

Comparaison d'un modèle hydrologique de Deep Learning avec l'ensemble de projections Explore2

Olivier Robelin, Paul Royer-Gaspard, Mathilde Puche et Magali Troin

Vendredi 6 mars – Congrès Eau et intelligence artificielle, Grenoble
Session 7 : Prévision et projections hydrologiques et services associés



Chez Hydroclimat, la recherche et l'innovation sont au cœur de notre mission. Nous combinons science du climat, hydrologie, hydraulique et intelligence artificielle pour produire des analyses robustes des risques climatiques physiques et de l'adaptation. Nous portons une démarche fondée sur la transparence et l'intégrité scientifique. Notre R&D s'ancre dans la communauté scientifique internationale, aux côtés de partenaires tels que le CNRS et l'Université Côte d'Azur. Cela renforce le lien entre science, innovation et action publique.

APPROCHE
SCIENTIFIQUE

FIABILITÉ

PRECISION

CHALLENGE

RESPONSABILITÉ
ENVIRONNEMENTALE

2025 : Hydrologie

Value of various elements of the hydrological forecasting chain: Is there a successful pathway for improving the overall performance?

by Davidson-Chaput, J., Arsenault, R., Martel, J-L, Troin, M.

En savoir plus

2025 : Correction de biais

Seasonal Bias Correction of Daily Precipitation over France Using a Stitch Model Designed for Robust Representation of Extremes

by Philippe Ear, Elena Di Bernardino Thomas Laloë, Adrien Lambert and Magali Troin

En savoir plus

2025 : Correction de biais

A semi-parametric distribution stitch based on the Berk-Jones test for French daily precipitation bias correction

by Philippe Ear, Elena Di Bernardino Thomas Laloë, Adrien Lambert and Magali Troin

En savoir plus

2025 : Eau

Optimizing Spatial Discretization According to Input Data in the Soil and Water Assessment Tool: A Case Study in a Coastal Mediterranean Watershed

by Mathilde Puche, Magali Troin, Dennis Fox and Paul Royer-Gaspard.

En savoir plus

Introduction



Les travaux soulignent un potentiel du modèle LSTM dans le cadre de bassins versants non jaugés.



« La généralisation spatiale et temporelle des modèles LSTM est explorée sur 310 bassins français. Les modèles entraînés en mode temporel (TI) généralisent efficacement dans le temps sur 89% des bassins. »



« L'ajout de bassins européens dans les données d'entraînement n'améliore pas la généralisation, mais ne la dégrade pas non plus, suggérant un bon potentiel de transférabilité à l'échelle continentale. »



« Les LSTM maintiennent une précision stable et produisent des hydrogrammes plus réalistes, traduisant une meilleure robustesse face à la non-stationnarité. »

THÈSE DE DOCTORAT

Vers une modélisation hydrologique flexible et opérationnelle pour la simulation des débits : optimisation et comparaison des approches à base physique et de Deep Learning

Mathilde PUCHE

Laboratoire ESPACE – Étude des Structures, des Processus
d'Adaptation et des Changements de l'Espace

Introduction



Les travaux soulignent un potentiel du modèle LSTM dans le cadre de bassins versants non jaugés.



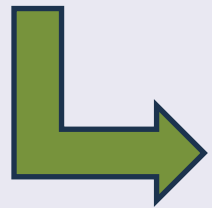
« La généralisation spatiale et temporelle des modèles LSTM est explorée sur 310 bassins français. Les modèles entraînés en mode temporel (TI) généralisent efficacement dans le temps sur 89% des bassins. »



« L'ajout de bassins européens dans les données d'entraînement n'améliore pas la généralisation, mais ne la dégrade pas non plus, suggérant un bon potentiel de transférabilité à l'échelle continentale. »



« Les LSTM maintiennent une précision stable et produisent des hydrogrammes plus réalistes, traduisant une meilleure robustesse face à la non-stationnarité. »



**Cette hypothèse de robustesse est fondée sur des analyses de type années sèches/humides. Le modèle n'a pas été testé en conditions de changement climatique
→ c'est l'objet de la présente étude**

THÈSE DE DOCTORAT

Vers une modélisation hydrologique flexible et opérationnelle pour la simulation des débits : optimisation et comparaison des approches à base physique et de Deep Learning

Mathilde PUCHE

Laboratoire ESPACE – Étude des Structures, des Processus
d'Adaptation et des Changements de l'Espace

Schéma général du LSTM

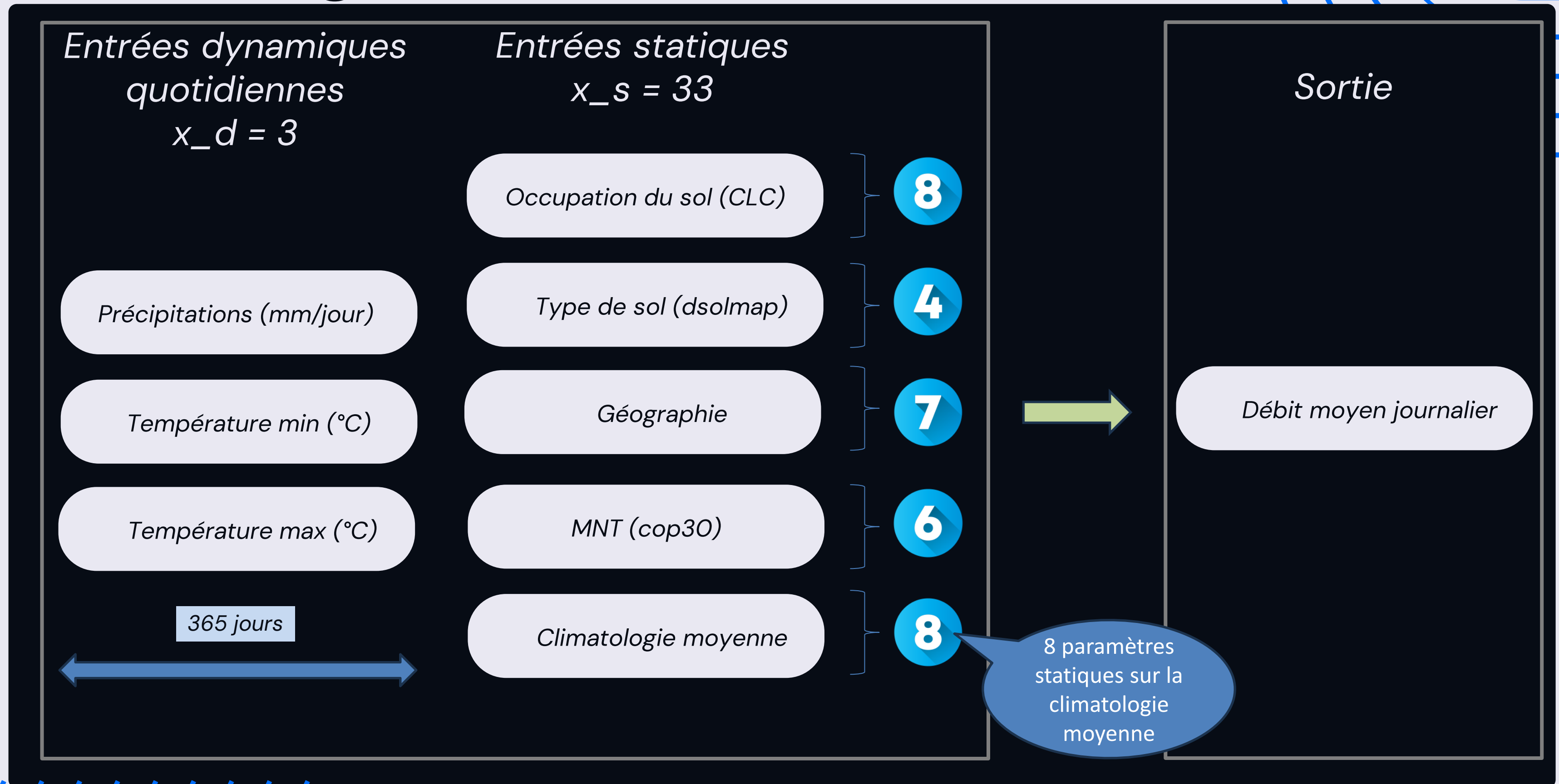


Schéma général du LSTM – Entraînement

1

A l'issue de cette étape,
toutes les données
d'entraînement sont
utilisées une seule fois.

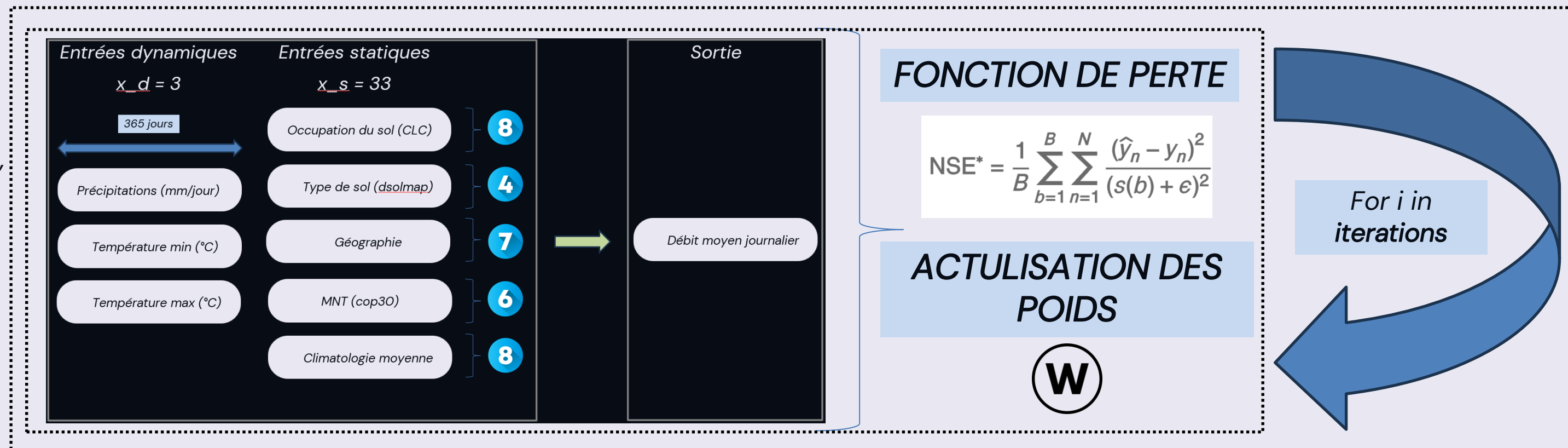
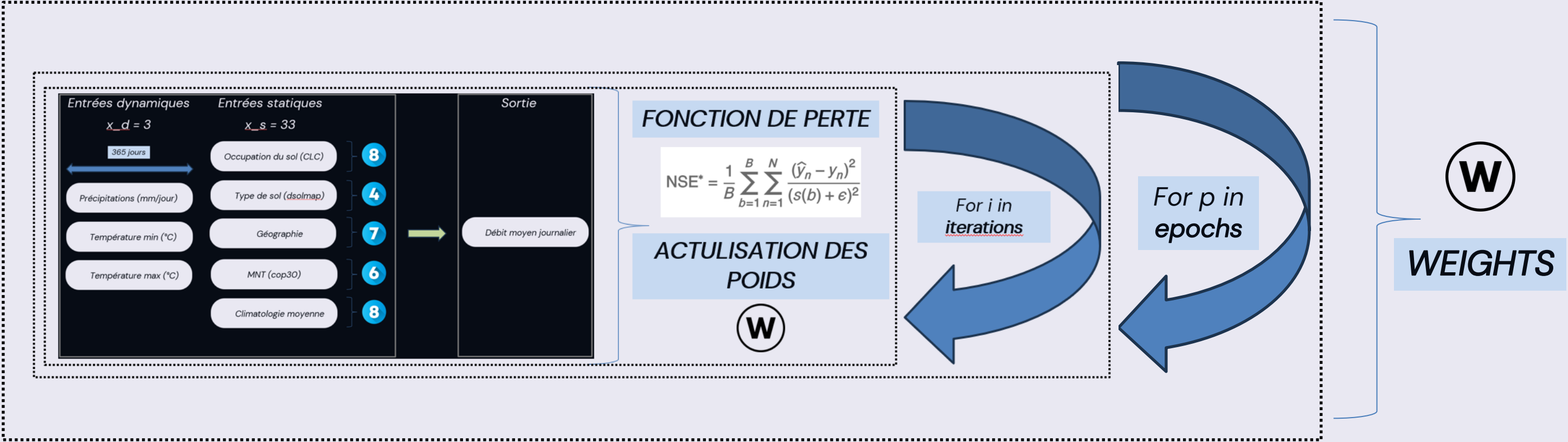


Schéma général du LSTM – Entraînement

2

A l'issue de cette étape, toutes les données d'entraînement ont été utilisées p fois.

Les poids finaux W sont ceux utilisés pour faire les prédictions.



Hyperparamètres

Les hyperparamètres utilisés sont dérivés de **Puche. M., 2025** et ont fait l'objet d'une validation croisée sur **310 bassins versants français entre 1987 et 2012**.

Batch_size	Epochs	hidden_size	output_dropout
256	15	128	0,25

Le projet Explore2

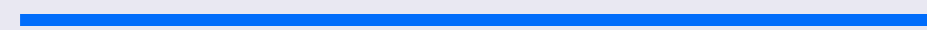


« Anticiper les évolutions climatiques et hydrologiques »

Le projet Explore2 restitué en 2024 a visé à actualiser les connaissances des impacts du changement climatique sur la ressource en eau → Quel lien entre les évolutions du changement climatique et celles de l'hydrologie ?

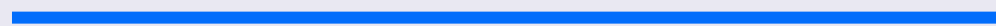
Définition d'un réseau d'évaluation

- 1 Traitement des bases de données nationales pour identifier **611 stations** "peu influencées"



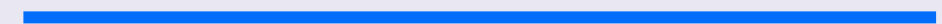
Coordination de la modélisation

- 2 9 modèles hydrologiques diagnostiqués et utilisés pour fournir les projections futures



Projections climatiques

- 3 Sélection d'un ensemble climatique de 17 modèles GCM-RCM servant de nouveau référentiel national



Le projet Explore2



« Anticiper les évolutions climatiques et hydrologiques »

Le projet Explore2 restitué en 2024 a visé à actualiser les connaissances des impacts du changement climatique sur la ressource en eau → Quel lien entre les évolutions du changement climatique et celles de l'hydrologie ?

Définition d'un réseau d'évaluation

- 1 Traitement des bases de données nationales pour identifier **611 stations** "peu influencées"
 - Utilisation du réseau d'évaluation comme jeu de données d'entraînement du LSTM



Projections climatiques

- 3 Sélection d'un ensemble climatique de 17 modèles GCM-RCM servant de nouveau référentiel national
 - Modèles utilisés comme forçage climatique du LSTM pour projections hydrologiques

Coordination de la modélisation

- 2 9 modèles hydrologiques diagnostiqués et utilisés pour fournir les projections futures
 - Insertion du LSTM dans l'ensemble de modèles hydrologiques

1 Quelles performances globales du modèle LSTM ?

2 Le LSTM dans l'ensemble Explore2

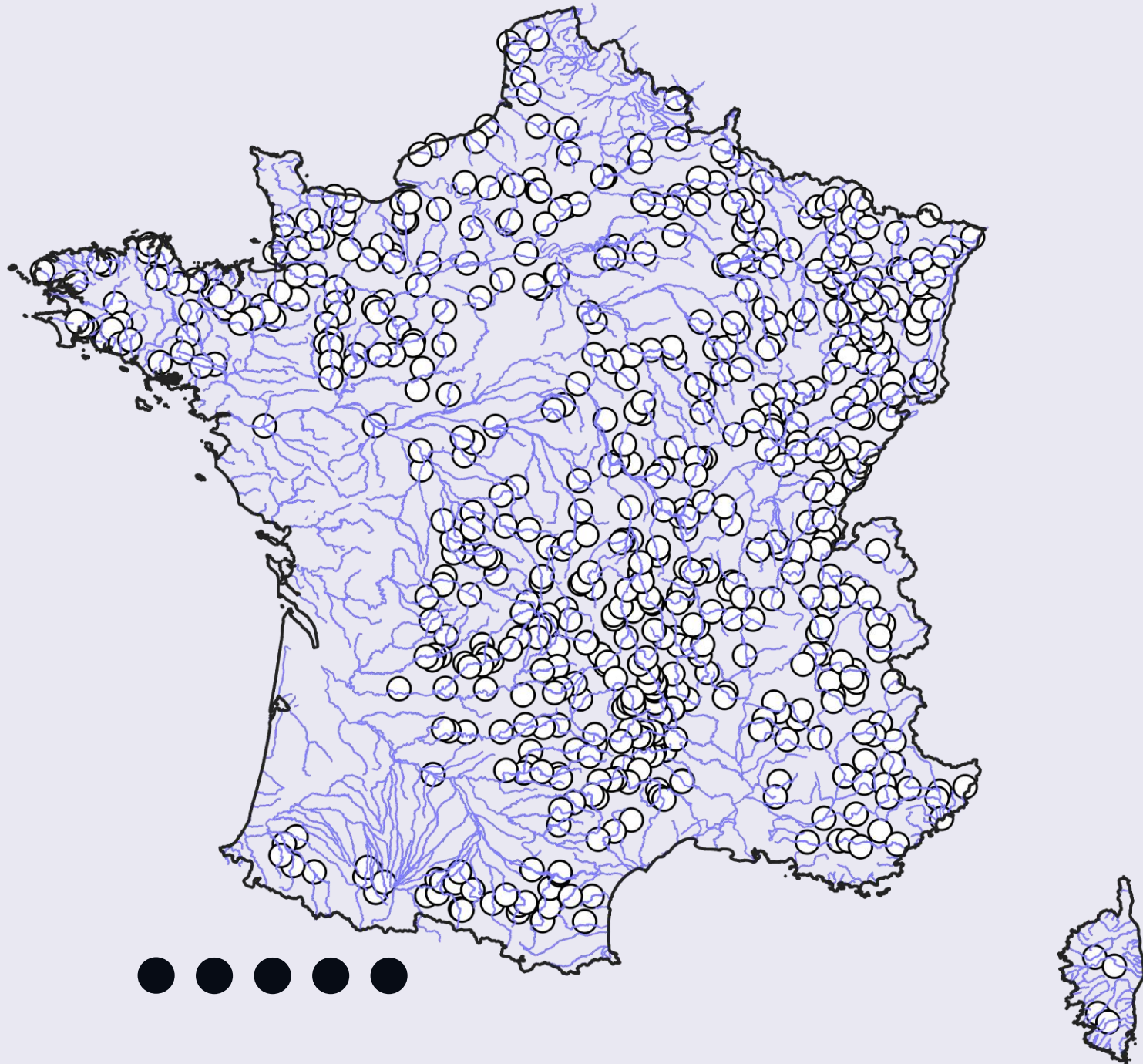
3 Quelle réponse hydrologique du LSTM en changement climatique ?



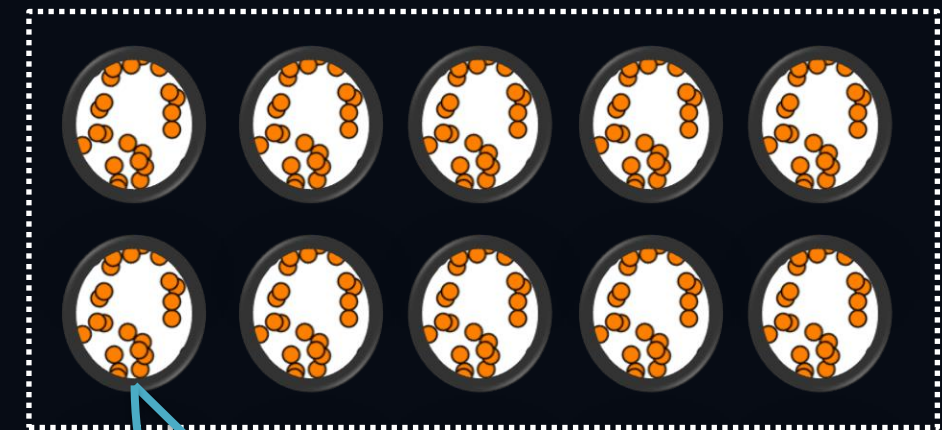
Quelles performances globales du modèle LSTM ?

604 bassins versants (BV)

< 10 % de lacunes dans les 30 dernières années



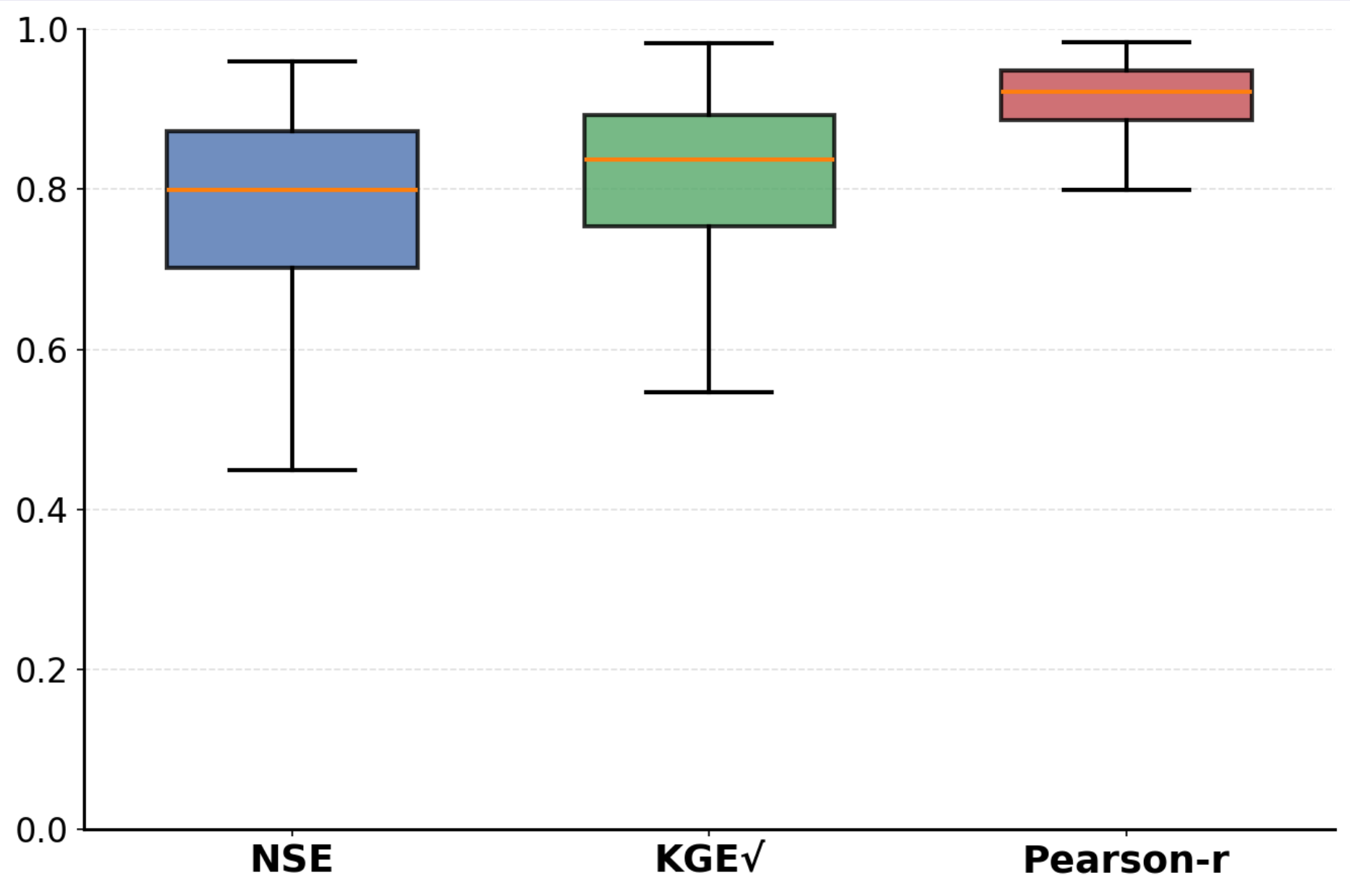
• 10 configurations



- Entraînement : 90 % des BV
- Test : 10 % des BV

- Indépendamment, chaque BV est utilisé 9 fois en entraînement et 1 fois en test.
- Métriques de performance calculées sur le test : le BV n'a pas été utilisé lors de l'entraînement

Quelles performances globales du modèle LSTM ?



Très bonnes performances globales du modèle.

	LSTM	SMASH	GRSD	ORCHIDEE	SIM2	J2000	CTRIP
KGEv	0,84	0,82	0,84	0,65	0,72	0,78	0,63



Il se situe dans la fourchette haute des modèles en régionalisation.



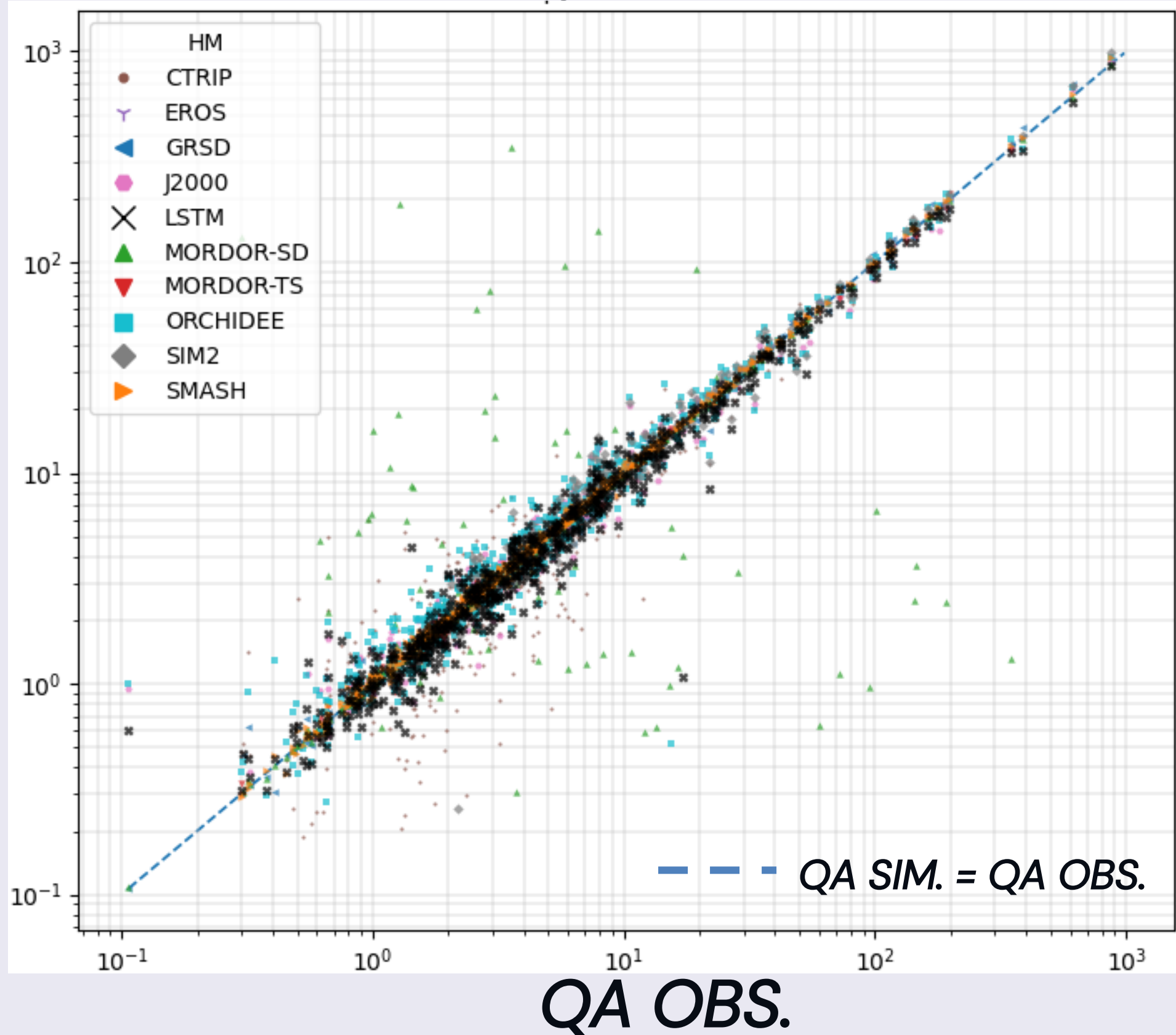
Le LSTM dans l'ensemble Explore2

•••••

Débit moyens interannuels sur la période 1975–2020

611 stations diagnostiques – SAFRAN

QA SIM.



Les débits moyens interannuels simulés sont proches des observations. Le LSTM s'intègre dans l'ensemble multi-modèles.

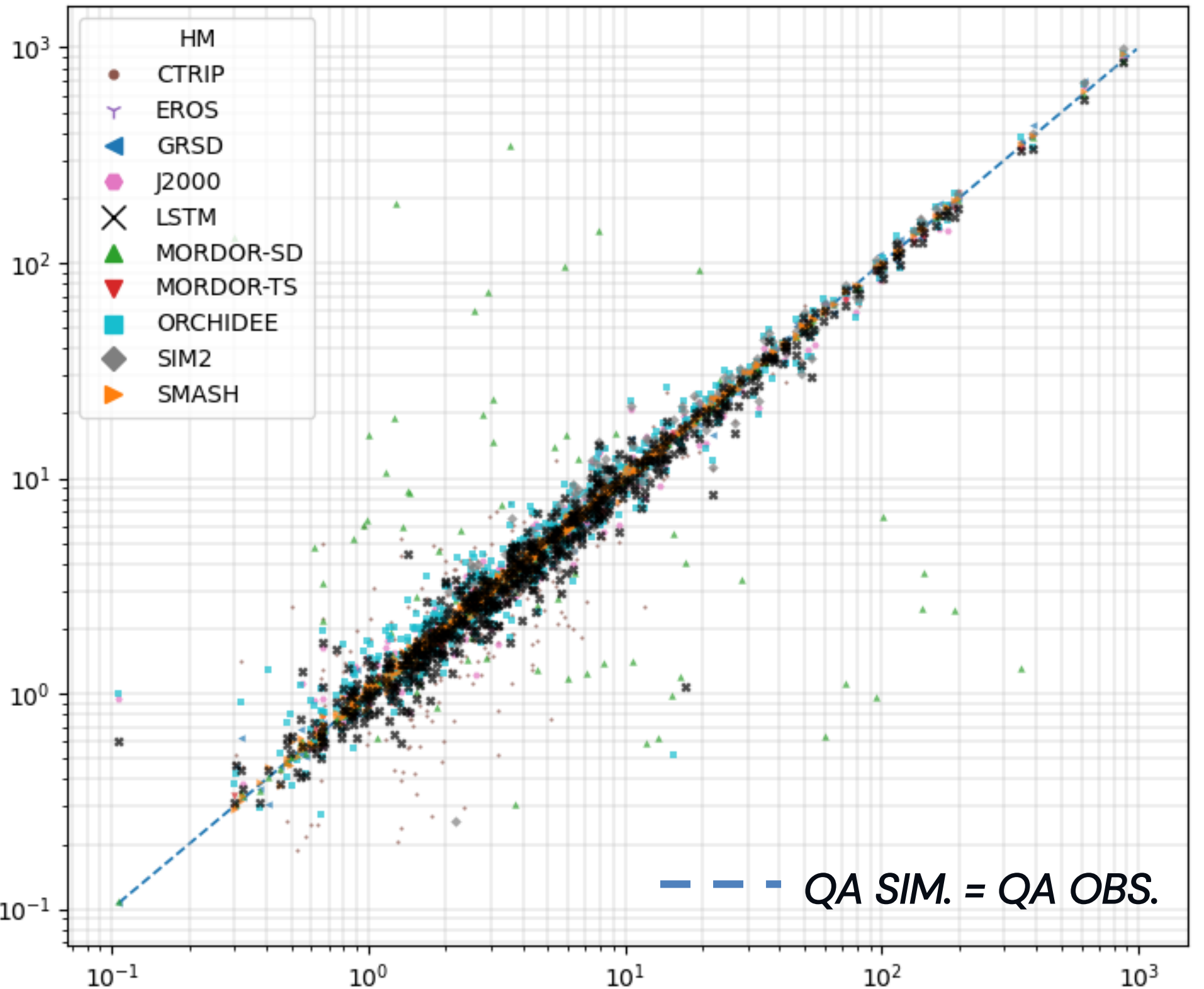
Le LSTM dans l'ensemble Explore2

•••••

Débit moyens interannuels sur la période 1975–2020

611 stations diagnostiques – SAFRAN

QA SIM.



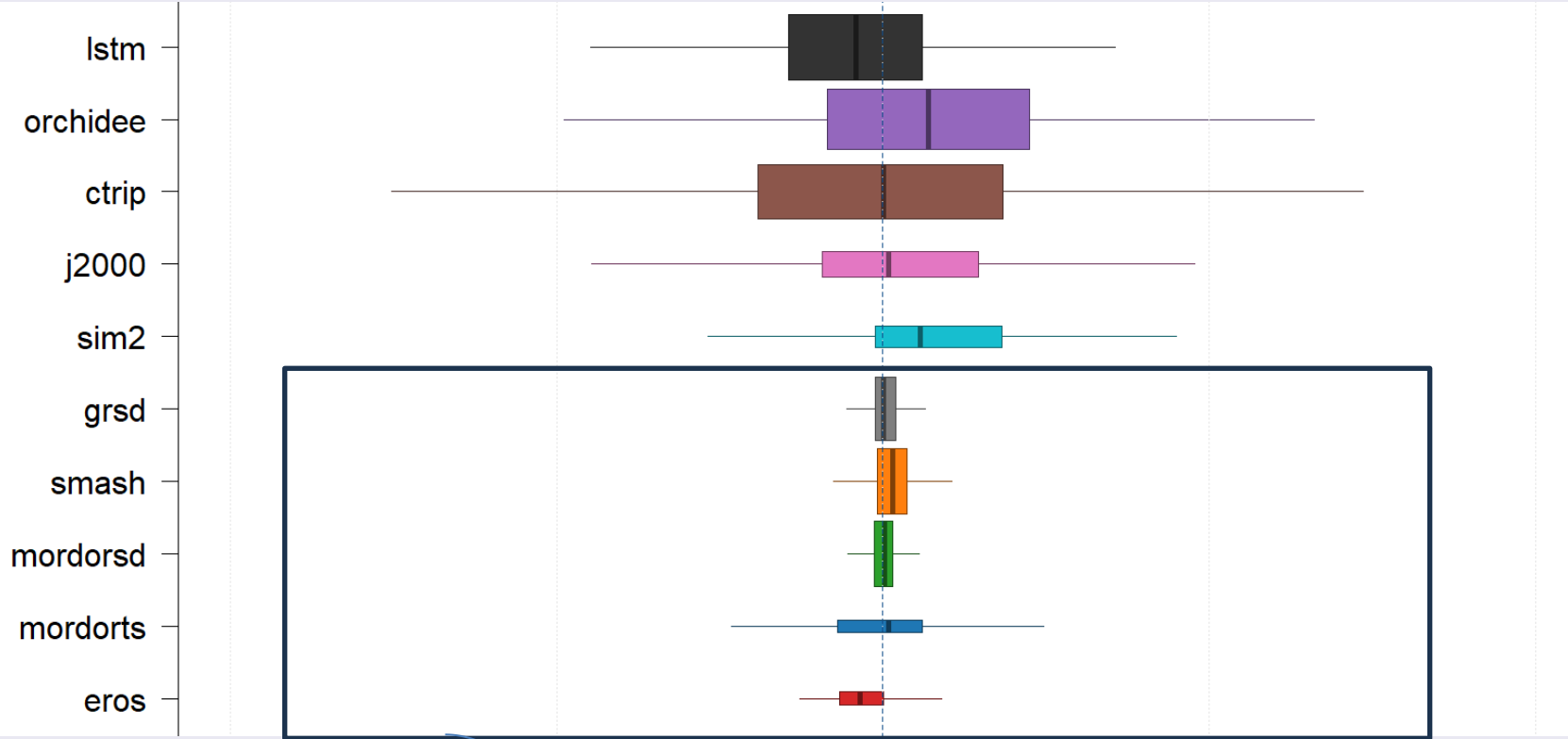
QA OBS.

— QA SIM. = QA OBS.



Les débits moyens interannuels simulés sont proches des observations. Le LSTM s'intègre dans l'ensemble multi-modèles.

QA – Biais relatif [%]

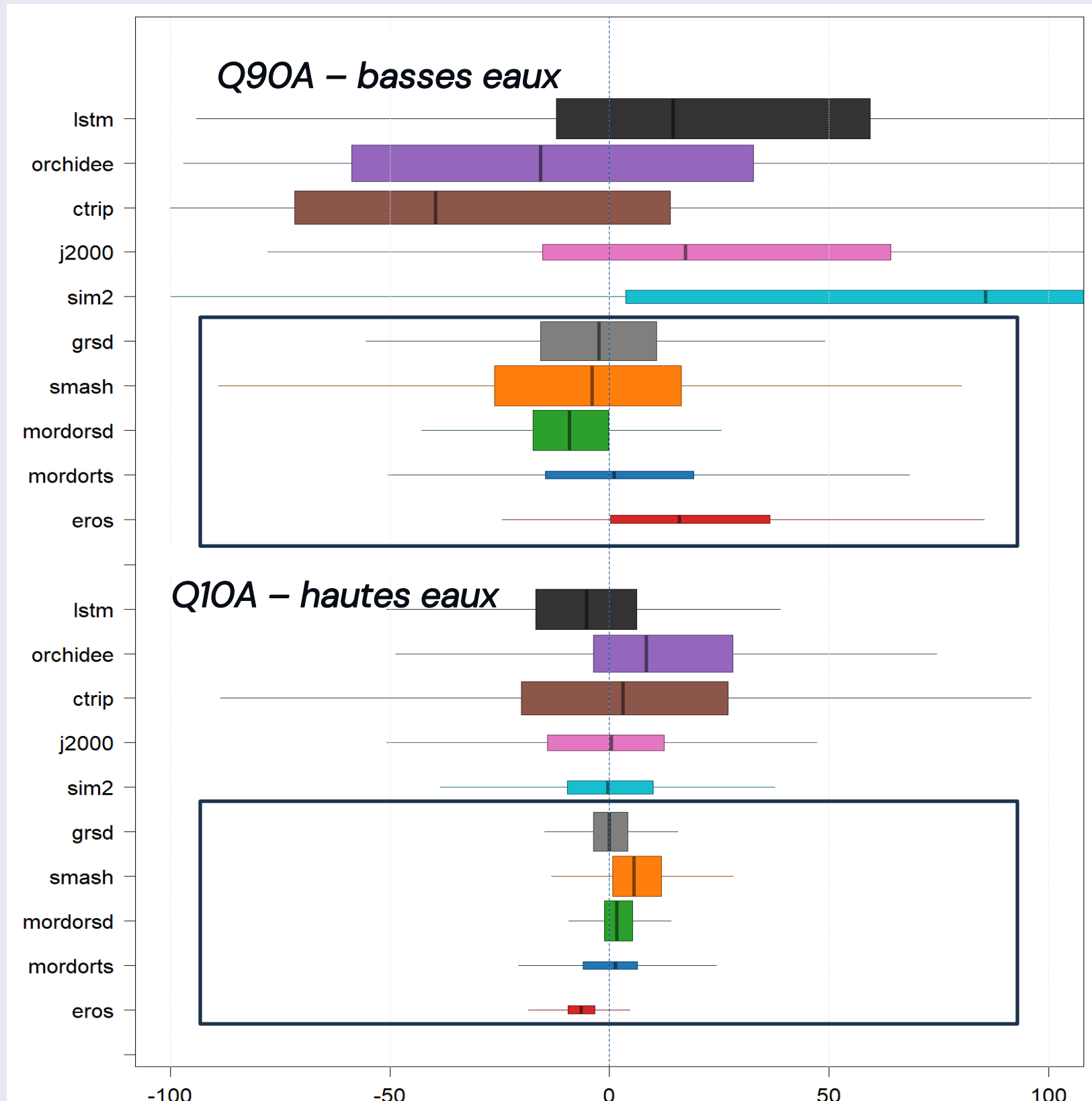


Modèles en contexte jaugé

Le LSTM dans l'ensemble Explore2



Biais relatif [%]



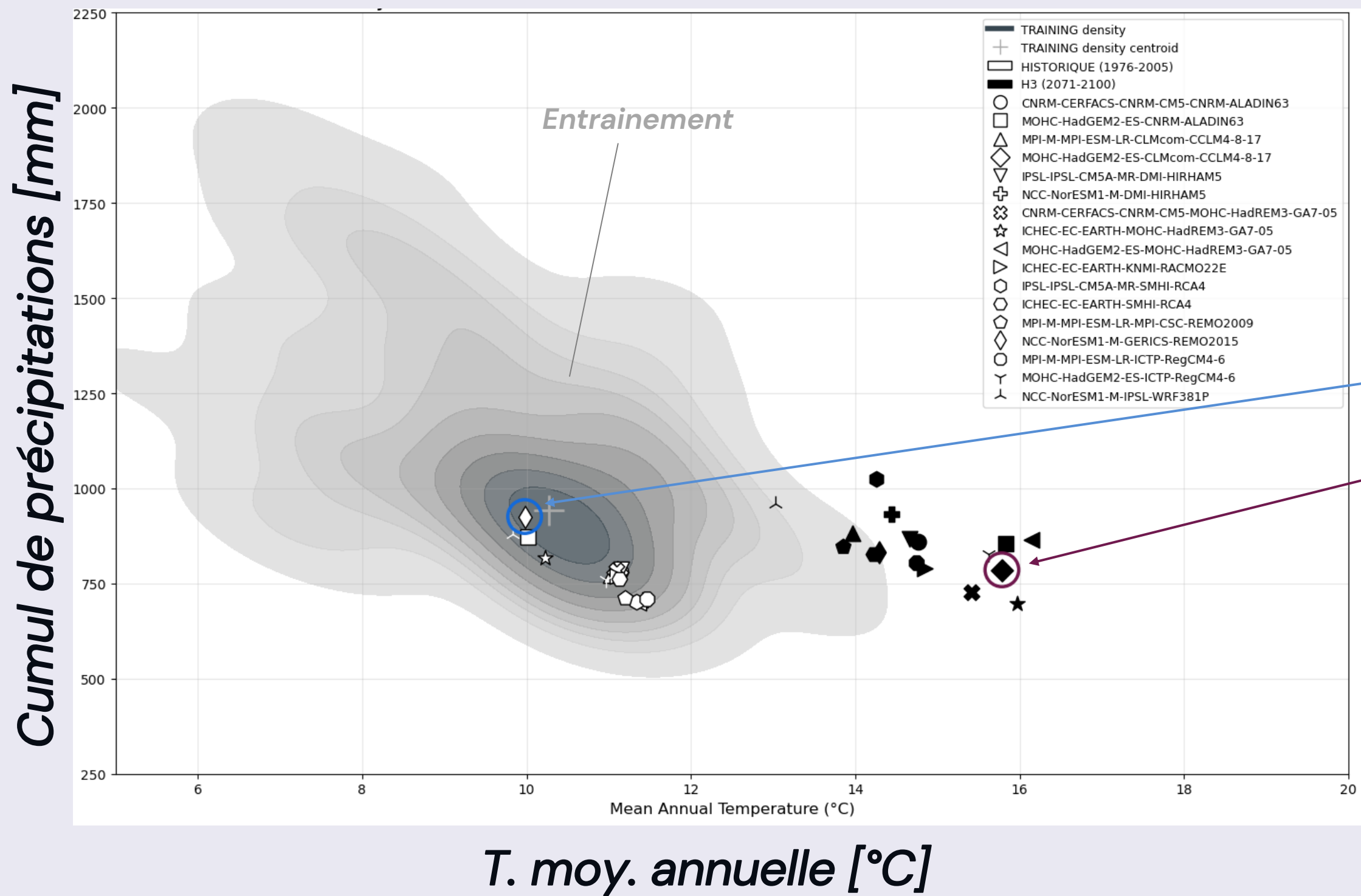
Pour les basses eaux, le LSTM a une tendance à la surestimation des débits.

Ses performances sont dégradées.

Pour les hautes eaux, les débits sont légèrement sous-estimés.

Ses performances restent bonnes en comparaison de l'ensemble.

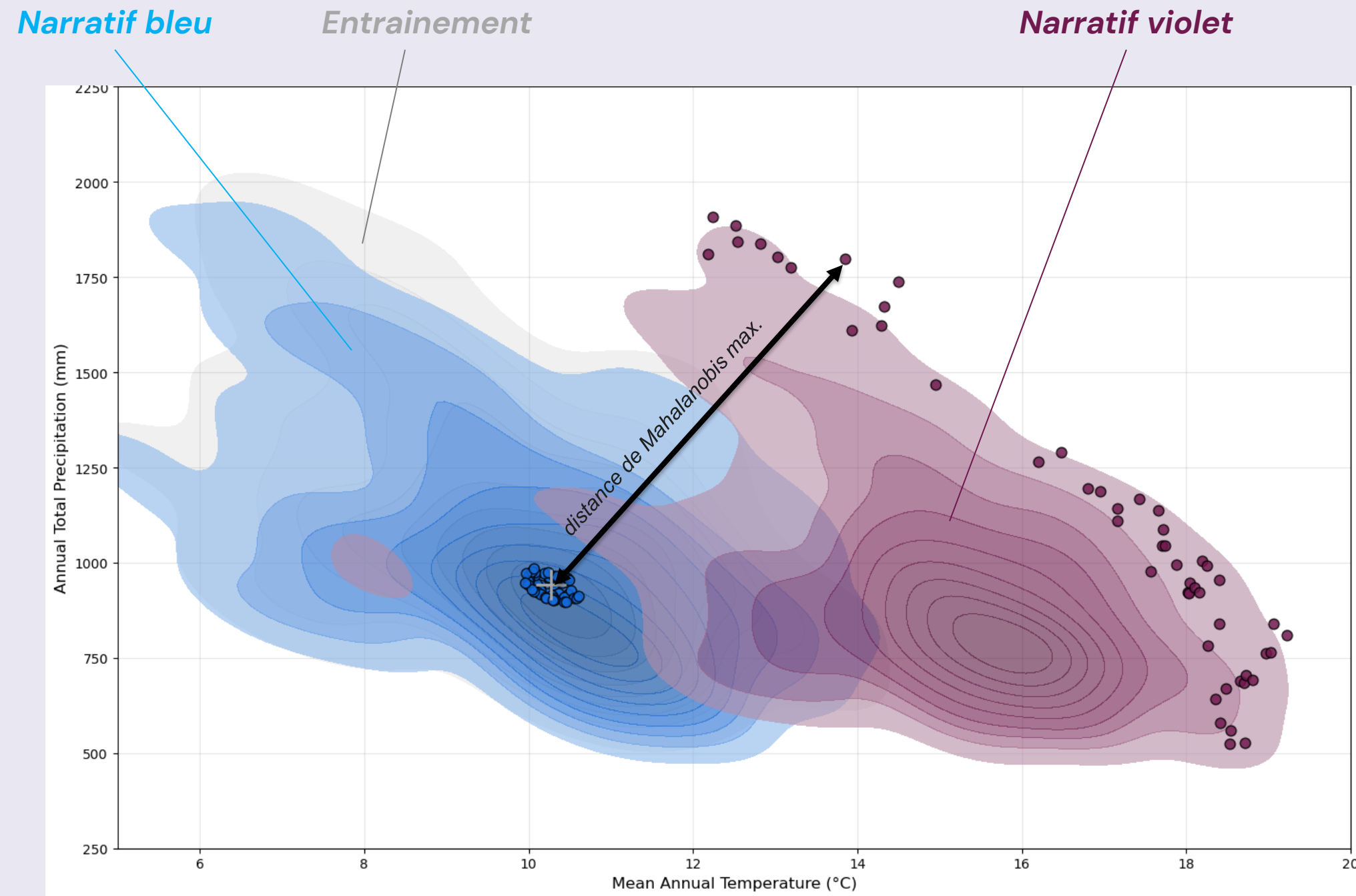
Le LSTM dans l'ensemble Explore2



- 1** Les conditions climatiques moyennes les plus fréquentes lors de l'entraînement sont évaluées par rapport aux conditions climatiques moyennes des modèles sur 30 ans pour deux horizons distincts :
- 1976-2005 (historique)
 - 2071-2100 (H3)
- 2** Pour chaque horizon, un narratif est défini :
- **Narratif bleu** → conditions climatiques les plus proches de l'entraînement
 - **Narratif violet** → fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations



Le LSTM dans l'ensemble Explore2



- 1** Les conditions climatiques moyennes les plus fréquentes lors de l'entraînement sont évaluées par rapport aux conditions climatiques moyennes des modèles sur 30 ans pour deux horizons distincts :
 - 1976–2005 (historique)
 - 2071–2100 (H3)
- 2** Pour chaque horizon, un narratif est défini :
 - **Narratif bleu** → conditions climatiques les plus proches de l'entraînement
 - **Narratif violet** → fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations
- 3** → Clustering avec calcul de la distance de Mahalanobis :
 - **Narratif bleu** → les 50 stations au climat le plus proche du climat moyen en entraînement
 - **Narratif violet** → les 50 stations au climat futur le plus éloigné du climat moyen en entraînement

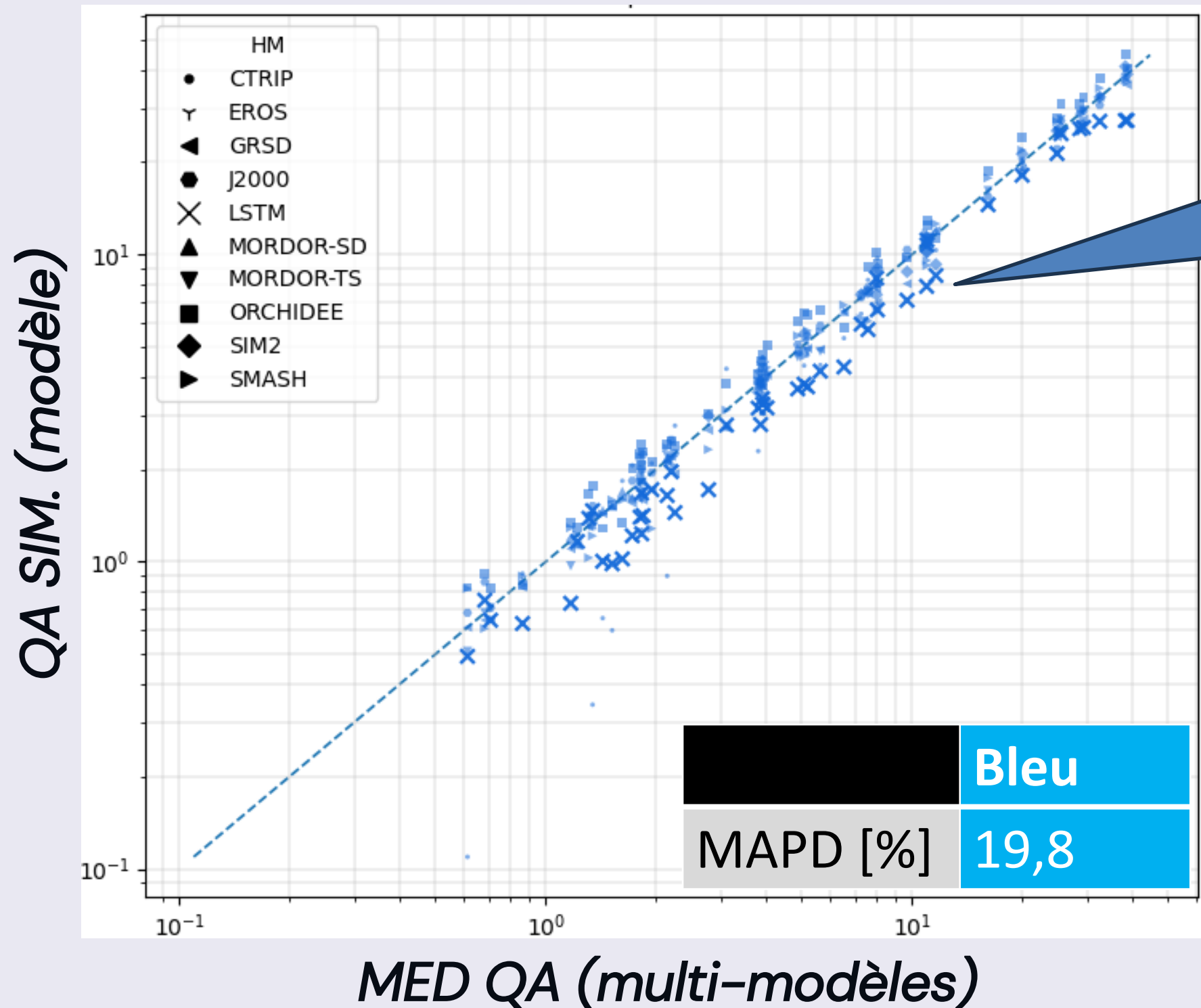


Le LSTM dans l'ensemble Explore2

●●●●●

Débit moyens interannuels sur la période 1976–2005

50 stations sélectionnées – narratif bleu



Afin d'évaluer l'apport du LSTM dans l'ensemble Explore2, il est ajouté ici en fonction de la médiane multi-modèles (exclusion du LSTM dans la médiane).

Les débits simulés par le LSTM sont inférieurs à ceux des autres modèles. Ce caractère conservatif est documenté*.

➔ L'apport du LSTM dans l'ensemble aurait un effet réducteur de la médiane multi-modèle.

●●●●●

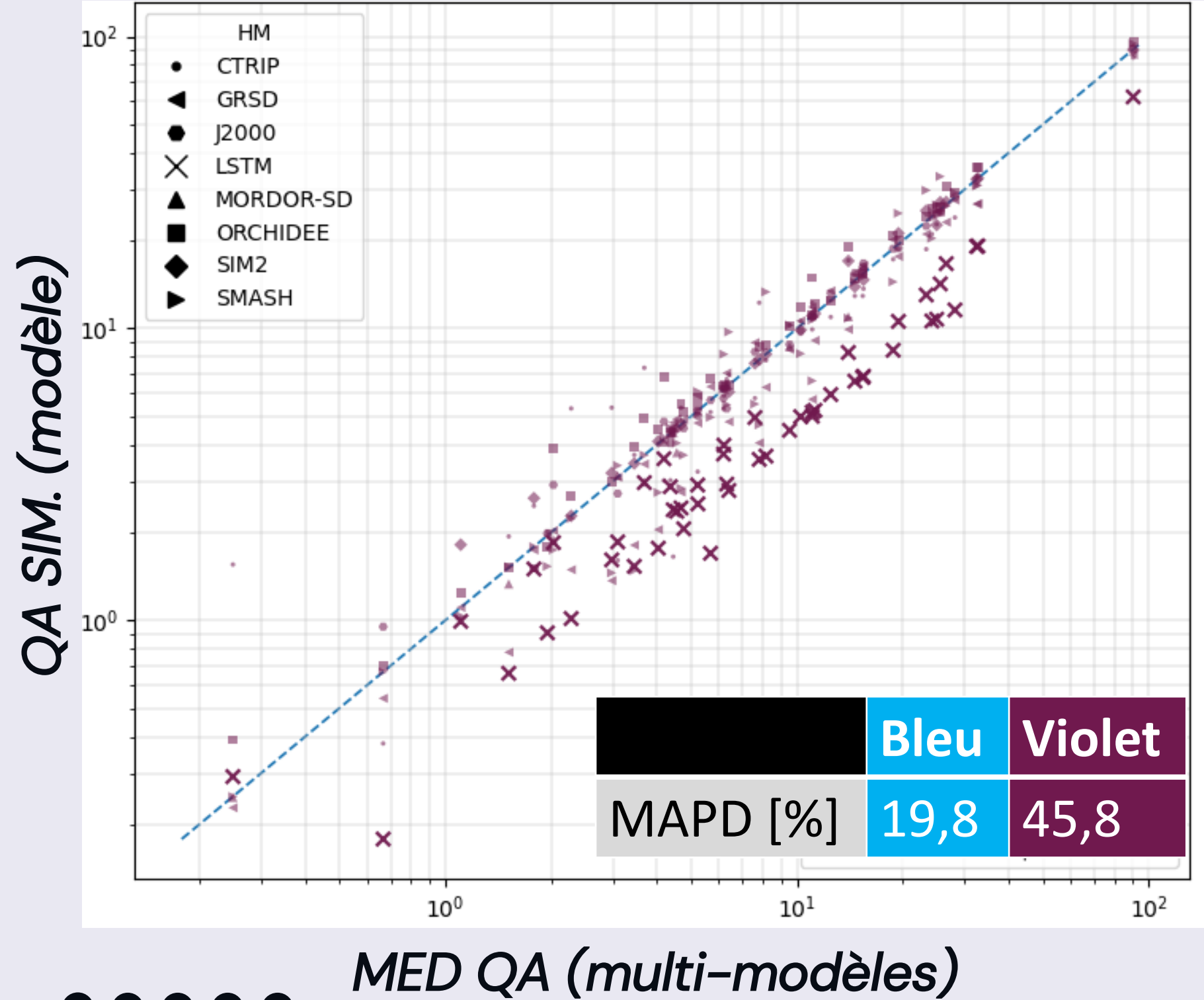
*Martel, Jean-Luc, François Brissette, Richard Arsenault, et al. « Assessing the Adequacy of Traditional Hydrological Models for Climate Change Impact Studies: A Case for Long Short-Term Memory (LSTM) Neural Networks ». *Hydrology and Earth System Sciences* 29, n° 13 (2025): 2811-36. <https://doi.org/10.5194/hess-29-2811-2025>.

Le LSTM dans l'ensemble Explore2



Débit moyens interannuels sur la période 2071-2100

50 stations sélectionnées – narratif violet



Qu'en est-il de l'extrapolation ?

- L'effet réducteur du LSTM est nette pour les stations sélectionnées.
- Le caractère conservateur du LSTM demeure prépondérant.

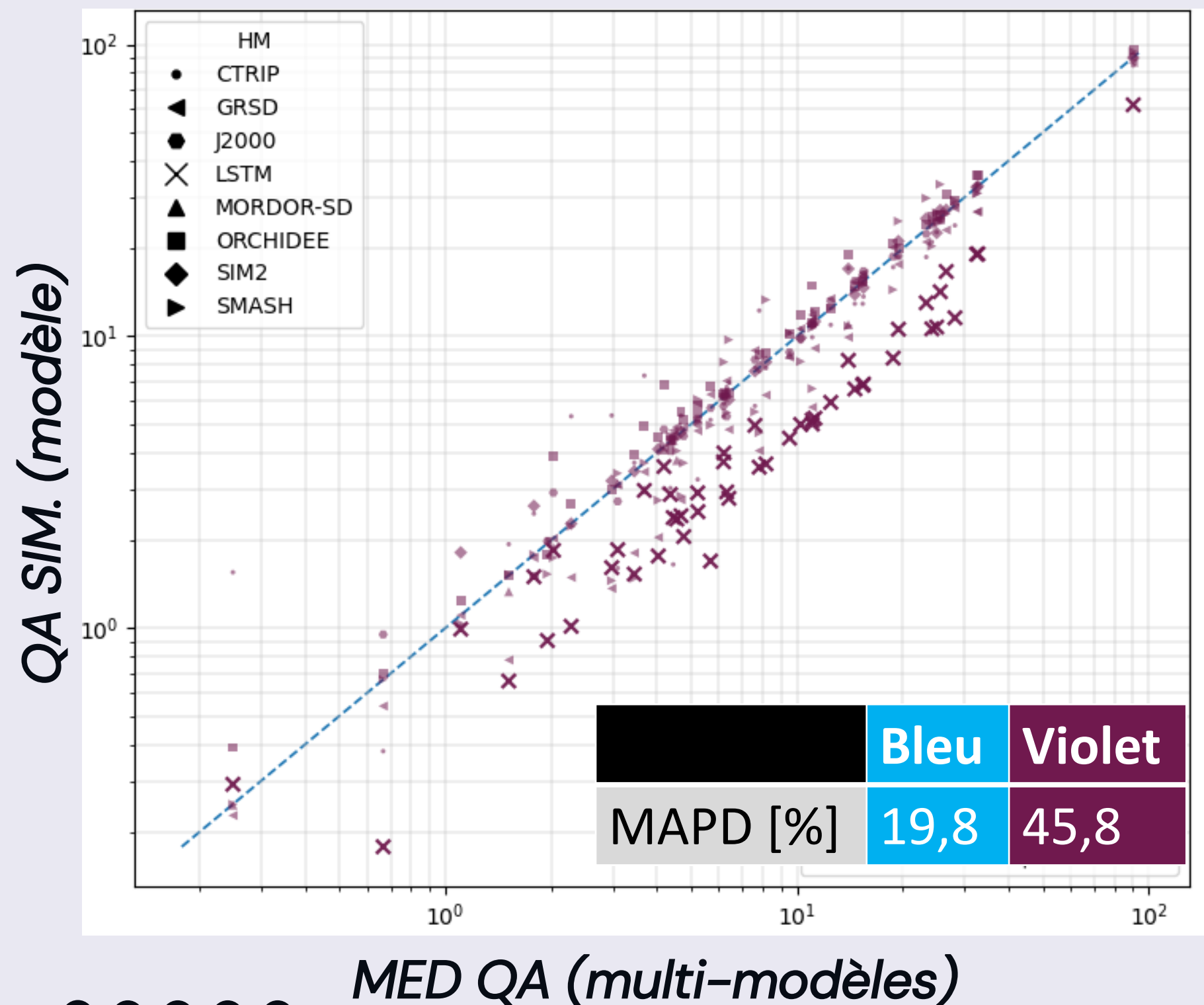


Le LSTM dans l'ensemble Explore2

•••••

Débit moyens interannuels sur la période 2071-2100

50 stations sélectionnées – narratif violet



Qu'en est-il de l'extrapolation ?

- L'effet réducteur du LSTM est nette pour les stations sélectionnées.
- Le caractère conservateur du LSTM demeure prépondérant.

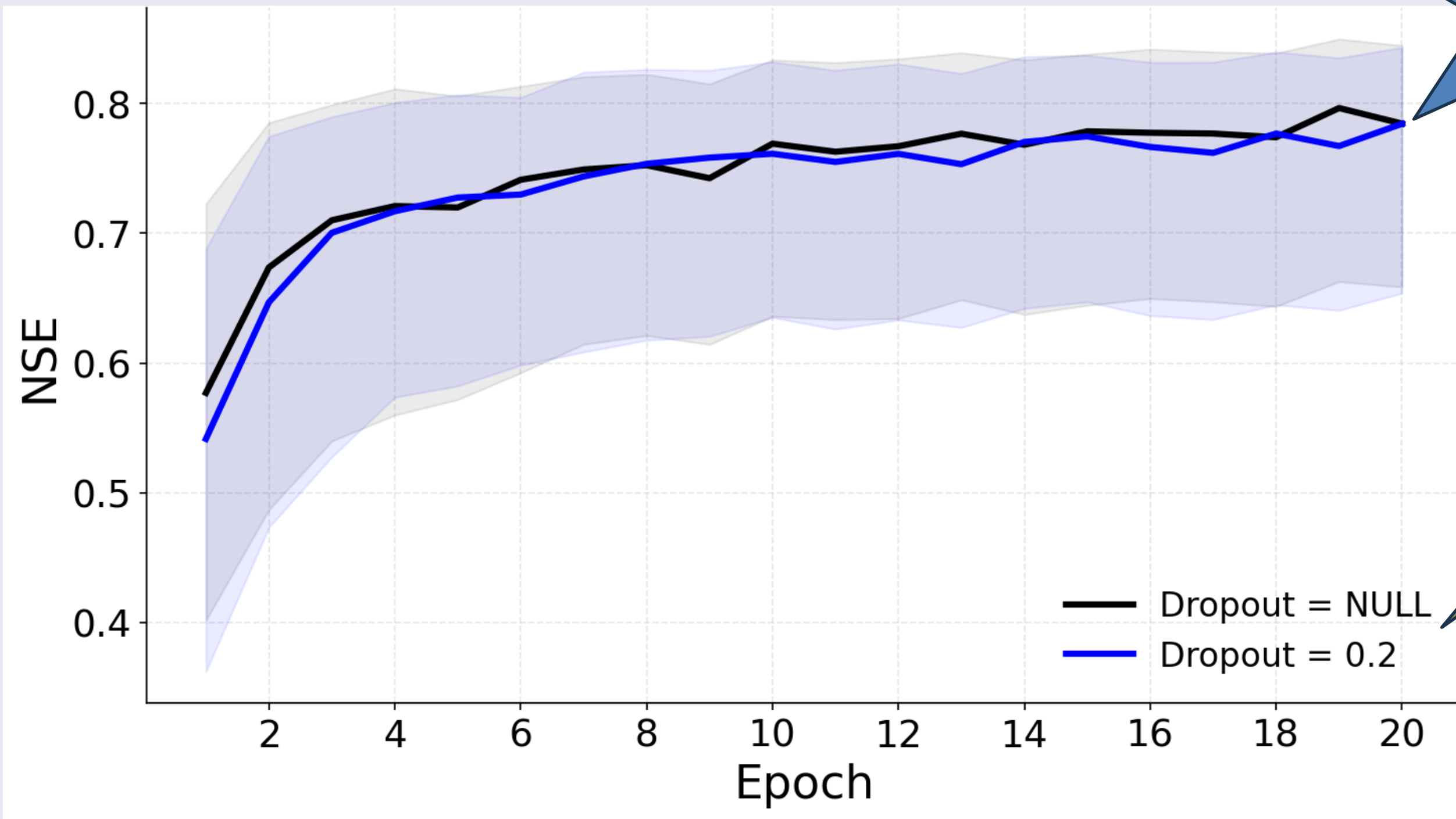


Ce comportement est-il intrinsèquement lié au modèle LSTM ?

•••••

Limites du modèle

Évolution des performances du modèle en validation



Les performances du modèle en validation, ne décroissent pas au cours des epochs (surentrainement). Au contraire, elles plafonnent très vite → sous-entraînement ?

« Filtre » appliqué à la sortie des états internes du modèle qui conditionne la structure conservative (Dropout = 1) ou non (Dropout = 0) du modèle.

Limites du modèle

CUDA LSTM

- Input size = 128
- Hidden size = 128
- ➔ $\simeq$ 132 K paramètres

DONNÉES ENTRAINEMENT

- Nombre de bassins = 611
- Nombre d'années = 45 ans
- ➔ $\simeq$ 8,4 millions de débits journaliers observés

La structure du modèle est très conservative.

Au vu du volume de données, des relations plus complexes pourraient être valorisées par un modèle plus flexible.

Cette flexibilité est nécessaire pour une robustesse des projections en changement climatique.

Limites du modèle

CUDA LSTM

- Input size = 128
- Hidden size = 128
- ➔ $\simeq 132$ K paramètres

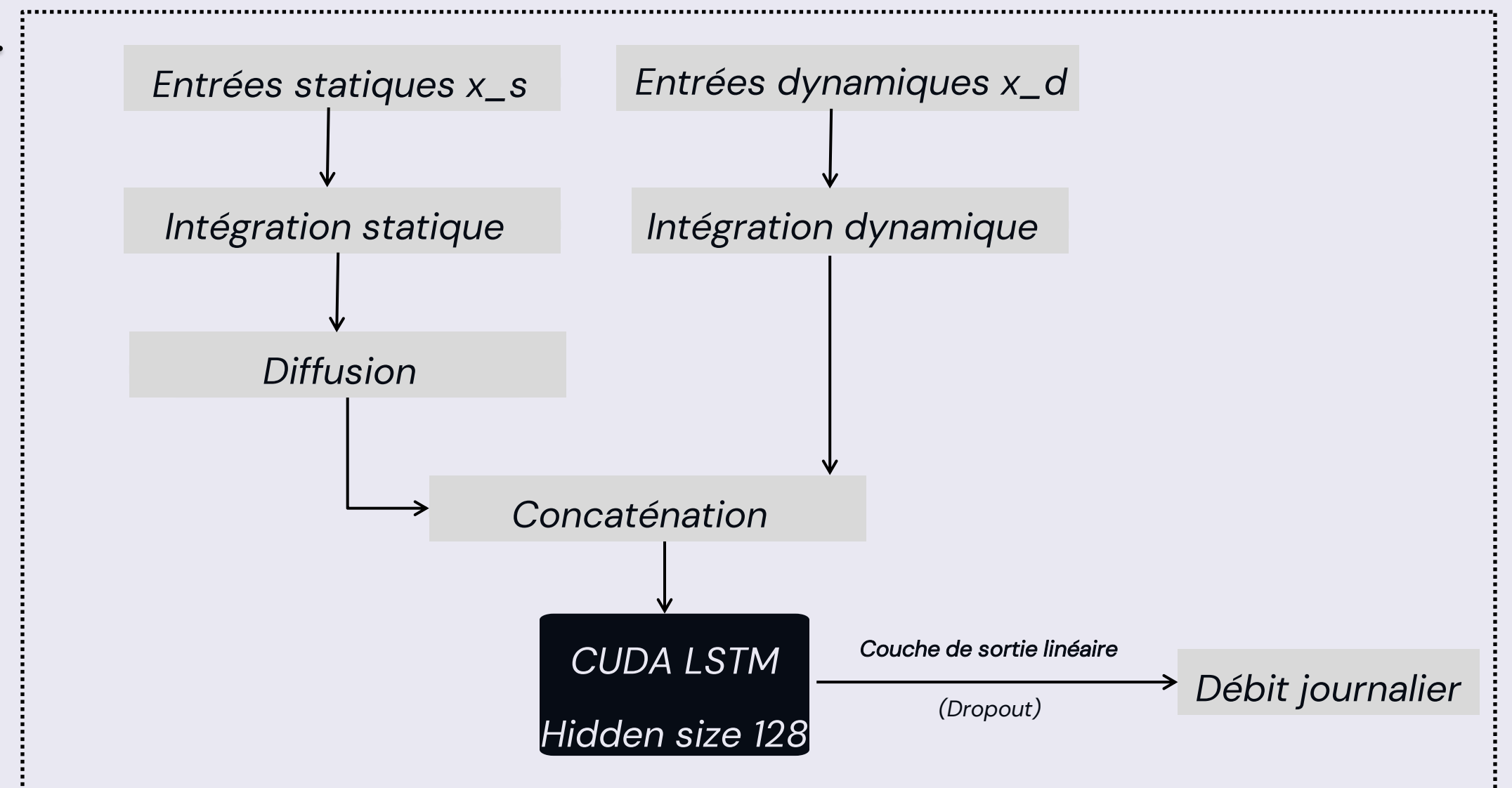
DONNÉES ENTRAINEMENT

- Nombre de bassins = 611
- Nombre d'années = 45 ans
- ➔ $\simeq 8,4$ millions de débits journaliers observés

La structure du modèle est très conservative.

Au vu du volume de données, des relations plus complexes pourraient être valorisées par un modèle plus flexible.

Cette flexibilité est nécessaire pour une robustesse des projections en changement climatique.



Limites du modèle

CUDA LSTM

- Input size = 128
 - Hidden size = 128
- $\simeq$ 132 K paramètres

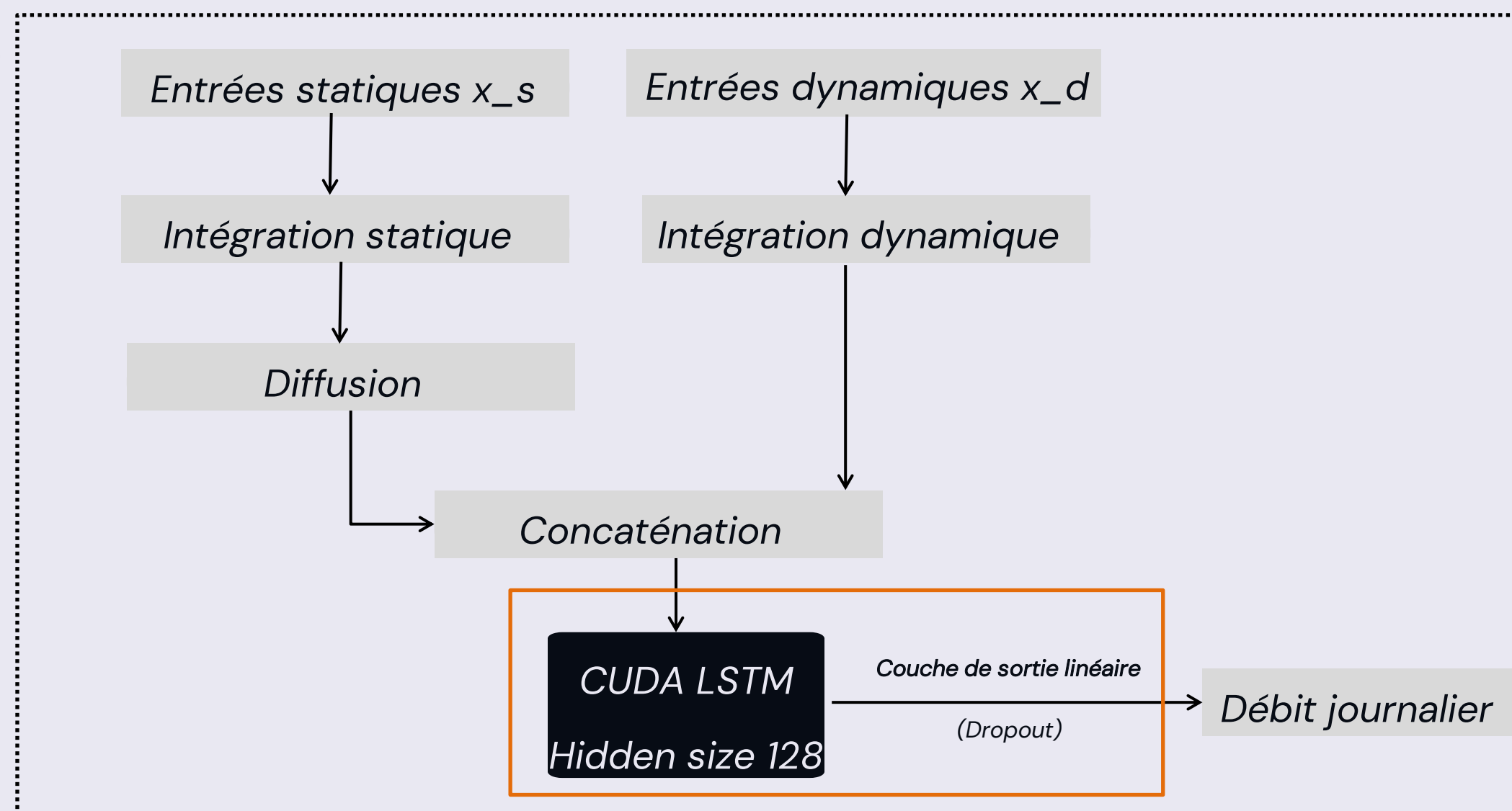
DONNÉES ENTRAINEMENT

- Nombre de bassins = 611
 - Nombre d'années = 45 ans
- $\simeq$ 8,4 millions de débits journaliers observés

La structure du modèle est très conservative.

Au vu du volume de données, des relations plus complexes pourraient être valorisées par un modèle plus flexible.

Cette flexibilité est nécessaire pour une robustesse des projections en changement climatique.



Travaux en cours

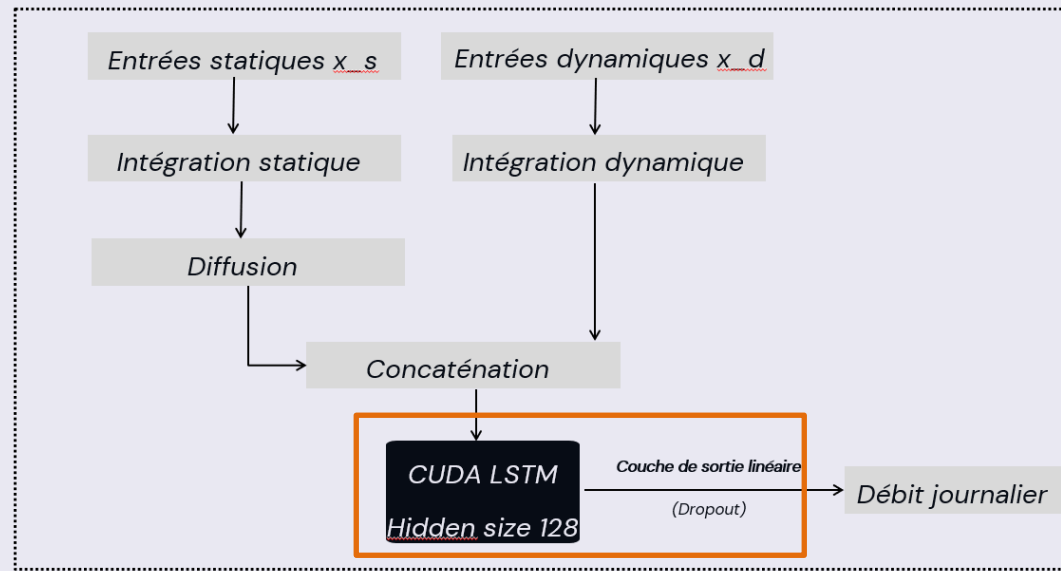
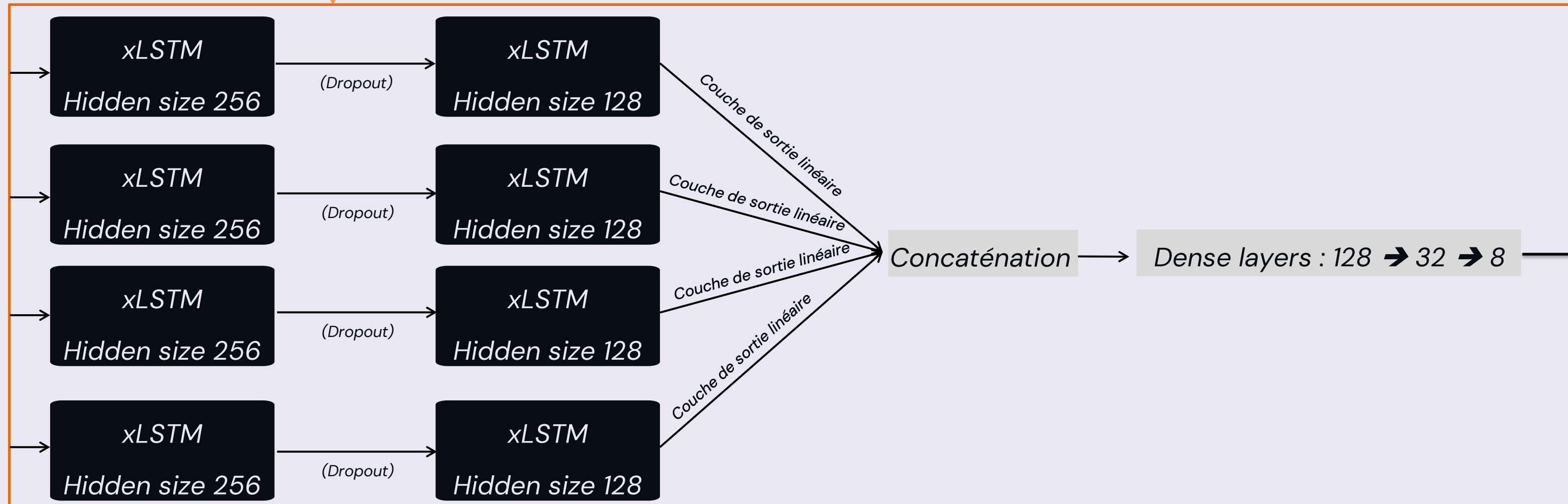


Schéma conceptuel de l'architecture en cours d'implémentation



1 Quelles performances globales du modèle LSTM ?

- Les performances globales du modèle sont très satisfaisantes en régionalisation ($KGE=0,84$).
- Les régimes des BV de diagnostics sont globalement bien reproduits.
- Une dégradation notable se produit sur les basses eaux (Q90).

2 Le LSTM dans l'ensemble Explore2

- Due à ses performances en régionalisation et sa structure, le modèle est complémentaire à l'ensemble pour s'y intégrer et offre des opportunités pour des projections en bassin versant non jaugés.

3 Quelle réponse hydrologique du LSTM en changement climatique ?

- Les changements projetés sont très (trop) conservatifs.
- La complexification du modèle est nécessaire pour permettre au modèle de caractériser les changements de long terme → LSTM-V.2 pour un diagnostic poussé en changement climatique (élasticité).

Merci

Olivier.robelin@hydroclimat.com
