



**MINISTÈRES
TRANSITION ÉCOLOGIQUE
COHÉSION DES TERRITOIRES**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



SYNTHÈSE DE DIFFÉRENTES THÉMATIQUES ABORDÉES LORS DU COLLOQUE SCIENTIFIQUE CO-ORGANISÉ PAR LE SCHAPI ET LA SHF :

« PRÉVISION DES CRUES ET DES INONDATIONS : AVANCÉES, VALORISATION ET PERSPECTIVES »

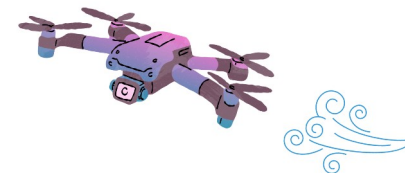
Toulouse, les 28, 29 et 30 novembre 2023

Sommaire

Un peu de contexte

Exemples de restitution

1. Avancées du réseau « Vigicrués »
2. Correction en temps-réel des prévisions d'ensemble de Météo-France
3. Gestion de crise avec le jeu sérieux « Consiliari »
4. Offres d'abonnement « APIC » et « Vigicrués Flash »
5. Incertitudes en hydrométrie
6. Intelligence artificielle en prévision des crues



« Survol »
de sujets

Un peu de contexte



Colloque scientifique organisé par la SHF et le SCHAPI dans le cadre des 20 ans d'existence du SCHAPI

Le SCHAPI (*Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations*) :

- Coordinateur national de tous les services de prévision des crues, basé à Toulouse



La SHF (*Société Hydrotechnique de France*) :

- Association de scientifiques dans plusieurs domaines (dit aussi « société savante »), basée à Paris



Un peu de contexte



Le SCHAPI :

- Diffusion de l'information sur la vigilance des « crues »
- Coordination entre les acteurs de la prévision des crues
- Collecte et organisation des données d'hydrométrie nationales (« Banque-Hydro »)

Site web : <https://www.vigicrues.gouv.fr>

La SHF :

- Fondée en 1912, elle œuvre pour le partage des connaissances, l'innovation et la prospective dans les domaines des sciences et de l'ingénierie de l'eau
- Lieu de brassage pluridisciplinaire et transversal de l'ensemble des connaissances concernant l'Eau : connaissances scientifiques, socio-économiques et technologiques des métiers de la filière
- Environ 600 membres : industriels, bureaux d'études, établissements publics & académiques, centres de recherche...

Site web : <https://www.shf-hydro.org/en/>



Exemples de restitution

- **Avancées du réseau « Vigicrues »** (*SCHAPI, SPC, collaborations avec l'INRAE **)
- **Travaux de recherche, études spécifiques** (*prévision des crues soudaines, incertitudes*)
- **Retours d'expérience** (*utilisation d'outils variés, tests de modèles, assimilation & régionalisation de débits, modélisations à l'échelle locale*)
- **Gestion de crise** (*RDI : Référents Département Inondation, outils d'aide à la décision*)
- **Evolutions de Météo-France** (*prévisions « Alpha », correction en temps-réelle des prévisions d'ensemble*)
- **Intelligence artificielle appliquée à la prévision des crues**

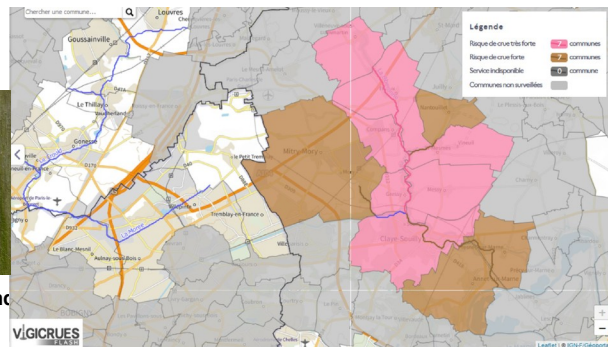
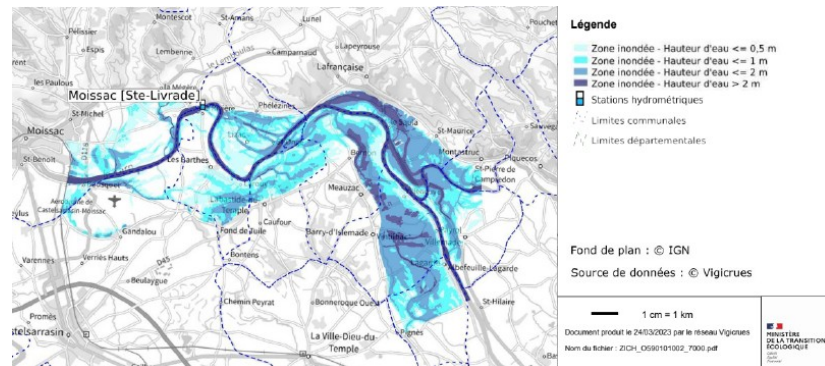
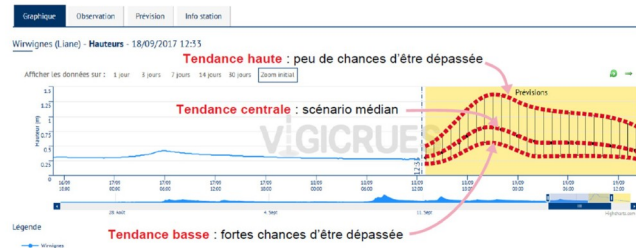
* INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

1. Avancées du réseau « Vigicrues »

Objectif : Faire le point sur les différentes avancées du réseau

Le site web « Vigicrues » :

- Abonnement disponible sur le site et l'application mobile
- Affichage des prévisions sous forme graphique avec incertitudes
- Affichage de Zones Inondées Potentielles (« ZIP », travaux en cours)
- Service d'avertissement des crues soudaines « Vigicrues Flash »
- Plateforme de recensement des repères de crues
- Projet de couverture totale



Sources : Colloque SHF, 2023

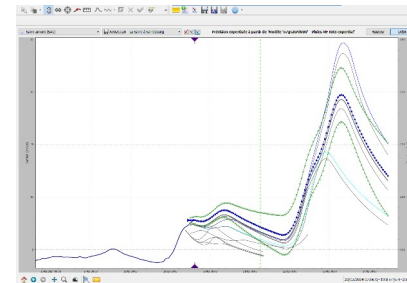


1. Avancées du réseau « Vigicrues »

Objectif : Faire le point sur les différentes avancées du réseau

Les modèles utilisés :

- GRP et Plathynes (*modèles hydrologiques*)
- Mascaret et Télémac (*modèles hydrauliques 1D et 2D*)
- Plateforme en ligne pour l'utilisation des modèles (*POM*)
- Incertitudes (*logiciels OTAMIN et EAO*)
- **Autres modèles** (*modèles locaux, statistiques, abaques, autres opérateurs, etc.*)



Plateforme Opérationnelle pour la Modélisation

openTELEMAC



INRAE

Sources : Colloque SHF, 2023

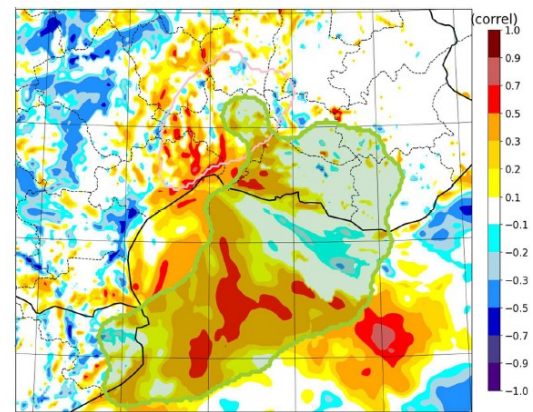
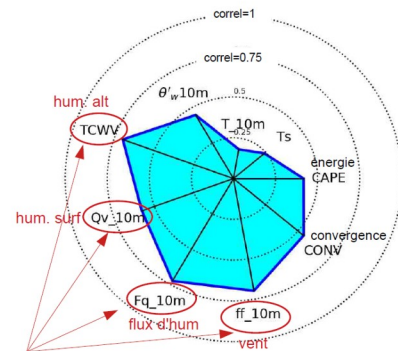
2. Correction en temps-réel des prévisions d'ensemble de Météo-France

Objectif : Mieux prévoir les épisodes convectifs et stationnaires

- Mise au point sur un outil expérimental de surveillance météo :

- Corrélation des membres des ensembles par rapport aux observations en temps-réel des paramètres météorologiques déterminants quelques heures avant l'événement (humidité, vent, énergie convective, etc.)
- Propagation des erreurs responsables de l'incertitude des prévisions afin de mettre en avant les membres les plus probables
- Post-traitement des membres retenus (modification des poids des précipitations)
- Montrer les meilleures corrélations pertinentes pour anticiper le déclenchement de l'épisode

Sources : François Bouttier - CNRM, Météo-France (colloque SHF, 2023)



Champ de corrélations entre les objets précédents, qui montre la sensibilité des pluies au champ de vitesse du vent à 10m, 5h avant le début des pluies intenses. La zone rouge indique qu'un vent plus intense provoque des pluies plus fortes. La région teintée de vert indique la zone amont y des rétrotrajectoires. (source : Météo-France)

Méthode utilisée : variante de la sensibilité ensembliste (Ancell et Hakim, 2007, Hanley et al, 2013), couplée à une pondération bayésienne (Raynaud et al, 2014), utilisée avec les prévisions d'ensemble « Arome » (sources : Météo-France)

3. Gestion de crise avec le jeu sérieux « Consiliari »

Les « jeux sérieux » : des outils ludiques et efficaces pour aborder la gestion de crise

- Conçu en 2019 (Laurène Doukhan) puis amélioré par le SCHAPI, ce jeu propose une mise en situation factice des agents face à une situation de crise

- **But du jeu** : les joueurs incarnent différents rôles (*préfet, agents communaux, maire, pompiers, etc.*) pour aider le Gouverneur à gérer un phénomène d'inondation évoluant de manière aléatoire, dans un temps contraint

→ Savoir-faire, savoir-être, sang froid, cohésion d'équipe

→ 3 à 5 joueurs + maître du jeu, demi-journée minimum

Sources : SCHAPI, Piotte et al, 2023



3. Gestion de crise avec le jeu sérieux « Consiliari »

Déroulement :

Les joueurs choisissent leurs sources d'information au fur et à mesure, analysent la situation et se rendent en salle du conseil et répondent aux questions posées par le Gouverneur

Phasage du jeu :

- Découverte des bulletins de situation (*météo*)
- Ajout de nouvelles informations pertinentes
- Salle d'analyse (*temps de réflexion*)
- Salle du conseil (*répondre à une question aléatoire*)
- Débriefing (*évaluation du joueur par l'équipe*)
- Découverte de la réalité de la crue

Sources : SCHAPI, Piotte et al, 2023



4. Offres d'abonnement « APIC » et « Vigicrues Flash »

Objectif : Informer la population du risque de crue soudaine (*Vigicrues Flash*) et de précipitations intenses (*APIC **), en complément de Vigicrues

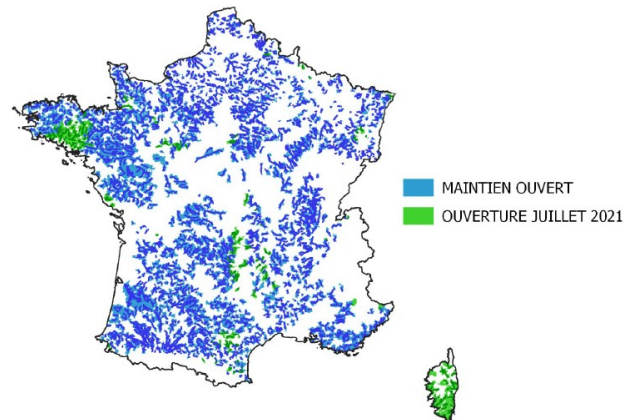
* : Avertissement Pluies Intenses à l'échelle des Communes

- Vigicrues Flash : Service de détection automatique du risque de crue soudaine, développé par le réseau « Vigicrues » (abonnement gratuit : courriel, sms)

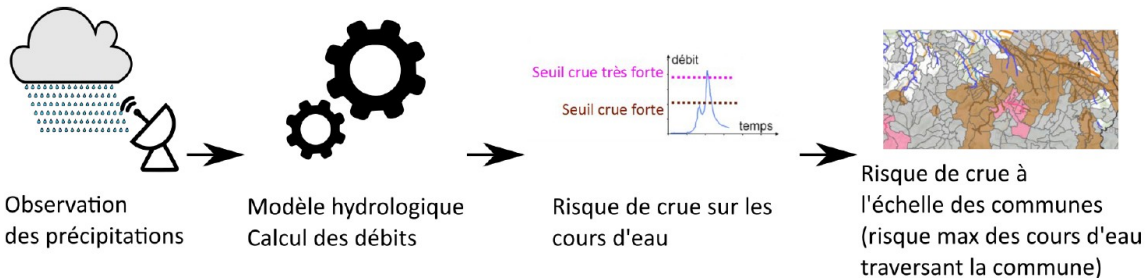
- APIC (*service associé*), développé par Météo-France : signale en temps-réel le caractère exceptionnel des précipitations en cours à l'échelle d'une commune (code couleur sur la carte du site)

Site web : <https://apic-vigicruesflash.fr/?mode=vf&area=fr>

Sources : SCHAPI, Piotte et al, 2020 ; Tzanos et al, 2023



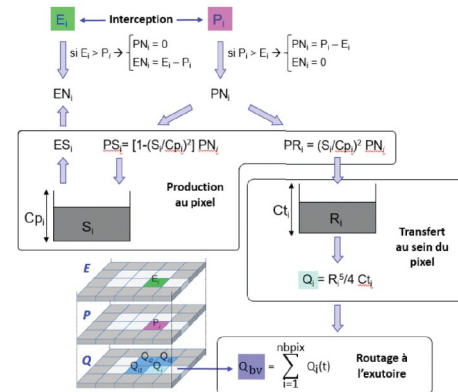
Evolution de la couverture de service Vigicrues Flash - Juillet 2021



4. Offres d'abonnement « APIC » et « Vigicrues Flash »

Vigicrues Flash :

- Repose sur l'observation des précipitations et une modélisation hydrologique (modèle continu à deux réservoirs + lame d'eau Antilope 15 min pour fournir des débits à chaque pixel, ensuite agrégés)
- Seuils de déclenchement des avertissements crue forte et crue très forte, déterminés à partir d'un rejeu long du modèle (22 ans) réalisés par l'INRAE (exclusion des bassins dont le temps de réaction est trop court (< 1h30), soumis à l'influence du karst, de la neige ou de barrages)



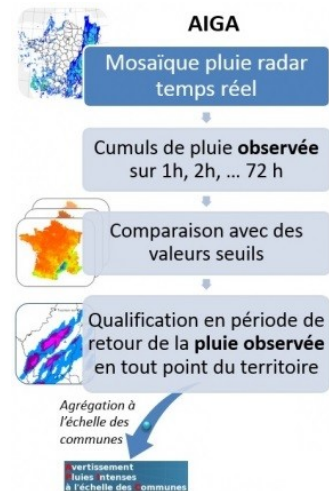
Sources : SCHAPI, Piotte et al, 2020 ; Tzanos et al, 2023

APIC :

- Repose sur la méthode AIGA* de Météo-France :
- Génération de cartes de l'aléa pluviométrique : périodes de retour « T » via la méthode SHYREG ** (base de données), Arnaud et al, 2014
- Comparaison aux observations de pluie Antilope de 1 à 24 h (pluies qualifiées « d'intenses » : T > 10 ans, ou de « très intenses » : T > 50 ans)

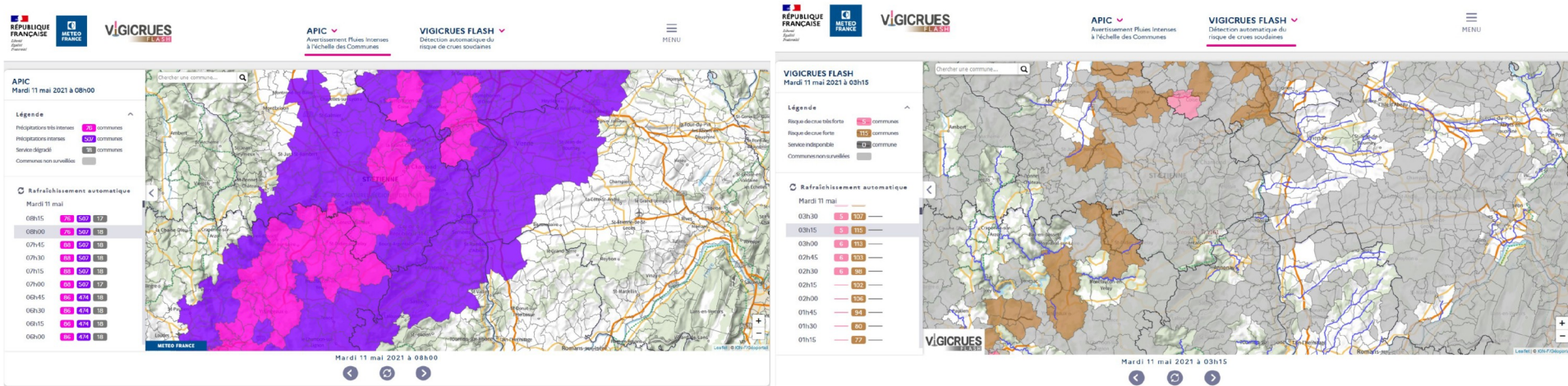
* : Adaptation d'Informations Géographiques pour l'Alerte crues

** : Simulation d'Hydrogrammes pour la prédétermination des crues REGionalisée



4. Offres d'abonnement « APIC » et « Vigicrues Flash »

Exemples de cartes web « APIC (à gauche) » et « Vigicrues Flash » (à droite) :



Sources : SCHAPI, Piotte et al, 2020 ; Tzanos et al, 2023

5. Incertitudes en hydrométrie

Logiciel « BaRatin » (*Bayesian Rating curve*) :

- Open-source, développé par l'INRAE (*Le Coz et al., 2014, Horner et al., 2018*)

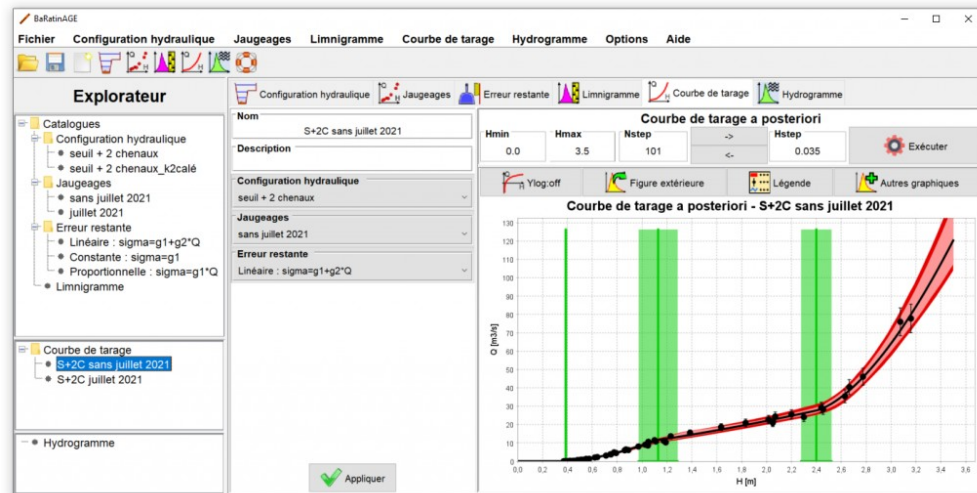
- Objectif : Estimation de l'incertitude des courbes de tarage

- Besoin de l'incertitude des jaugeages, de contrôles hydrauliques et de coefficients de seuil

- Génération d'une grande quantité de courbes possibles :

→ Représenter l'incertitude combiné aux différents facteurs via une approche bayésienne basée sur l'échantillonnage par méthode Monte Carlo & Chaîne de Markov

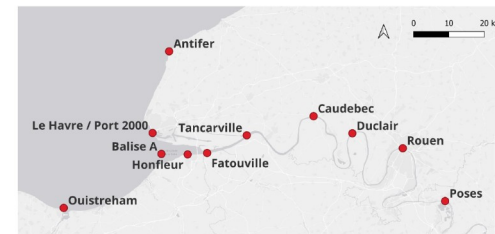
Dernière version : <https://github.com/BaRatin-tools/BaRatinAGE/releases/tag/v2.2.1>



Sources : Développement d'outils pour la quantification des incertitudes des données hydrométriques, Le Coz et al, 2023

6. Intelligence artificielle en prévision des crues

1/3 : Comparaison du modèle LSTM * avec un modèle auto-régressif pour la prévision des crues estuarienne



Carte des principales stations marégraphiques de la baie de Seine

- Travaux menés par la DREAL Nouvelle Aquitaine

- **Objectif** : Corriger les erreurs produites en simulation du modèle hydraulique « Télémac2D » afin d'optimiser les prévisions à Honfleur (baie de Seine) par rapport à une expertise humaine

- Modèle LSTM sélectionné : effet mémoire à court & long terme

- Conclusion de l'étude : meilleur comportement du modèle auto-régressif, sans doute mieux adapté au contexte de l'étude

* Long Short Term Memory (deep learning)

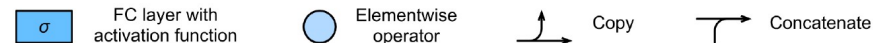
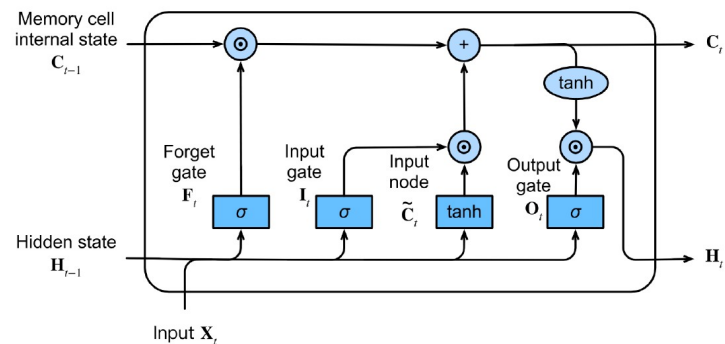


Schéma détaillé d'une cellule LSTM [Zhang et al., 2021]

Sources : Théo Garin, ingénierie mécanique TN10 (CEREMA & laboratoire M2C, Margny-les-Compiègne)

6. Intelligence artificielle en prévision des crues

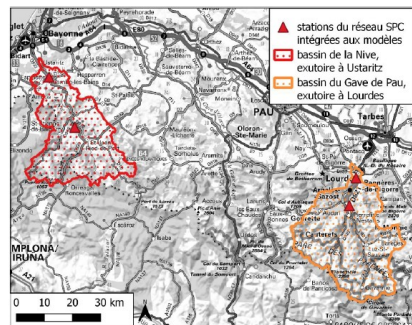
1.2/3 : Projet européen « *Inundatio* » (2020-2022, collaboration entre la France, l'Espagne et le Portugal)

- **Objectif** : Créer un système capable de détecter et d'anticiper les crues soudaines de manière automatisée par l'analyse des informations hydrométéorologiques et des prévisions (*tests sur 2 bassins : Nive & Nivelle*)
- Modélisations classiques : hydrologie distribuée & hydraulique (2D)
- Modélisations par réseaux de neurones : MLP *, LSTM, CNN *, etc.

Résultats de deep-learning sur deux types de scénario à courte échéance : pluie de bassin observée sur 6h (scénario 1), et pluie observée (3h) et prévue (3h), scénario 2

- Résultats encourageants pour des stations où les chroniques de débits restent limitées, mais pas de comparaison directe avec la modélisation hydraulique & hydrologique

Sources : Artificial Intelligence in flood modelling : Results of Inundatio project (GASSET et al, 2023)



Localisation des bassins versants retenus modélisés dans Inundatio

Score : RMSE

		1 ^{ère} heure	2 ^{ème} heure	3 ^{ème} heure	4 ^{ème} heure	5 ^{ème} heure	6 ^{ème} heure
Scénario_1	Régression linéaire	0.60	1.10	1.70	2.30	2.90	3.60
	MLP	0.60	0.96	1.38	1.92	2.53	3.16
	LSTM	0.91	1.17	1.51	1.96	2.48	3.07
	CNN	0.76	1.08	1.48	1.97	2.56	3.20
	Multi-headed CNN	0.67	1.06	1.48	2.03	2.61	3.20
	Encoder-Decoder LSTM	0.99	1.25	1.67	2.24	2.85	3.48
Scénario_2	Régression linéaire	0.60	1.10	1.60	2.20	2.70	3.30
	MLP	0.63	1.01	1.30	1.64	1.97	2.34
	LSTM	0.96	1.21	1.56	1.90	2.34	2.75
	CNN	0.91	1.12	1.38	1.69	1.96	2.25
	Multi-headed CNN	0.65	0.93	1.25	1.57	1.91	2.27
	Encoder-Decoder LSTM	0.92	1.15	1.39	1.74	2.09	2.54

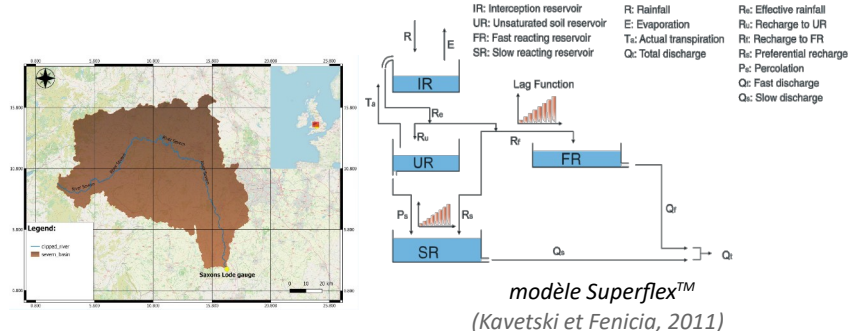
Tableau 1 scores RMSE (en m³/s) des comparaisons de modèles de deep learning. Comparaison aux meilleurs résultats en machine learning (régression linéaire)

6. Intelligence artificielle en prévision des crues

3/3 : Comparaison d'un réseau neuronal artificiel et d'un modèle hydrologique conceptuel pour la prévision des crues

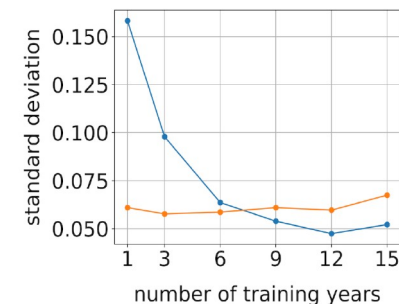
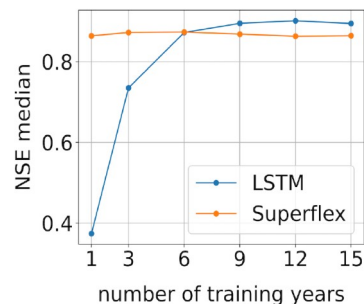
Secteur d'études : Bassin versant de la Severn (Angleterre : débit moyen de 107 m³/s)

- Périodes d'entraînement / calibration : 2004-2017, et validation : 2018-2020
- Données d'entrée utilisées : précipitations journalières, température maximale et minimale, durée d'ensoleillement, rayonnement & pression.
- Critère d'évaluation : RMSE, NSE (Nash & Sutcliffe) essentiellement



Conclusions :

- Le modèle LSTM fournit de meilleurs résultats que le modèle Superflex au-delà de 6 ans d'entraînement
- Sensibilité (variations de résultats) du modèle LSTM pour une durée d'entraînement limitée (durée minimale conseillée : 10-15 ans)



Sources : Comparison of an artificial neural network with a conceptual rainfall-runoff model for streamflow prediction (Boodoo et al, 2023)



**MINISTÈRES
TRANSITION ÉCOLOGIQUE
COHÉSION DES TERRITOIRES**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



MERCI DE VOTRE ATTENTION