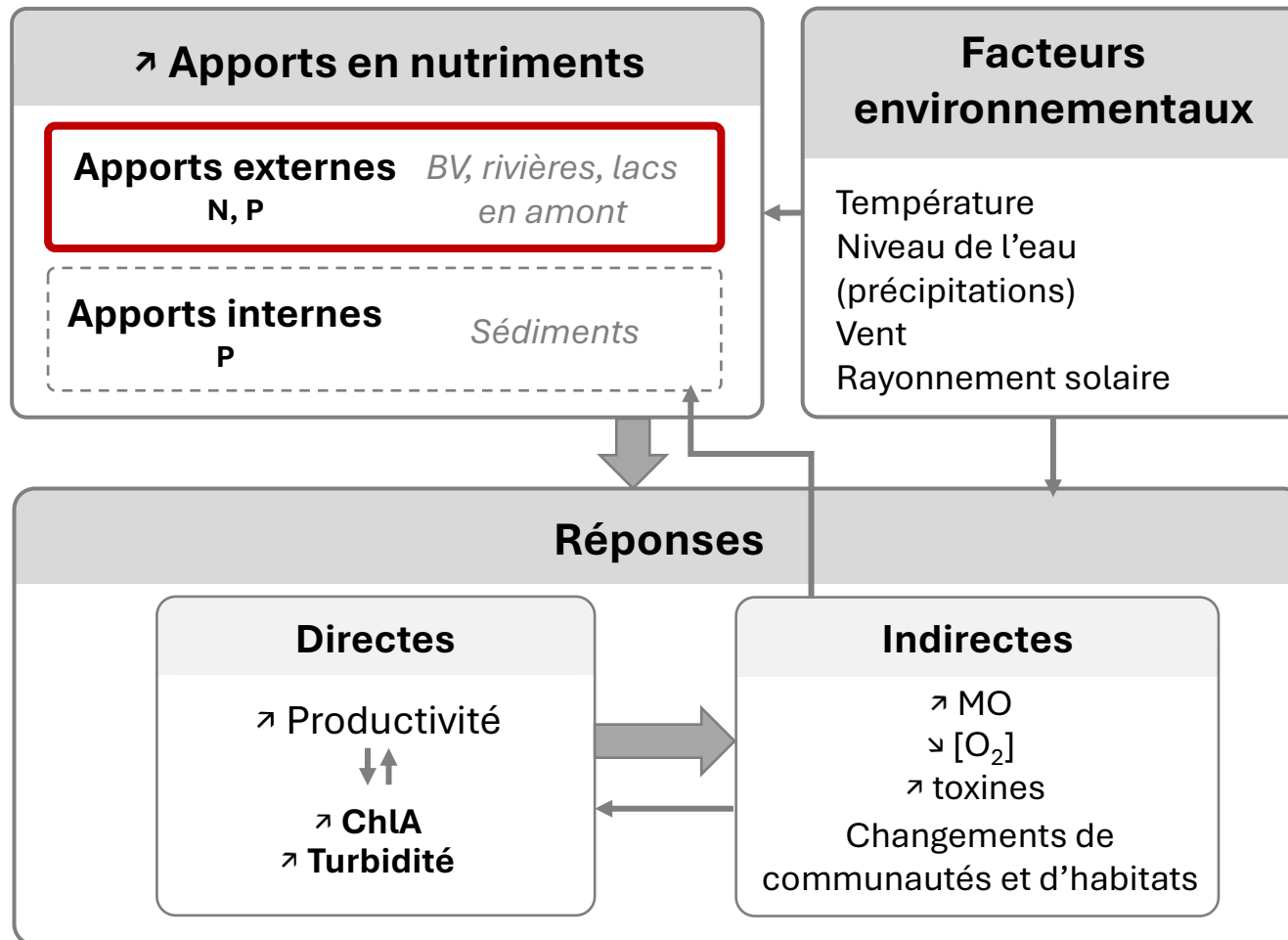
^b Géosciences Environnement Toulouse (IRD/CNRS/UT), Toulouse, France

^c HETWA, Toulouse, France

5 mars 2026

Problématique

Qualité de l'eau : eutrophisation



Eutrophisation = ensemble de phénomènes causés par **un apport en nutriments (N/P)** entraînant une surproduction de matière organique

Quantification du risque d'eutrophisation dans un territoire

→ Comment estimer les apports en nutriments (N, P) à partir des caractéristiques des BV ?

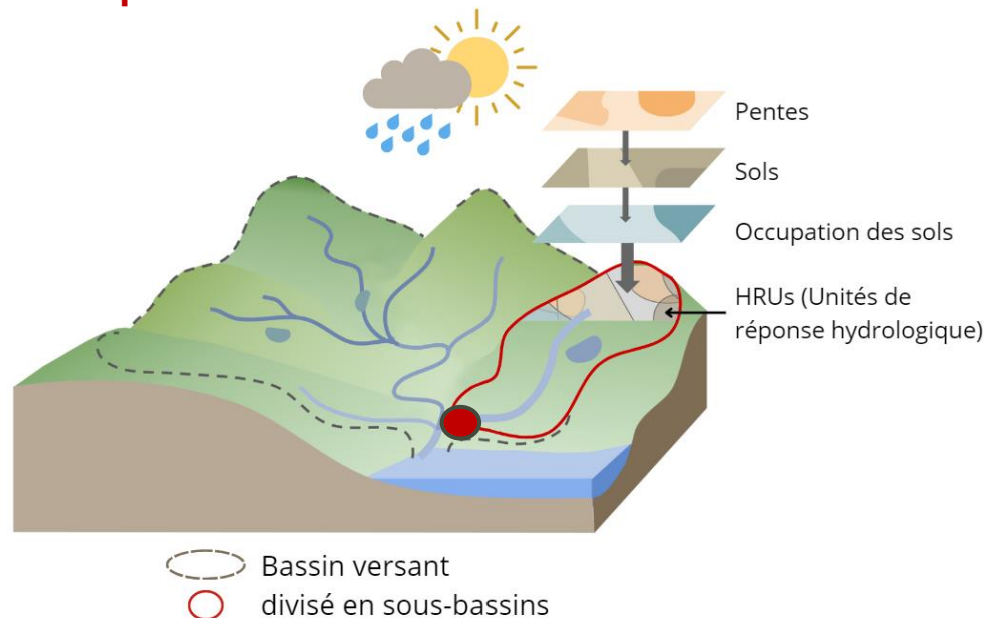
Problématique

Modélisation de la quantité et qualité de l'eau

MODÈLE PHYSIQUE : SWAT

Neitsch et al., 2011

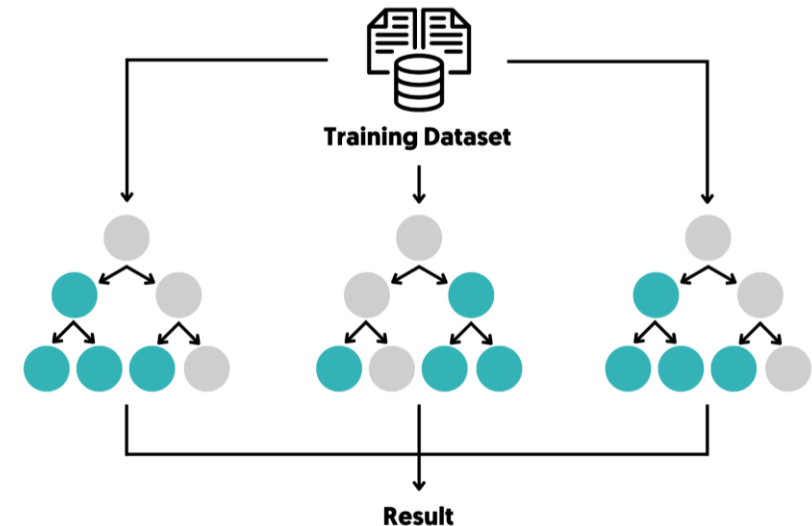
- BV Adour-Garonne déjà étudié *Grusson et al., 2018; Cakir et al., 2020; Manteaux et al., 2023...*
- **Journalier**
- **Hydrologie + N / P**
- **Nécessité de connaître les itinéraires techniques**
- **Peu flexible spatialement**



MODÈLE EMPIRIQUE : RANDOM FORESTS

Breiman, 2001

- Modèles basés sur les propriétés des BV + échelle régionale *Sadayappan et al., 2022; Shen et al., 2020; Tso et al., 2023*
- Saisonniers / interrannuels
- **Incertitudes via quantiles RF**
- **Flexibilité**
- **Généralisation/ extrapolation**



1) Modélisation journalière des débits + concentrations en nutriments



- Azote total
- Nitrates
- Phosphore total
- Orthophosphates

2) Comparaison / couplage avec le modèle physique SWAT

→ Généralisation spatiale et temporelle

I - Comparaison des approches sur le BV de la Garonne

Méthodologie - SWAT

MODÈLE SWAT

20 stations (débits)
15 stations (azote)
Calibration 2000-2010

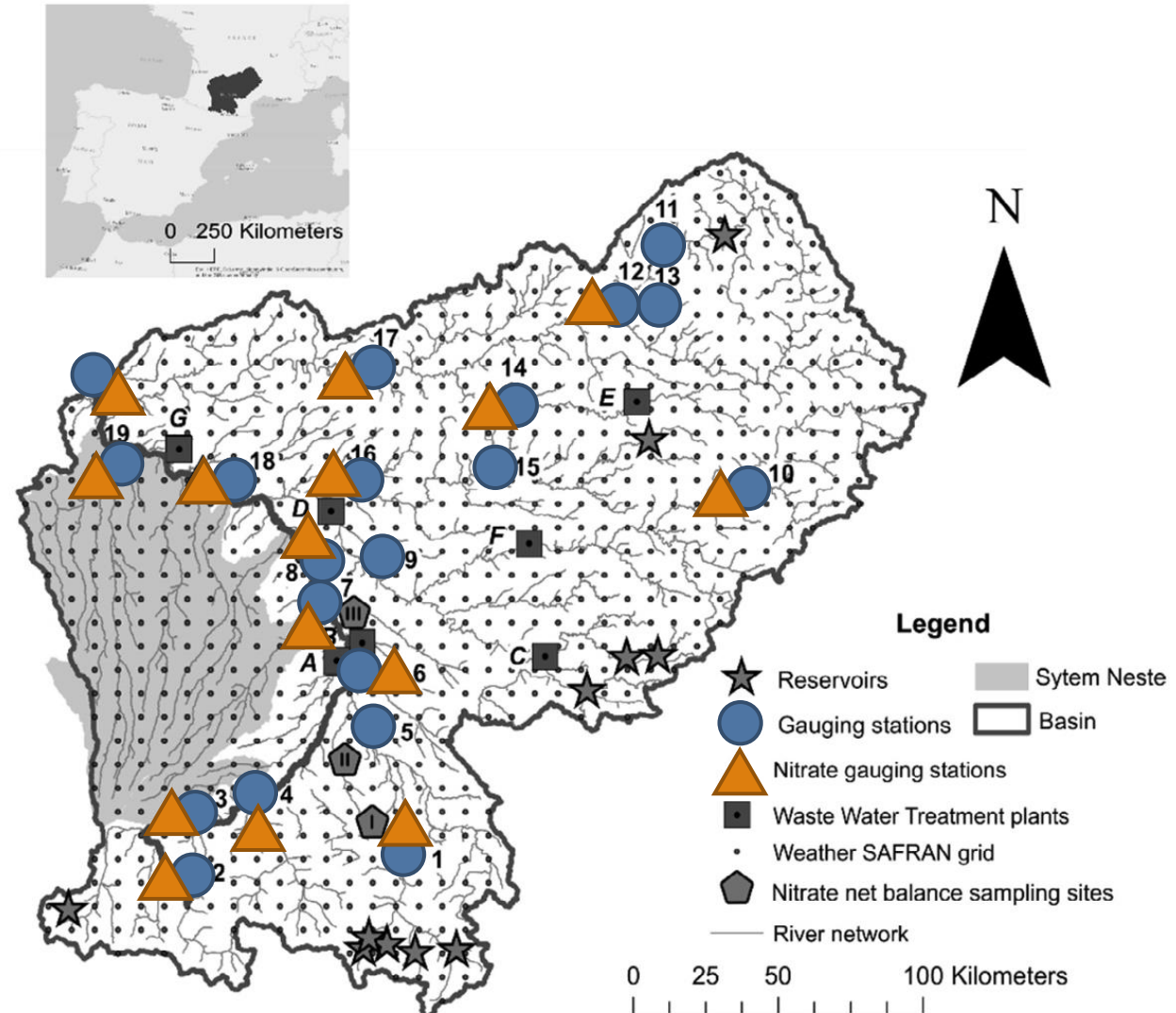
Cakir et al., 2020;
Manteaux et al., 2023



1320 sous-bassins, ~ 12 500 HRUs

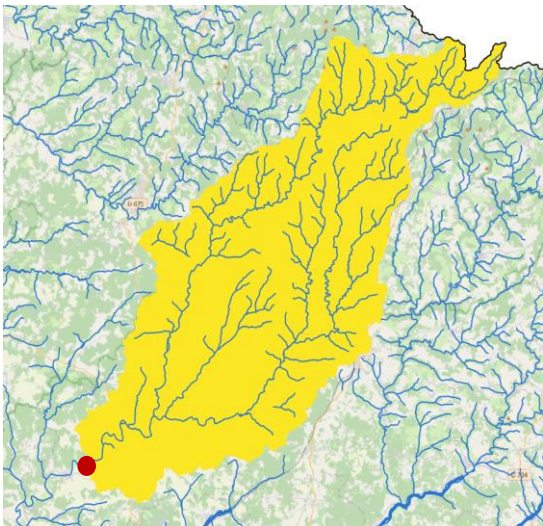
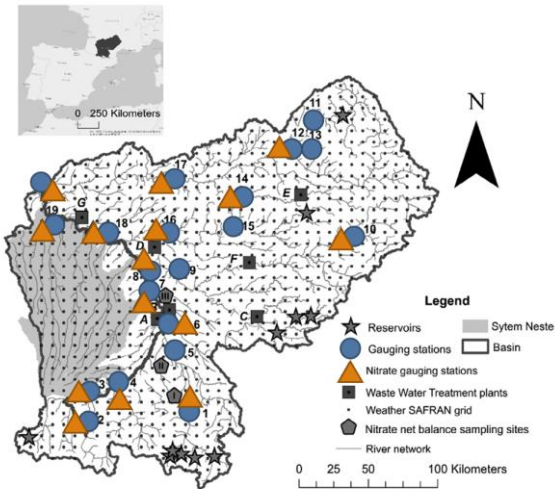
Inclusion STEPs et barrages
Itinéraires techniques moyennés

Calibration des **flux** d'azote



I - Comparaison des approches sur le BV de la Garonne

Méthodologie - RF



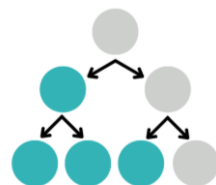
MODÈLES RF

20 stations (débits)
15 stations (azote)
Calibration 2015-2025

Quantité/qualité de l'eau

Débits, TN, TP,
 NO_3^- , PO_4

Variables environnementales (BV)



Quantile
Random Forests

* Avec et sans cumul météorologique

Caractéristiques des stations

- Surface drainée
- Ordre de strahler
- Altitude, latitude, longitude
- Canal / zone de transition

Données climatiques (SAFRAN):

- Précipitations
- Température *

Données d'occupation du sol et gestion

- OS (RPG, BDTPOPO, CLC; bassin-versant et zone riparienne)
- Pression agricole (Agreste)
- Zones tampons (BCAE, IGN)
- STEP et rejets industriels (.gouv)

Terrain physique

- Type de sol et propriétés (SGDBE, LUCAS)
- Pente (DEM, IGN)

Méthodologie de comparaison

MODÈLE SWAT

20 stations (débits)
15 stations (azote)
Calibration 2000-2010

X

MODÈLES RF

20 stations (débits)
15 stations (azote)
Calibration 2015-2025

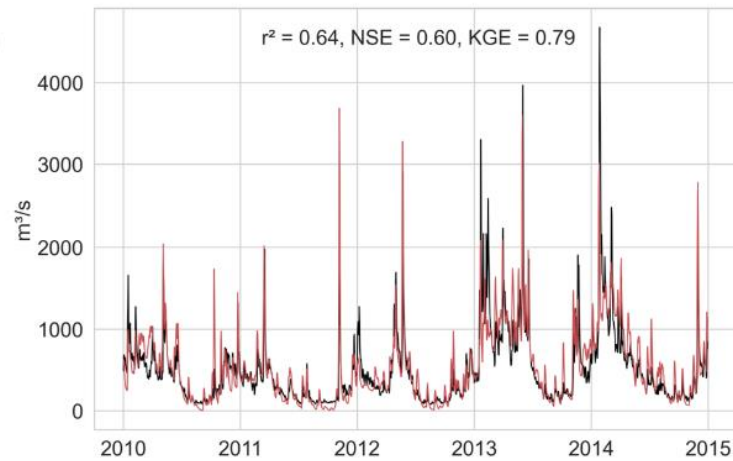
Comparaison temporelle (2010-2015)
sur les stations utilisées lors de la
calibration/entraînement

Comparaison spatiale (2010-2015)
sur de nouvelles stations

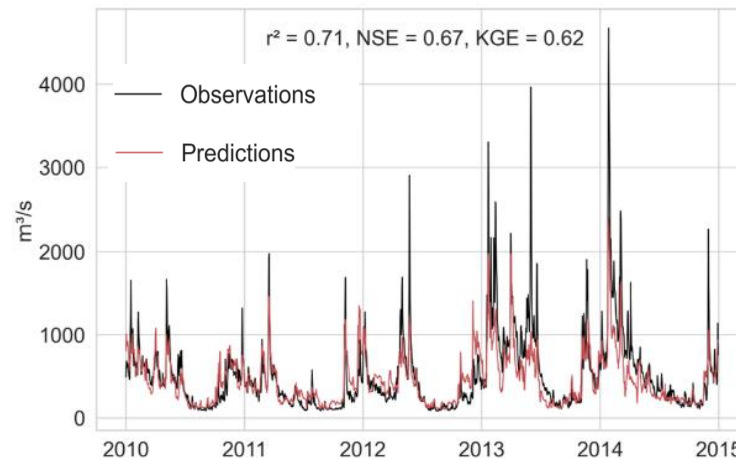
I - Comparaison des approches sur le BV de la Garonne

Résultats - débits

SWAT



RF



Débits

Validation temporelle :

SWAT < RF

KGE=0.55

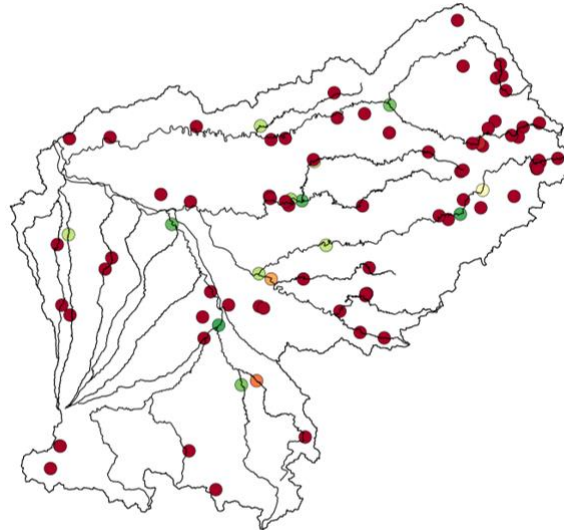
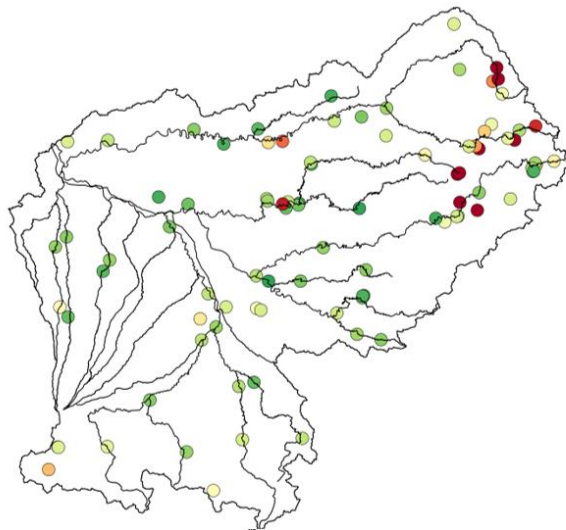
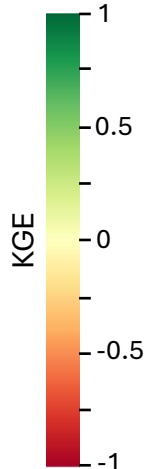
KGE=0.62

Validation spatiale :

SWAT >> RF

KGE=0.30

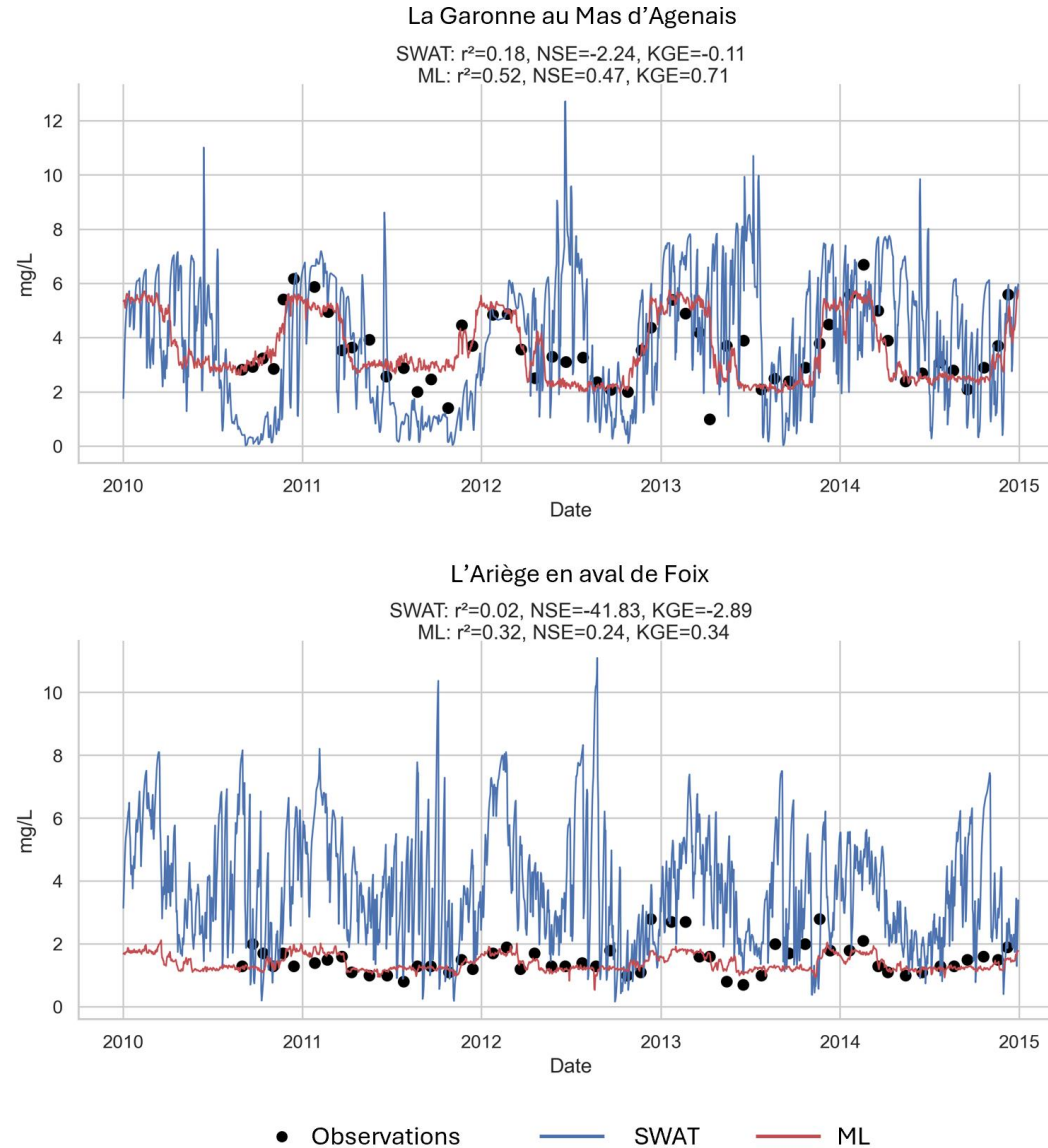
KGE=-8.51



→ Uniquement des stations sur tronçon principal incluses dans l'entraînement des RF

I - Comparaison des approches sur le BV de la Garonne

Résultats - nutriments



Nutriments

Validation temporelle :

SWAT << RF

Nitrates KGE= - 0.70 KGE=0.42

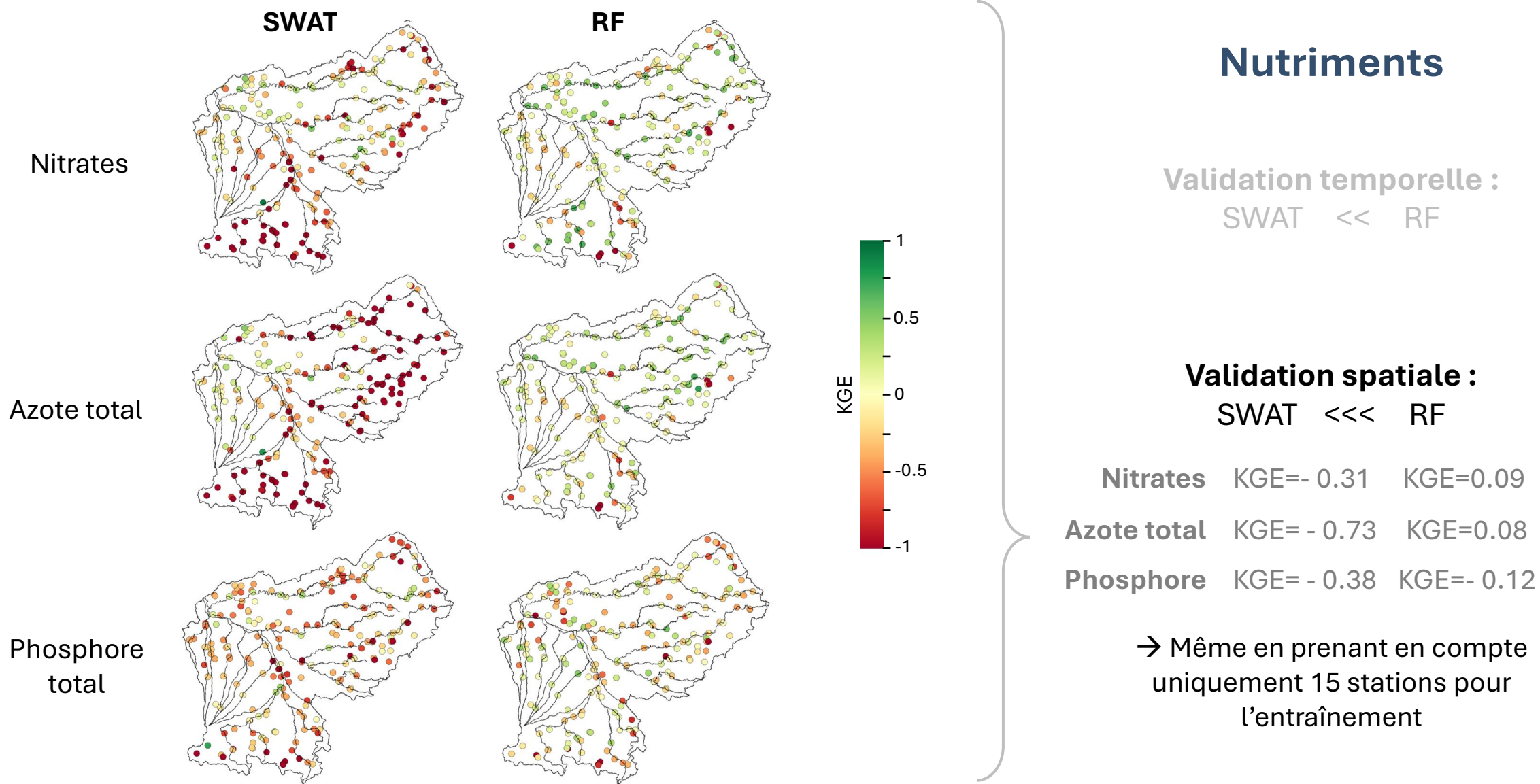
Azote total KGE= - 1.49 KGE=0.19

Phosphore KGE= - 0.16 KGE=0.23

→ Exemples pour les nitrates :
meilleure dynamique saisonnière

I - Comparaison des approches sur le BV de la Garonne

Résultats - nutriments



Résultats

Difficultés de généralisation spatiale pour les débits

Pertinence du ML pour les concentrations en nutriments

→ Meilleures performances, pas de calibration

Pistes d'amélioration:

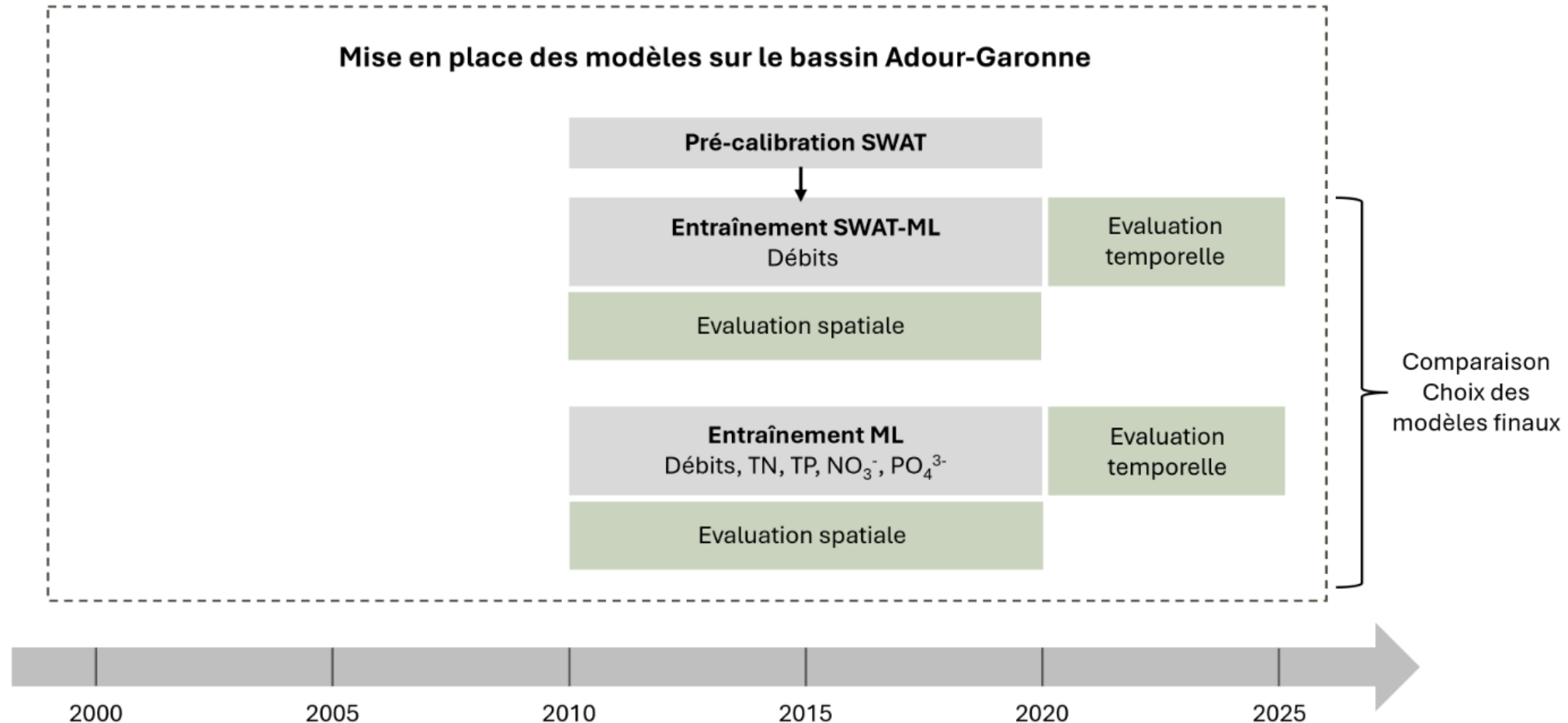
- Ajouter plus de stations d'observation
- Ajout de données hydrologiques (e.g. issues de SWAT) dans les variables descriptives pour les RF

Méthodologie



Débits :
579 stations

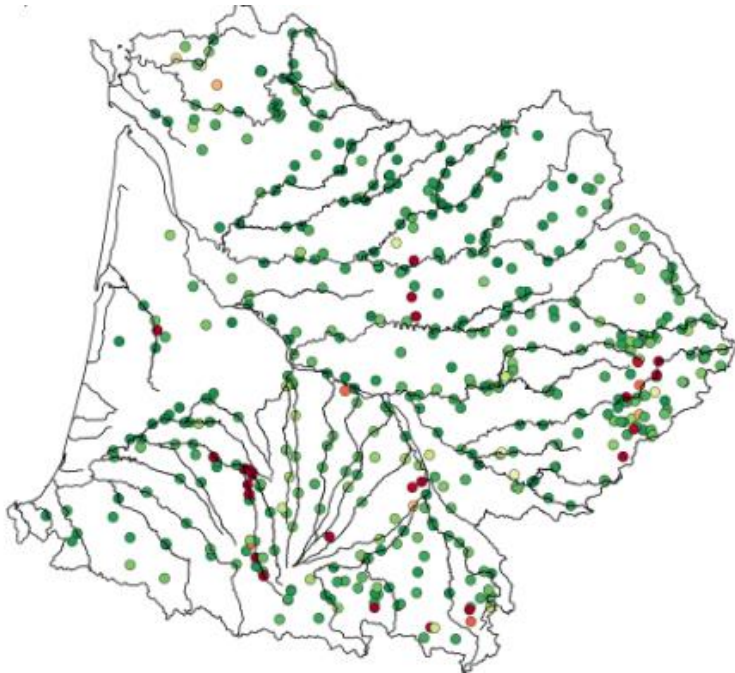
Nutriments :
~ 2300 stations



Résultats - Débits

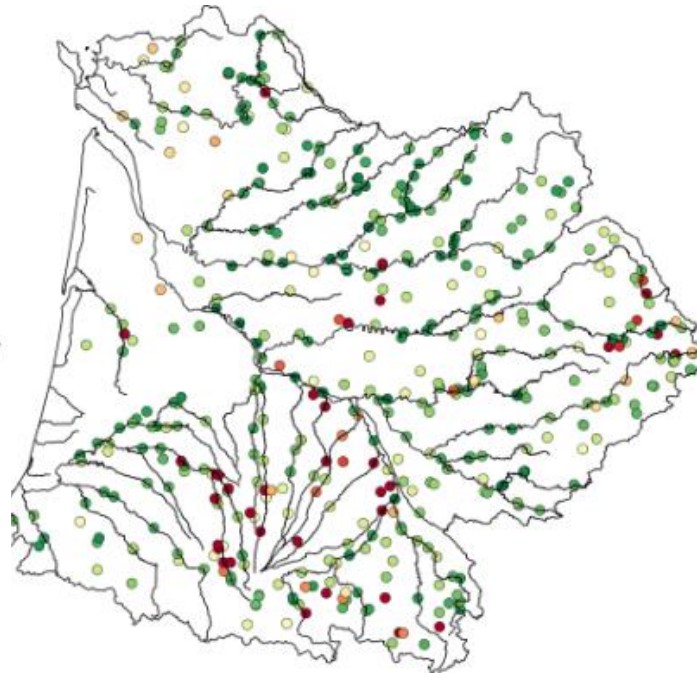
Débits

Temporel

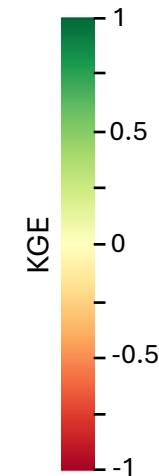


KGE=0.71

Spatial



KGE=0.49



RF+SWAT > RF > SWAT

Amélioration des résultats avec
**prise en compte de variables
hydrologiques** intermédiaire
(SAFRAN ou SWAT)

Amélioration consistante entre
hautes eaux et basses eaux

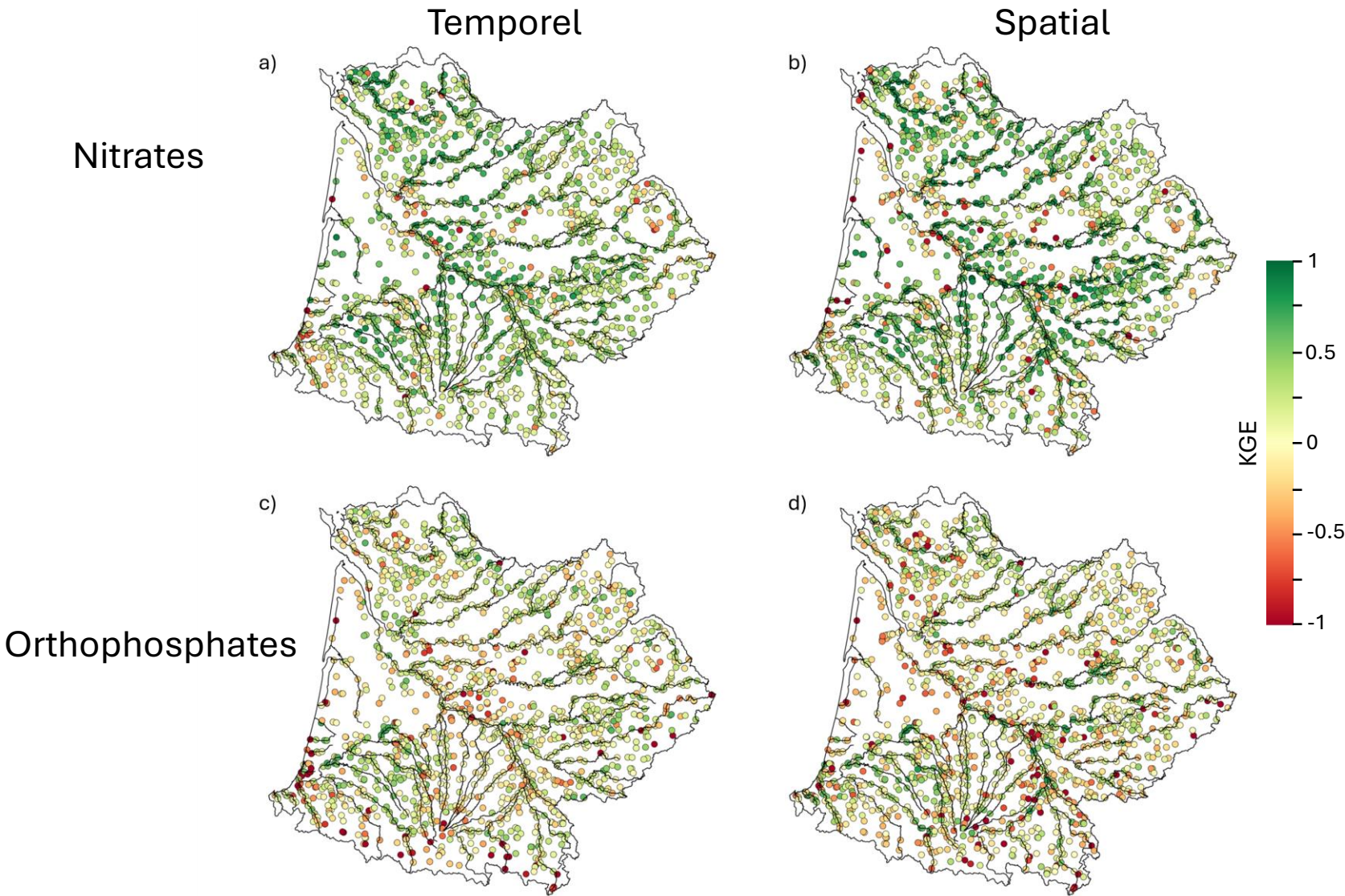
II – Déploiement en Adour-Garonne

Résultats - Nutriments

Nutriments

Formes totales :
→ Pas d'amélioration
avec ajout des débits

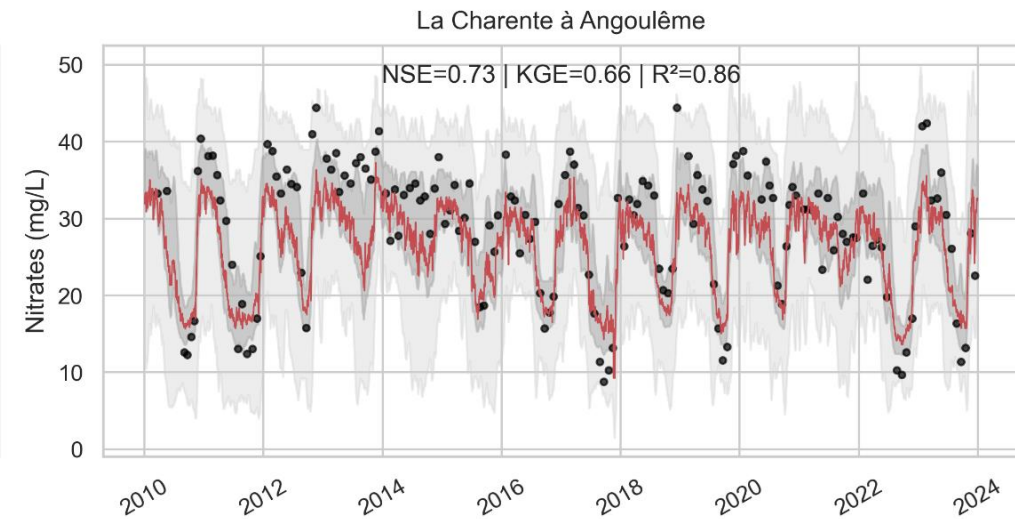
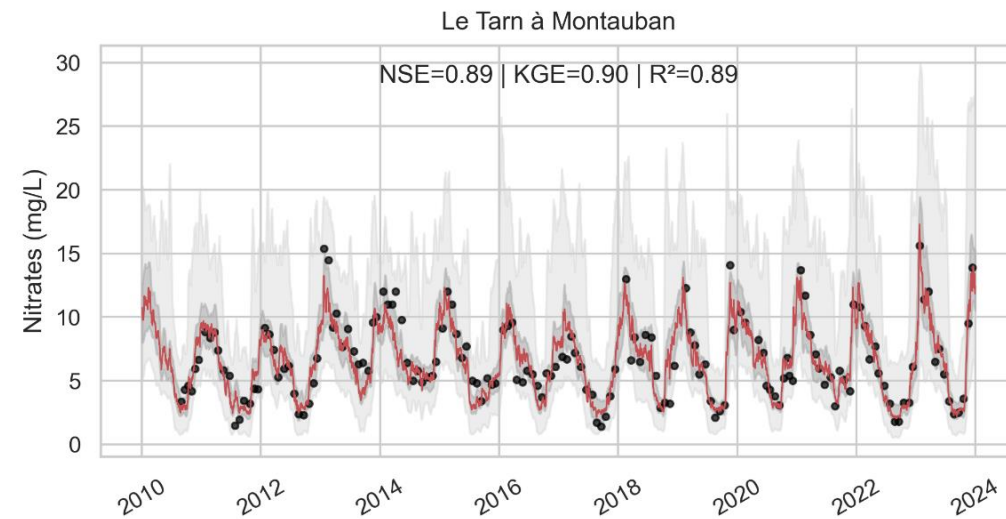
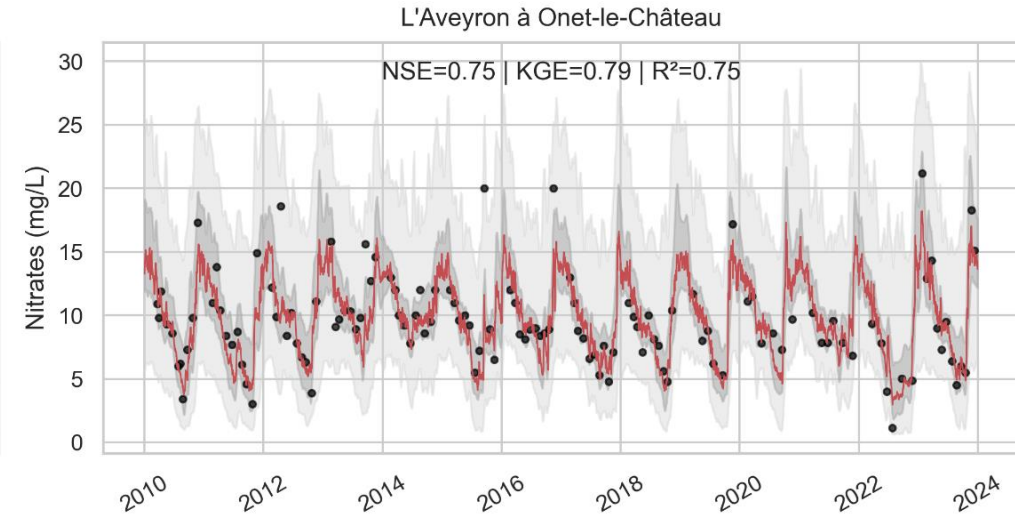
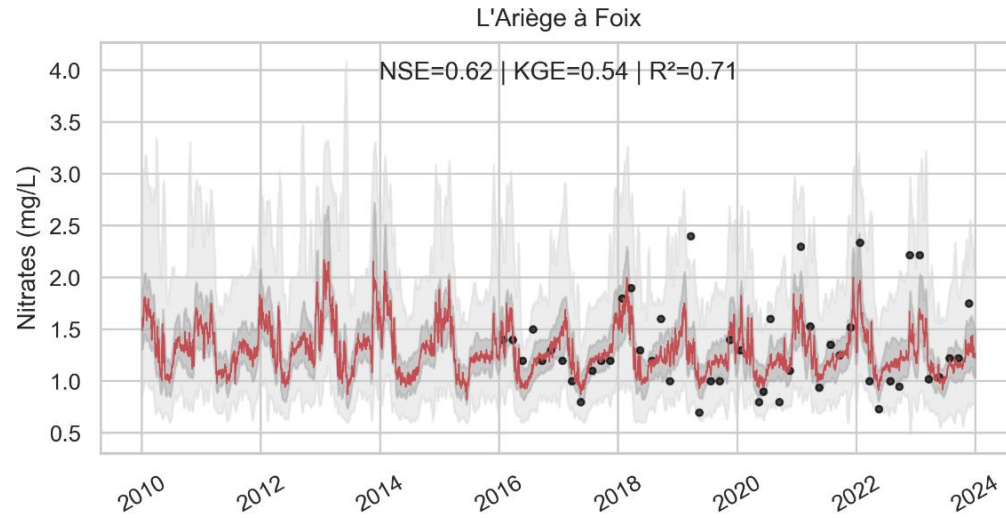
Formes dissoutes :
→ Nette amélioration



	Temporel	Spatial
Nitrates	KGE= 0.32	KGE=0.35
Azote	KGE= 0.32	KGE=0.35
Phosphates	KGE= 0.14	KGE=0.15
Phosphore	KGE= 0.13	KGE=0.14

II – Déploiement en Adour-Garonne

Résultats - Nutriments



Conclusion

Conclusion et prochaines étapes

Prochaines étapes

- Approfondir la compréhension des différences de performances entre SWAT et ML, notamment lors des événements extrêmes
- Améliorer la prise en compte de la redondance spatiale lors de l'entraînement
 - Association à des modèles lacs pour évaluer le risque d'eutrophisation

Merci pour votre attention !

Contact: mathilde.joffre@hetwa.fr

