



**ÉTUDE**

**HMUC**

**AXE LOIRE**

Climat

# Un climat qui change, une Loire à préserver

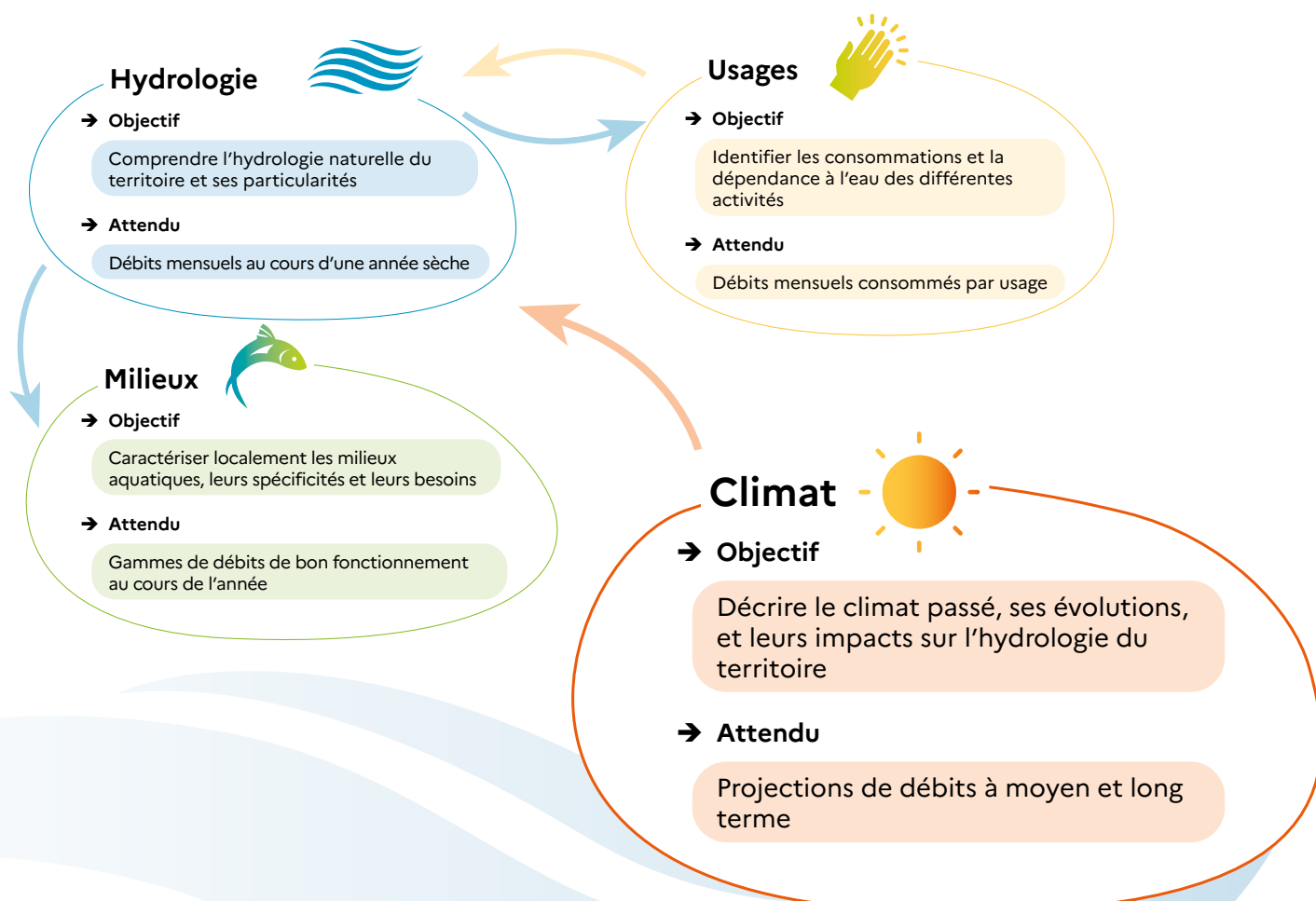
Des sécheresses plus longues, des crues parfois plus intenses : la Loire vit déjà les effets du dérèglement climatique. L'étude HMUC (Hydrologie, Milieux, Usages, Climat) Axe Loire analyse les tendances passées et explore les scénarios futurs pour anticiper et orienter au mieux les stratégies d'adaptation.

Le changement climatique est désormais une réalité observable sur le bassin de la Loire. Depuis 60 ans, les analyses montrent une baisse marquée des débits moyens, en particulier dans le sud du bassin, ainsi qu'un renforcement de la sévérité des étiages.

Pour répondre à cette interrogation, l'agence de l'eau Loire-Bretagne a confié à l'INRAE, dans le cadre d'un partenariat, le soin d'étudier l'impact du climat sur les débits de la Loire et de ses affluents.

Ces évolutions fragilisent les milieux aquatiques et accentuent les tensions entre usages. Elles posent une question centrale : quelle sera la disponibilité de l'eau demain, et comment s'y adapter ?

**Ce travail, mené à travers le projet EHCLO (Exploration Hydro Climatique de la Loire), constitue le volet « Climat » de l'étude HMUC Axe Loire, aux côtés de l'hydrologie, des milieux et des usages.**



# TRACC, une trajectoire commune pour se projeter

## Qu'est-ce que la TRACC ?

Pour rendre les projections climatiques opérationnelles et comparables entre territoires, l'étude HMUC Axe Loire s'appuie sur une Trajectoire de Réchauffement de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC).

Définie au niveau national, dans le cadre du Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC), cette trajectoire constitue un repère partagé pour cadrer diagnostics, projections et stratégies d'adaptation.



## Les trois horizons climatiques retenus

Le cadre national fixe trois niveaux de réchauffement par rapport à l'ère préindustrielle (1850-1900)



## Comment la TRACC est-elle mobilisée dans l'étude ?

Seuls les niveaux de réchauffement à +2.7°C et +4°C ont été retenus. Ces deux horizons servent de points de repère pour calibrer les projections futures dans l'étude HMUC Axe Loire :

- ➔ **Ajustement des indicateurs hydrologiques futurs** utilisés dans les scénarios narratifs (étiages, crues, débits moyens)
- ➔ **Exploration de trajectoires d'adaptation** : tester comment la Loire se comporte selon les deux niveaux de réchauffement +2,7°C vers 2050 et +4°C à l'horizon 2100.

# Méthodologie de construction des narratifs hydro-climatiques

Cette méthode a été réutilisée à l'échelle nationale.

Étapes	Travaux menés	Finalité
<b>1. Analyse du passé</b>	<b>Étude de 60 ans de données</b> climatiques et hydrologiques (débits moyens, crues, étiages sévères). <b>Tests statistiques</b> (Mann-Kendall, Pettitt) pour identifier des tendances.	<b>Mettre en évidence les évolutions</b> déjà observées et établir une base solide de <b>comparaison</b> .
<b>2. Modélisation du futur</b>	<b>Simulation</b> des impacts du réchauffement global selon la TRACC (+2,7°C, +4°C). <b>Utilisation des projections</b> climatiques Explore 2 et de modèles hydrologiques adaptés au bassin.	<b>Anticiper les évolutions possibles des débits (hauts, moyens et bas) à différents horizons temporels.</b>
<b>3. Construction des narratifs</b>	<b>Regroupement des résultats</b> par comportements similaires grâce à une méthode statistique (clustering k-means).	<b>Définir quatre grands scénarios d'évolution</b> de la Loire, qui servent de repères pour penser l'adaptation.

## Les quatre narratifs identifiés

### **A** Étiages sévères

- ➔ Fortes baisses des débits estivaux.

### **G** Débits en hausse

- ➔ Débit annuel en légère hausse et crues plus intenses.

### **E** Intensification des extrêmes

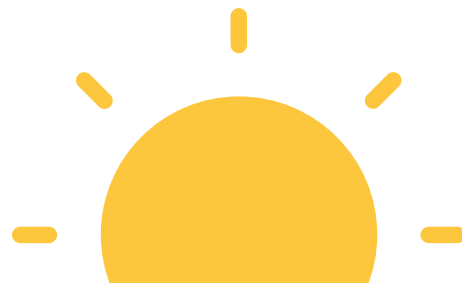
- ➔ Crues plus intenses, étiages plus marqués.

### **C** Évolutions modérées

- ➔ Tendances globales des débits à la baisse.

# La Loire d'hier et d'aujourd'hui : des évolutions déjà visibles

Depuis plus de 60 ans, la Loire est suivie grâce à un réseau de stations hydrométriques et d'analyses climatiques. Ces observations mettent en évidence des tendances nettes qui traduisent l'influence du changement climatique sur le fleuve.



## Climat, tendances observées sur la période 1968-2024

	Hiver	Printemps	Été	Automne
Températures minimales	↗↗	↗↗	↗↗↗	↗↗
Températures maximales	↗↗	↗↗↗	↗↗↗	↗↗
précipitations	↘	→	→	→

## Hydrologie, tendances observées liées au climat sur la période 1968-2024

	Amont	Aval
Débits moyens	↘↘	→
Bas débits	↘↘↘	→
Hauts débits	↘	→

1 flèche = faible évolution  
2 flèches = évolution moyenne  
3 flèches = forte évolution



Ce que cela signifie pour la ressource

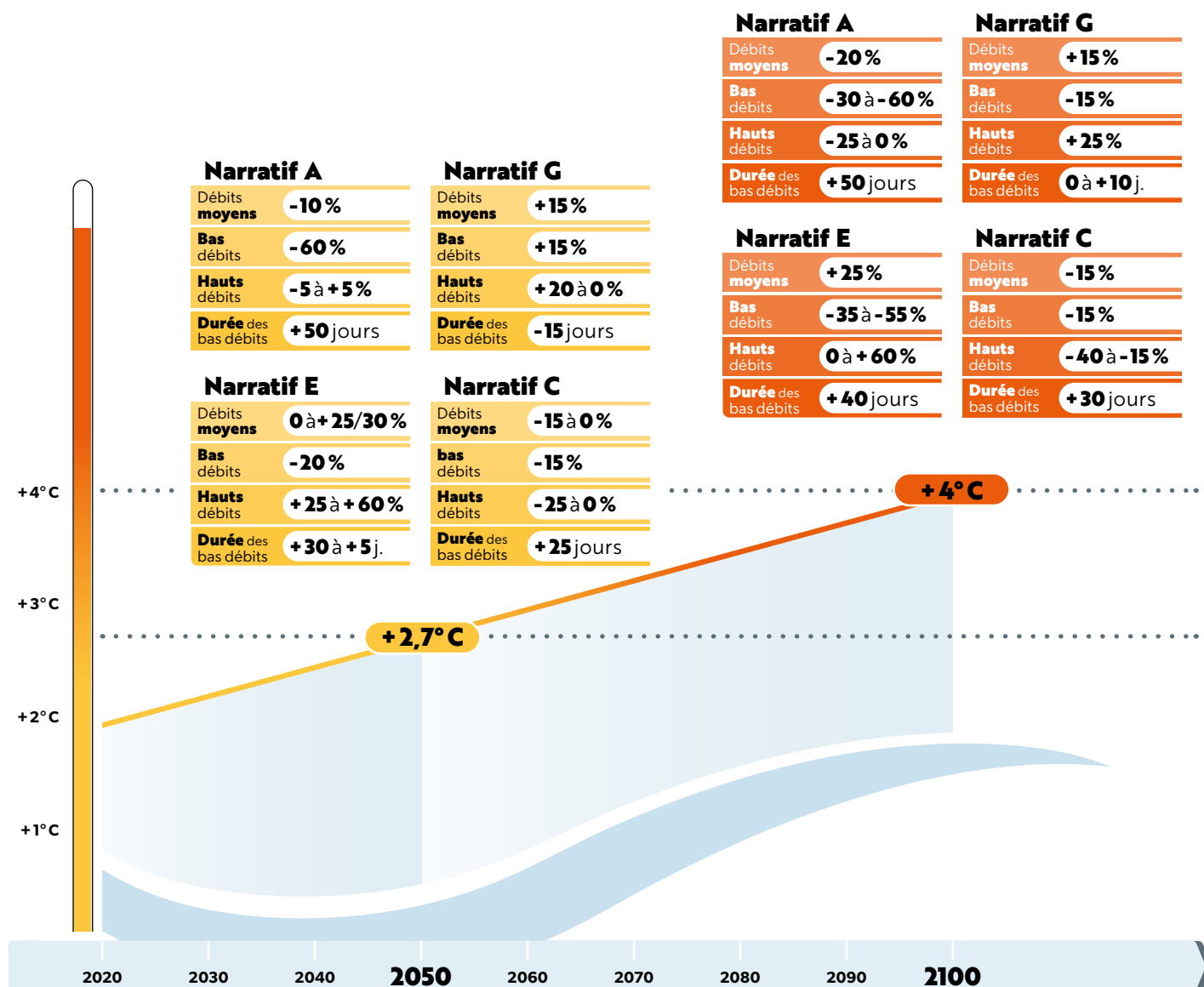
- **Débits moyens en baisse** : jusqu'à -30 % à l'amont du bassin (1968-2024).
- **Étiages plus sévères** : aggravation des basses eaux, avec des baisses pouvant atteindre -50 %.
- **Crues contrastées** : évolution hétérogène selon les secteurs, certaines stations montrant une intensification, d'autres une stabilité.

Ces constats montrent que la ressource en eau est déjà affectée. Ils constituent une base solide pour projeter les impacts futurs du dérèglement climatique et construire les scénarios d'adaptation.

# La Loire demain

## Projections climatiques à +2,7°C et +4°C

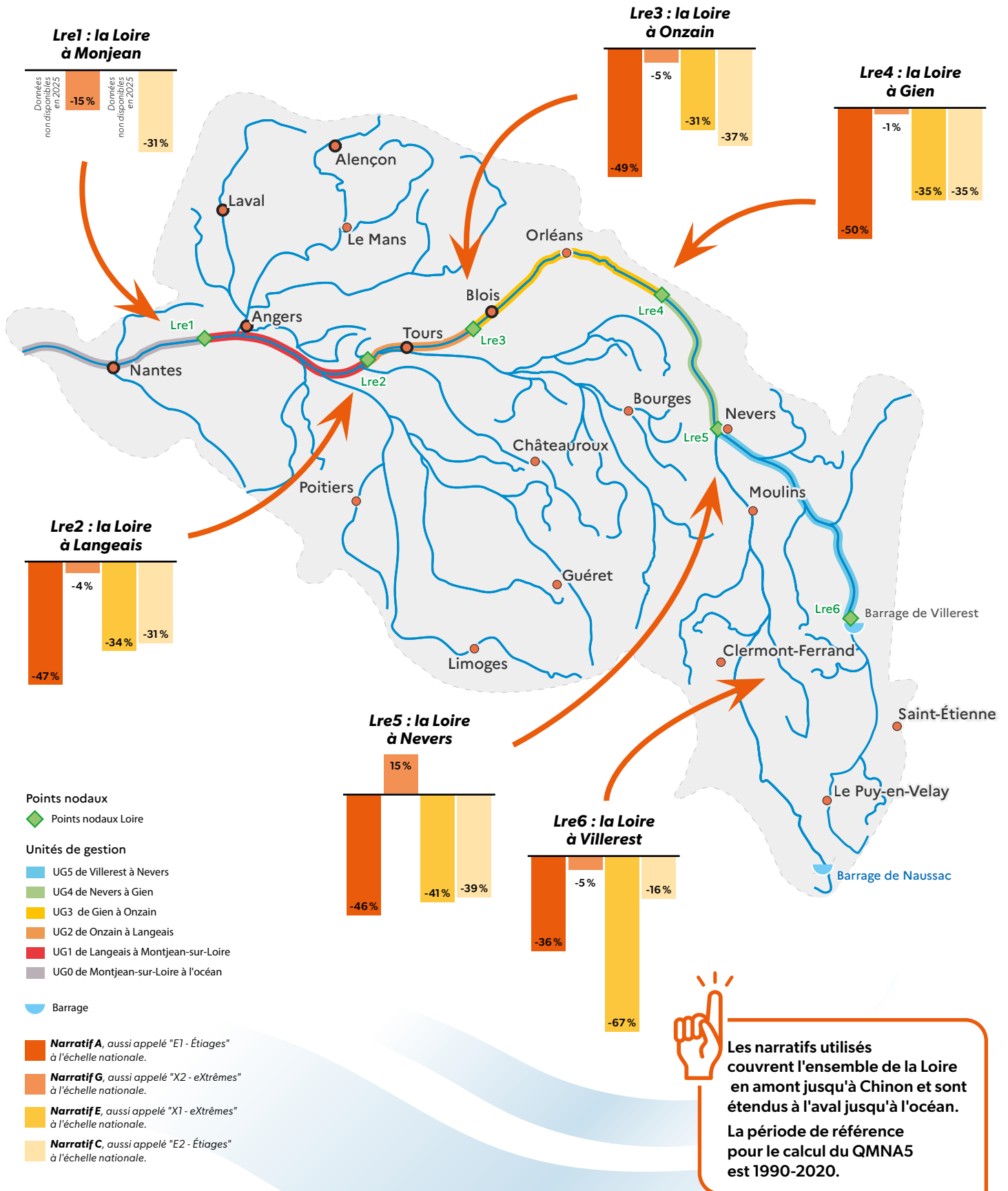
L'étude HMUC Axe Loire a appliqué les scénarios de la TRACC (+2,7°C vers 2050 et +4°C vers 2100) pour anticiper l'évolution future de la Loire. Les résultats combinent modèles climatiques et hydrologiques et permettent de distinguer deux jeux de quatre narratifs.



**Ce que cela signifie pour demain**

- Des débits moyens fluctuants autour des valeurs actuelles : de -15 à +30 % à +2,7°C et de -20 à +25 % à +4°C.
- Des étiages extrêmes plus fréquents et prolongés : jusqu'à -60 % en été et jusqu'à +50 jours/an de basses eaux à +2,7°C, et également +50 jours/an à +4°C.
- Des crues potentiellement plus fortes, mais difficiles à anticiper, avec une forte variabilité selon les secteurs.
- Une ressource en eau sous tension, exigeant une adaptation renforcée.

Plus spécifiquement, la Loire présentera demain, à +4°C, des débits d'étiage plus faibles qu'aujourd'hui. Cette carte illustre l'évolution (en %) des débits mensuels d'étiage qui pourraient être atteints 4 années sur 5 (QMNA5).



Au-delà des chiffres, le changement climatique se traduit déjà dans le fonctionnement du fleuve et dans les usages qui en dépendent. Les observations récentes montrent que les évolutions en cours ne sont pas seulement statistiques : elles se manifestent concrètement sur l'axe Loire.

## 2 Des tensions accrues sur les usages

→ **Baisse des débits en été.**  
Réduction de la disponibilité de la ressource pour :



l'irrigation,



l'alimentation en eau potable,



l'industrie.

## 1 Des étiages plus sévères et plus fréquents

→ **Les basses eaux s'accroissent.**



Certaines sections du fleuve deviennent difficilement navigables.



Les milieux aquatiques sont fragilisés.

## 3 Une variabilité accrue des crues



→ **L'incertitude complique la gestion des crues.**  
Certaines stations signalent :



une intensification des crues,

ou



une stabilité des crues.

## Ce que cela signifie pour les acteurs



→ **Des restrictions d'usages plus fréquentes** en période estivale.

→ **Des milieux naturels plus exposés** aux périodes de stress hydrique.

→ **Une gestion de l'eau à piloter** en tenant compte des incertitudes, avec des choix à ajuster selon les évolutions observées.

Ces résultats sont issus de modèles climatiques et hydrologiques : ils traduisent des tendances probables, mais comportent une part d'incertitude. Les projections ne sont pas des certitudes, mais des repères pour éclairer les décisions.

# Glossaire

**Clustering k-means** : Le clustering K-means (ou classification par centres mobiles) est une méthode non supervisée d'apprentissage automatique (machine learning) utilisée pour regrouper des données similaires en un nombre fixe de groupes appelés clusters.

## EHCLO

**(Exploration Hydro Climatique de la Loire)** : partenariat entre l'INRAE et l'agence de l'eau Loire-Bretagne pour répondre scientifiquement au volet climat de l'étude HMUC axe Loire

**Étiage** : Débit minimal d'un cours d'eau, correspondant à la période de plus basses eaux (souvent l'été), observé lors des sécheresses et caractérisé par un niveau très bas des rivières ou fleuves.

**Explore 2** : projet, porté par Inrae et l'Office International de l'eau (OiEau), qui s'inscrit dans la suite de l'étude Explore 2070 (2010-2012) grâce auquel les acteurs de la recherche, autour du Ministère de l'écologie, avaient établi des premiers scénarios prospectifs de disponibilités des ressources en eau à l'échelle de la France. Ce projet a officiellement été lancé en juillet 2021, cofinancé par les partenaires du projet, le ministère de la Transition écologique (MTE) et l'Office français de la biodiversité (OFB). Objectifs : Actualiser les connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie à partir des dernières publications du Giec, mais aussi accompagner les acteurs des territoires dans la compréhension et l'utilisation de ces résultats pour adapter leurs stratégies de gestion de la ressource en eau.

**Hydrologie** : Science qui étudie le cycle de l'eau, la distribution et la circulation de l'eau sur Terre, incluant les précipitations, l'évaporation, l'écoulement des eaux de surface et souterraines.

## Indicateurs de débit :

- **QA** : débit annuel moyen
- **QMM** : débit mensuel moyen
- **QJXA** : débit journalier maximal annuel
- **VCN10** : valeur de débit minimale calculée sur 10 jours consécutifs
- **Q10, Q15** : débits d'occurrence annuelle de 10 ans, 15 ans, etc.

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

**Narratif** : Ici utilisé pour décrire les champs des possibles de l'évolution hydro-climatiques sur le bassin versant de la Loire

**QMNA5** : Débit moyen mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans. On peut l'exprimer aussi comme : « la probabilité que le débit soit inférieur à cette valeur pendant le mois d'étiage est de 20 % dans une année donnée ».

**Station hydrométrique** : site d'observation installé sur un cours d'eau, un lac ou un plan d'eau, qui permet de mesurer et d'enregistrer en continu différents paramètres relatifs à l'écoulement de l'eau notamment les débits

**Test MANN-KENDALL, PETTITT** : Tests statistiques utilisés pour détecter des tendances (Mann-Kendall) ou des ruptures (Pettitt) dans des séries chronologiques de données hydrologiques.

**TRACC (Trajectoire de Réchauffement de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique)** : pour avancer de manière coordonnée sur le sujet de l'adaptation au changement climatique, la France se dote d'une trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC). Définie à partir du scénario tendanciel selon les scientifiques du GIEC, elle doit servir de référence à toutes les actions d'adaptation menées en France.

## Chaînes de modélisation pour chaque narraTRACC :

### X1 – eXtrêmes (correspond au narratif E)

GCM IPSL-CM5A-MR | RCM HIRHAM5 | HM MORDOR-TS  
Débits plutôt à la hausse et extrêmes plus sévères encore plus marqués sur les étiages

### X2 – eXtrêmes (correspond au narratif G)

GCM CNRM-CM5 | RCM ALADIN63 | HM EROS  
Débits plutôt à la hausse et extrêmes plus sévères

### E1 – Étiages (correspond au narratif A)

GCM HadGEM2-ES | RCM CCLM4-8-17 | HM MORDOR-TS  
Débits annuels en baisse, crues légèrement moins prononcées et étiages beaucoup plus sévères

### E2 – Étiages (correspond au narratif C)

GCM NorESM1-M | RCM WRF381P | HM SMASH  
Débits plutôt à la baisse, crues légèrement moins prononcées et étiages plus sévères


**UG** : Unité de gestion permettant de découper le territoire pour faciliter l'analyse et de représenter des résultats à une échelle adaptée aux enjeux.



[contact@eau-loire-bretagne.fr](mailto:contact@eau-loire-bretagne.fr)

Rédaction : agence de l'eau Loire-Bretagne, Antea Group, INRAE, Women-and-Men

Illustrations : Établissement Public Loire, bigbang, Women-and-Men

Création et réalisation :  women-and-men.com

Décembre 2025