

Visualiser l'évolution passée et future de l'hydrologie en France : les portails MAKACHO et MEANDRE

Visualising past and future hydrology in France : the MAKACHO and MEANDRE portals

Louis HÉRAUT¹, Jean-Philippe VIDAL¹, Antoine BARD², Ignazio GIUNTOLI³, Michel LANG¹, Benjamin RENARD^{4,5}, Eric SAUQUET¹

¹INRAE, UR RiverLy, ²Energie Développement Services du Briançonnais, ³CNR-ISAC,

⁴INRAE, UR RECOVER, ⁵Université Aix-Marseille

RÉSUMÉ

Le changement climatique a considérablement affecté l'hydrologie de la France au cours des dernières décennies, et les projections futures confirment la poursuite de ces tendances au cours du 21^e siècle. Pour relever ces défis, deux portails interactifs, MAKACHO et MEANDRE, ont été développés pour visualiser les changements hydrologiques passés et futurs en France continentale et en Corse. MAKACHO fournit une plateforme conviviale pour analyser les tendances des données de débit de plus de 230 stations hydrométriques faiblement influencées, en utilisant des tests statistiques non paramétriques pour évaluer les changements dans les caractéristiques des débits au cours des dernières décennies. MEANDRE offre quant à lui un accès guidé aux projections hydrologiques du projet Explore2, qui intègrent différents scénarios d'émissions, modèles climatiques régionaux, méthodes de correction de biais, et modèles hydrologiques. Il synthétise ainsi un ensemble complexe de données pour présenter des informations clés sur les débits futurs des cours d'eau et les niveaux de nappe, en soulignant les changements dans les débits moyens, d'étiage et de crue, ainsi que les incertitudes associées. Ensemble, ces outils servent de systèmes d'aide à la décision pour l'adaptation au climat, en fournissant aux chercheurs, aux décideurs politiques et aux acteurs locaux des informations accessibles mais scientifiquement solides. En faisant le lien entre la recherche et la pratique, ils favorisent une meilleure compréhension des changements hydrologiques et soutiennent une planification régionale éclairée en réponse au changement climatique.

ABSTRACT

Climate change has significantly affected the hydrology of France in recent decades, and future projections confirm the continuation of these trends into the 21st century. To address these challenges, two interactive portals, MAKACHO and MEANDRE, have been developed to visualise past and future hydrological changes in mainland France and Corsica. MAKACHO provides a user-friendly platform for analysing trends in flow data from over 230 near-natural hydrometric stations, using non-parametric statistical tests to assess changes in flow characteristics over recent decades. MEANDRE provides guided access to hydrological projections from the Explore2 project, which integrates different emissions scenarios, regional climate models, bias-correction methods, and hydrological models. It synthesises a complex dataset to present key insights into future streamflow and aquifer levels, highlighting changes in mean, low and high flows, along with associated uncertainties. Together, these tools serve as decision support systems for climate adaptation, providing accessible yet scientifically robust insights for researchers, policy makers and local stakeholders. By bridging research and practice, they promote a deeper understanding of hydrological changes and support informed regional planning in response to climate change.

MOTS CLÉS

changement climatique, France, hydrologie, portails, visualisation

climate change, France, hydrology, portals, visualisation

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le changement climatique a déjà fortement influencé l'hydrologie française au cours des dernières décennies, et les projections hydrologiques futures extraites du récent projet national Explore2 (<https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1244>) confirment la poursuite des tendances observées pour la suite du XXI^e siècle. L'objectif de cette communication est de présenter deux portails interactifs permettant de visualiser, de manière cartographique et temporelle, les évolutions passées observées et projetées futures de l'hydrologie en France hexagonale et en Corse. L'idée de ces deux portails est de transférer les connaissances acquises au travers de projets de recherche, mais aussi de permettre à l'utilisateur de s'appropriier les jeux de données sous-jacents spécialement élaborés par la communauté scientifique. Ces deux portails se veulent ainsi être de véritables services climatiques au service de l'adaptation, en privilégiant les aspects graphiques, l'interactivité via la mise à disposition des données, et l'accompagnement à leur utilisation.

2 MAKAO

MAKAO (pour MAnn-Kendall Analysis of Hydrological Observations) (<https://makaho.sk8.inrae.fr/>) est un système de visualisation cartographique interactif permettant de calculer les tendances présentes dans les données des stations hydrométriques appartenant au Réseau de référence pour la Surveillance des Étiages (RRSE, Giuntoli et al., 2013). Ce projet a reçu un financement du Ministère de la transition écologique et le *Prix science ouverte des données de la recherche* décerné en 2024 par le Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche dans la catégorie *Créer les conditions de la réutilisation* (<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/remise-des-prix-science-ouverte-des-donnees-de-la-recherche-2024-98045>).

2.1 Le Réseau de Référence pour la Surveillance des Étiages (RRSE)

MAKAO s'appuie sur le RRSE, rassemblant 232 stations hydrométriques jaugeant des bassins versants faiblement influencés par les activités humaines, ayant une profondeur historique de plus de 40 ans, et une bonne qualité de mesures, notamment en étiage (Giuntoli et al., 2013). Le réseau regroupe des bassins dont 85% ont une surface drainée inférieure à 1000 km². Leur dispersion sur le territoire permet de couvrir l'ensemble des différents régimes hydrologiques présents en France et la disponibilité des données assure aujourd'hui des séries temporelle de plus de 50 ans. Les débits observés à ces stations, de facto majoritairement influencés par l'évolution du climat, permettent donc d'identifier les tendances de différents indicateurs calculés à partir des chroniques journalières de débit, disponibles librement sur l'HydroPortail (<https://www.hydro.eaufrance.fr/>).

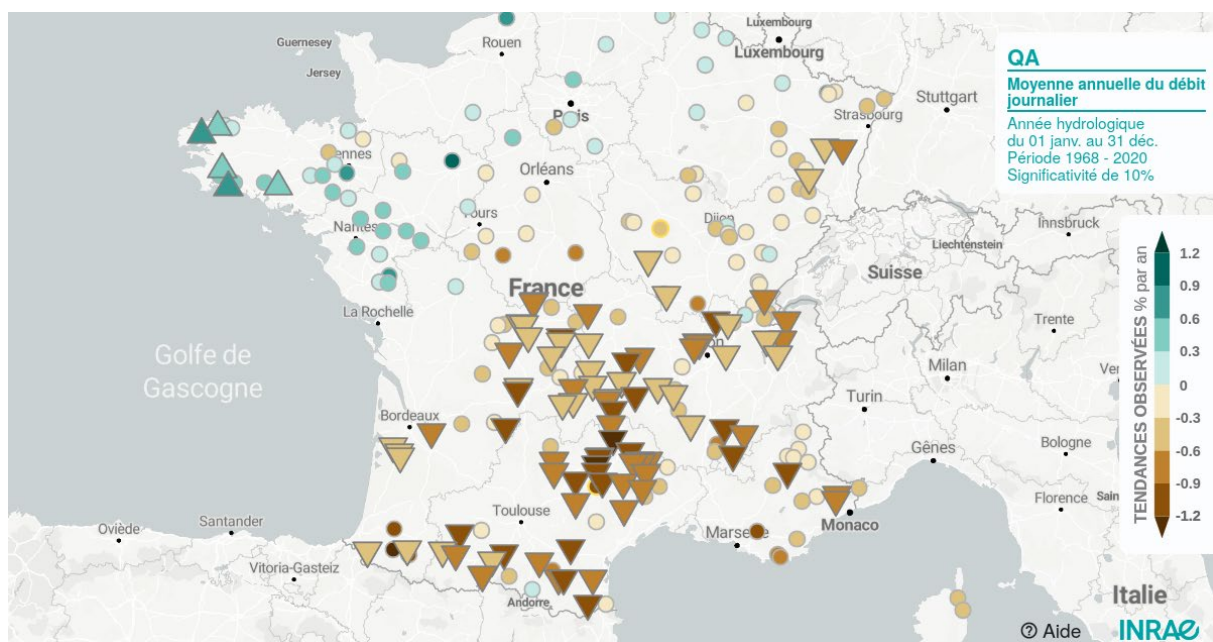


Figure 1: Carte des tendances sur le débit moyen annuel sur la période 1968-2020, avec un seuil de significativité de 10%. Capture d'écran du portail MAKAO.

2.2 Calcul en ligne de tendances sur des variables hydrologiques

La forte variabilité intra-annuelle du débit et les cycles saisonniers imposent une agrégation annuelle des chroniques journalières afin de resserrer l'analyse de stationnarité sur un seul aspect du régime hydrologique. Les différentes possibilités de paramétrisation de cette agrégation sont donc proposées de manière interactive et simplifiée par MAKHO pour permettre à chacun de se saisir de ces questions de choix de la variable d'intérêt selon le cas d'étude. Au total, 52 variables hydrologiques sont disponibles pour balayer les variations d'intensité et de saisonnalité du débit au cours du temps (eaux moyennes, hautes eaux, et basses eaux).

L'agrégation annuelle permet ensuite l'application de tests statistiques non-paramétriques. Dans un premier temps, le test utilisé pour la détection des tendances est une variante du test de Mann-Kendall tenant compte de l'autocorrélation d'ordre un afin de tenir compte de potentielles dépendances interannuelles des étiages (Hamed & Rao, 1998). Dans un second temps, la pente de la tendance est fournie par l'estimateur de Theil-Sen (Sen, 1968). Ces résultats permettent respectivement d'indiquer, à un niveau de confiance donné, l'existence ou non d'une tendance significative, à la hausse ou à la baisse, et de fournir dans tous les cas une valeur associée à cette tendance afin de proposer une information sur la cohérence spatiale des résultats.

3 MEANDRE

MEANDRE (<https://meandre.explore2.inrae.fr/>) présente de manière guidée un regard d'expert sur les résultats des projections hydrologiques réalisées sur la France dans le cadre du projet national Explore2 (Sauquet et al., 2024). Les résultats visibles sur cette plateforme sont un aperçu de futurs possibles pour la ressource en eau. Ce portail a été développé dans le cadre du projet LIFE Eau&Climat (Siauve et Bornançin-Plantier, 2022). Le projet LIFE Eau&Climat (LIFE19 GIC/FR/001259) a reçu un financement du programme LIFE de l'Union européenne.

3.1 Les projections hydrologiques Explore2

Le projet national Explore2 a rassemblé la communauté de recherche française en climatologie et hydrologie pour mettre à jour les projections hydrologiques à l'échelle nationale sous changement climatique pour l'ensemble du XXI^e siècle (Sauquet et al., 2024). Les projections hydrologiques Explore2 sont constituées d'un ensemble de chroniques journalières de débit sur plus de 4000 points du réseau hydrographique de France hexagonale et de Corse et de niveaux de nappes pour les principaux aquifères français (Sauquet et al., soumis). Ces chroniques sont le résultat d'une chaîne de modélisation hydroclimatique s'appuyant sur un ensemble de simulations de modèles régionaux de climat forcés par trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Ces projections ont ensuite fait l'objet d'une correction de biais selon deux méthodes différentes. Un ensemble de 9 modèles hydrologiques a ensuite permis de transformer ces projections climatiques en projections de débit et de hauteur de nappe. La nécessaire synthèse de ce jeu de données très riche et très complexe a été réalisée dans un rapport dédié aux messages et enseignements principaux du projet Explore2 (Sauquet et al., 2024), mais aussi au travers du portail MEANDRE.

3.2 Synthèse interactive des messages du projet Explore2

MEANDRE a la volonté d'apporter des messages simples mais précis répondant aux questions majeures que le projet Explore2 a mises en avant. Sont abordées successivement l'évolution des débits moyens, des débits d'étiage et des débits de crue, au travers d'un parcours guidé sur un petit nombre de pages. Les principaux résultats sont balayés au fil de ces pages : renforcement d'un contraste nord-sud sur la quantité d'eau disponible annuellement, diminution drastique des débits en étiage et augmentation au cours du temps de l'incertitude sur l'intensité des crues. Les deux questions centrales du choix de projections climatiques contrastées – appelés narratifs dans le projet Explore2 – et de la prise en compte des incertitudes sont de même abordées de manière graduelle. Les messages sont transmis via des cartes de changement de débit en fin de siècle et à des informations textuelles avec un niveau de complexité progressif. Chaque carte est zoomable et l'interactivité avec les points représentés permet d'accéder aux chroniques sur 125 ans des variables considérées (notamment débit moyen QA, débit de crue QJXA, et débit d'étiage VCN10) sur le bassin versant sélectionné.

Une ouverture sur une exploration avancée des données est aussi proposée. Elle permet d'avoir accès à l'ensemble des futurs de l'eau proposés dans le jeu de données Explore2, et d'explorer les différents types d'incertitudes prises en compte, depuis le scénario d'émission sélectionné jusqu'au choix du modèle hydrologique.

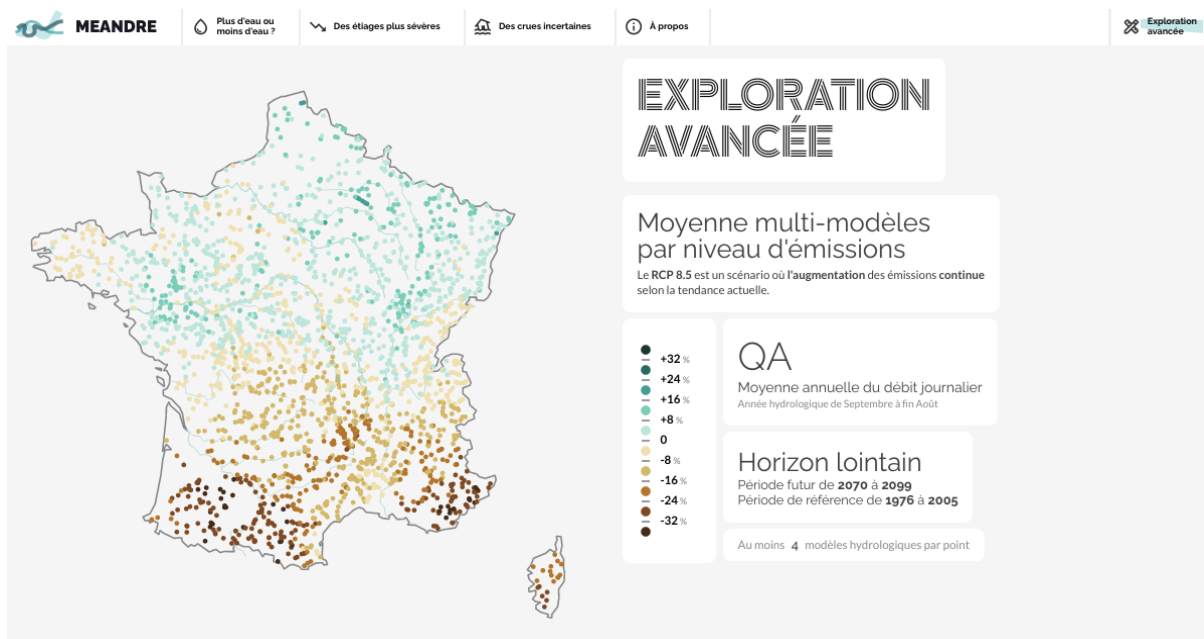


Figure 2: Cartes des changements projetés sur le débit moyen annuel entre les périodes 1976-2005 et 2070-2099, sous scénario d'émissions RCP8.5 (moyenne multimodèles climatiques et hydrologiques). Capture d'écran du portail MEANDRE.

4 CONCLUSIONS

Les deux outils complémentaires MAKACHO et MEANDRE permettent de saisir l'ampleur des changements en cours et à venir sur l'hydrologie française, mais aussi la cohérence entre les tendances de fond observées au cours des dernières décennies et les projections effectuées pour le restant du XXI^e siècle. Ces interfaces permettent de composer avec la complexité intrinsèque des jeux de données en donnant à voir des représentations graphiques simples et familières amenant l'utilisateur à inférer seul les impacts pourtant complexes mais de moins en moins immatériels du changement climatique sur l'hydrologie.

Rendre disponibles et visibles ces outils permet donc de donner une porte d'entrée pour le public le moins averti tout en proposant aux acteurs du territoire des outils pour aider à une planification régionale plus éclairée.

BIBLIOGRAPHIE

- Giuntoli, I., Renard, B., Vidal, J.-P. & Bard, A. (2013) Low flows in France and their relationship to large-scale climate indices. *Journal of Hydrology*, 482, 105-118. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.038>
- Hamed, K. H. & Rao, A. R. (1998) A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204, 182-196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Sauquet, É., Evin, G., Siauue, S., Bornancin-Plantier, A., Jacquin, N., Arnaud, P., Bérel, M., Bernus, S., Bonneau, J., Branger, F., Caballero, Y., Colléoni, F., Collet, L., Corre, L., Drouin, A., Ducharne, A., Fournier, M., Gailhard, J., Habets, F., Hendrickx, F., Héraut, L., Hingray, B., Huang, P., Jaouen, T., Jeantet, A., Lanini, S., Le Lay, M., Loudin, S., Magand, C., Marson, P., Mimeau, L., Monteil, C., Munier, S., Perrin, C., Robin, Y., Rousset, F., Soubeyroux, J.-M., Strohmenger, L., Thirel, G., Tocquer, F., Tramblay, Y., Vergnes, J.-P., Vidal, J.-P., Vrac, M. (2024) Messages et enseignements du projet Explore2, <https://doi.org/10.57745/I3XIPW>, Recherche Data Gouv, V7
- Sauquet, E., Évin, G., Siauue, S., Aissat, R., Arnaud, P., Bérel, M., Bonneau, J., Branger, F., Colleoni, F., Ducharne, A., Gailhard, J., Habets, F., Hendrickx, F., Héraut, L., Hingray, B., Huang, P., Jaouen, T., Jeantet, A., Lanini, S., Le Lay, M., Magand, C., Mimeau, L., Monteil, C., Munier, S., Perrin, C., Robeli, O., Rousset, F., Soubeyroux, J.-M., Strohmenger, L., Thirel, G., Tocquer, F., Tramblay, Y., Vergnes, J.-P., Vidal, J.-P. (soumis) A large transient multi-scenario multi-model ensemble of future streamflows and groundwater projections in France, *Earth System Science Data*.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Siauue, S. & Bornancin-Plantier (2022) Gestion locale de l'eau et changement climatique : des outils apportés par le projet européen LIFE Eau&Climat. *TSM*, 17-24. <https://doi.org/10.36904/tsm/202204017>