



Hmuc

AXE LOIRE

MÉTHODOLOGIE

4 DIMENSIONS POUR UN DIAGNOSTIC GLOBAL DU TERRITOIRE

Hydrologie, Milieux, Usages, Climat... un quatuor indissociable au cœur des analyses HMUC. Elles constituent le socle de base pour bien comprendre les enjeux d'aujourd'hui et de demain en matière de gestion quantitative de la ressource en eau. Cette démarche collaborative, fondée sur un protocole scientifique rigoureux, doit permettre de définir un constat partagé des prélèvements d'eau équilibrés et durables.

Les études HMUC permettent d'éclairer la décision publique et offrent l'opportunité aux acteurs de l'eau de construire en concertation une politique locale de gestion de la ressource en eau équilibrée, solidaire et durable.

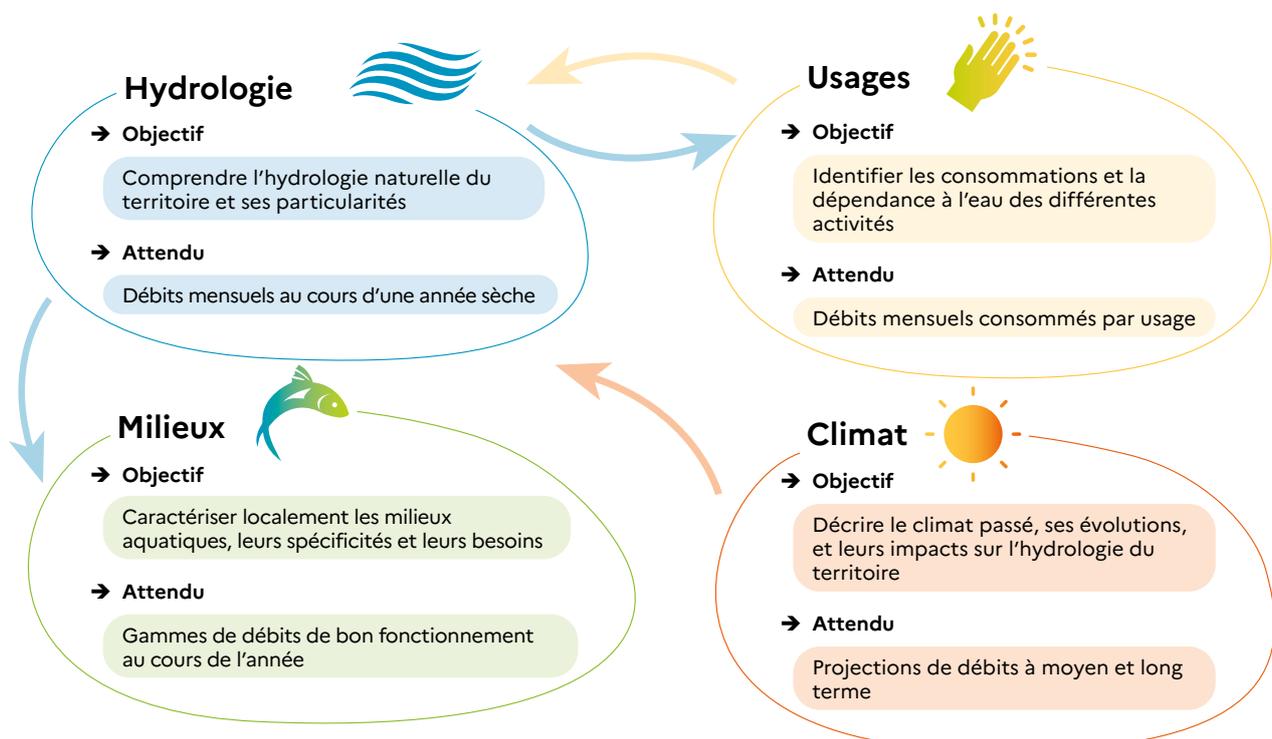
COMMENT SE DÉROULE UNE ANALYSE HMUC ?



1. ANTICIPER LA DÉMARCHE ET MIEUX SE PRÉPARER

- Établir une feuille de route pour définir collectivement :
 - les attentes et les objectifs,
 - l'organisation et les points de validations
- Rédiger un cahier des charges définissant les étapes, les échéances, les risques potentiels et les missions.

2. ÉTABLIR LE DIAGNOSTIC ENVIRONNEMENTAL DU TERRITOIRE



3. PARTAGER LE DIAGNOSTIC

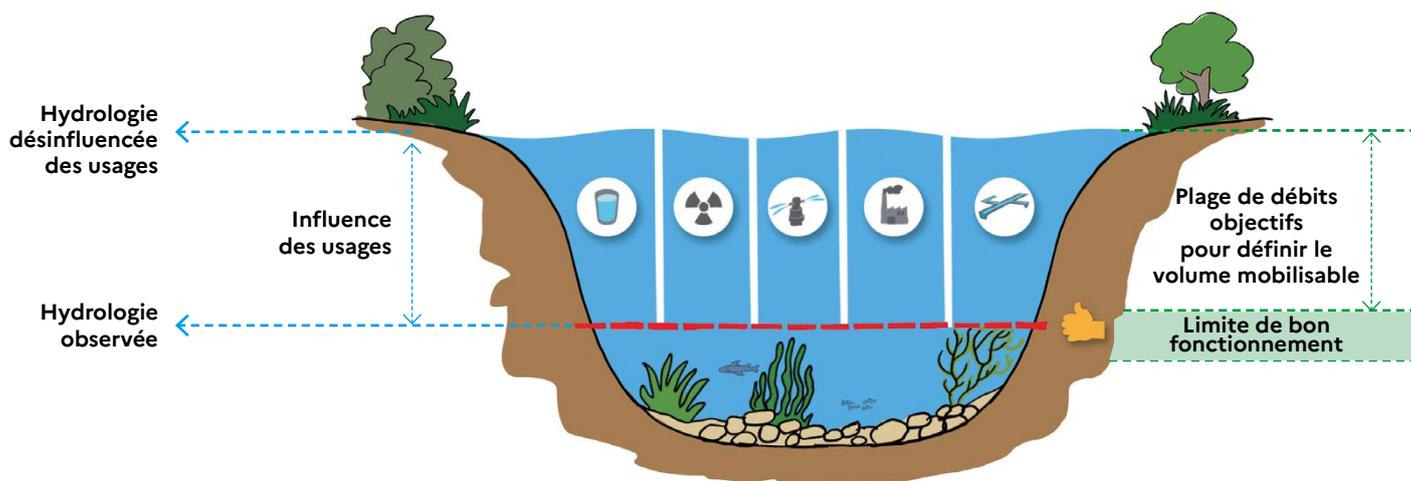
Croiser les résultats des 4 volets thématiques

→ **Objectif**

Définir les conditions de débits répondant aux ambitions de bon fonctionnement des milieux aquatiques

→ **Attendu**

Plage de débits objectifs mensuels (valeurs de débit possibles)



4 et 5. DÉCIDER ET AGIR

→ Définir un débit objectif et des volumes prélevables à répartir entre les usagers.

→ Co-construire un programme d'actions pour atteindre les objectifs de préservation des milieux aquatiques, sources des usages.

SPÉCIFICITÉ DE L'ÉTUDE HMUC AXE LOIRE

Ces dernières années, la Loire a connu des épisodes de sécheresse d'une intensité inédite. Dans un contexte de dérèglement climatique, la gestion de son eau devient un enjeu majeur, exigeant des réponses adaptées et innovantes.

C'est dans ce contexte que l'agence de l'eau Loire-Bretagne, mandatée par le comité de bassin, pilote une étude Hydrologie, Milieux, Usages, Climat (HMUC), ainsi qu'une analyse de cohérence de la gestion de l'eau à l'échelle du bassin de la Loire.

Objectif : mieux comprendre les interactions entre hydrologie, milieux naturels, usages humains et climat, pour adapter la gestion de l'eau à chaque saison.

Trois volets structurent l'étude :



Réaliser une analyse HMUC sur l'axe Loire « réalimenté » non couvert par une démarche de même type.



Évaluer la cohérence des démarches HMUC sur l'ensemble du bassin.



Définir une politique partagée de gestion de l'eau sur l'axe Loire.

Sur 3 ans, l'étude visera à proposer des solutions concrètes : volumes prélevables par saison, mesures en période de crise, etc.

Des réunions et ateliers jalonnent le projet, pour construire collectivement une gestion durable et équitable de l'eau.



LA SECTORISATION DU BASSIN DE LA LOIRE : UNE CLÉ DE LECTURE TERRITORIALE

Pour mener l'étude HMUC Axe Loire, le territoire a été découpé en unités de gestion (UG). Ces UG constitueront le périmètre d'analyse pour chaque volet de l'étude : hydrologie, milieux, usages et climat.

DÉFINIR DES UNITÉS DE GESTION COHÉRENTES

CHAQUE UNITÉ DE GESTION A ÉTÉ DÉFINIE SELON PLUSIEURS CRITÈRES :

→ Une logique de gestion de l'eau

Elles s'appuient sur les découpages déjà utilisés pour la gestion quantitative, notamment les points nodaux (stations hydrométriques de référence).

→ Une cohérence naturelle

Le découpage respecte la logique hydrologique et hydrogéologique du bassin (cours d'eau et nappes souterraines).

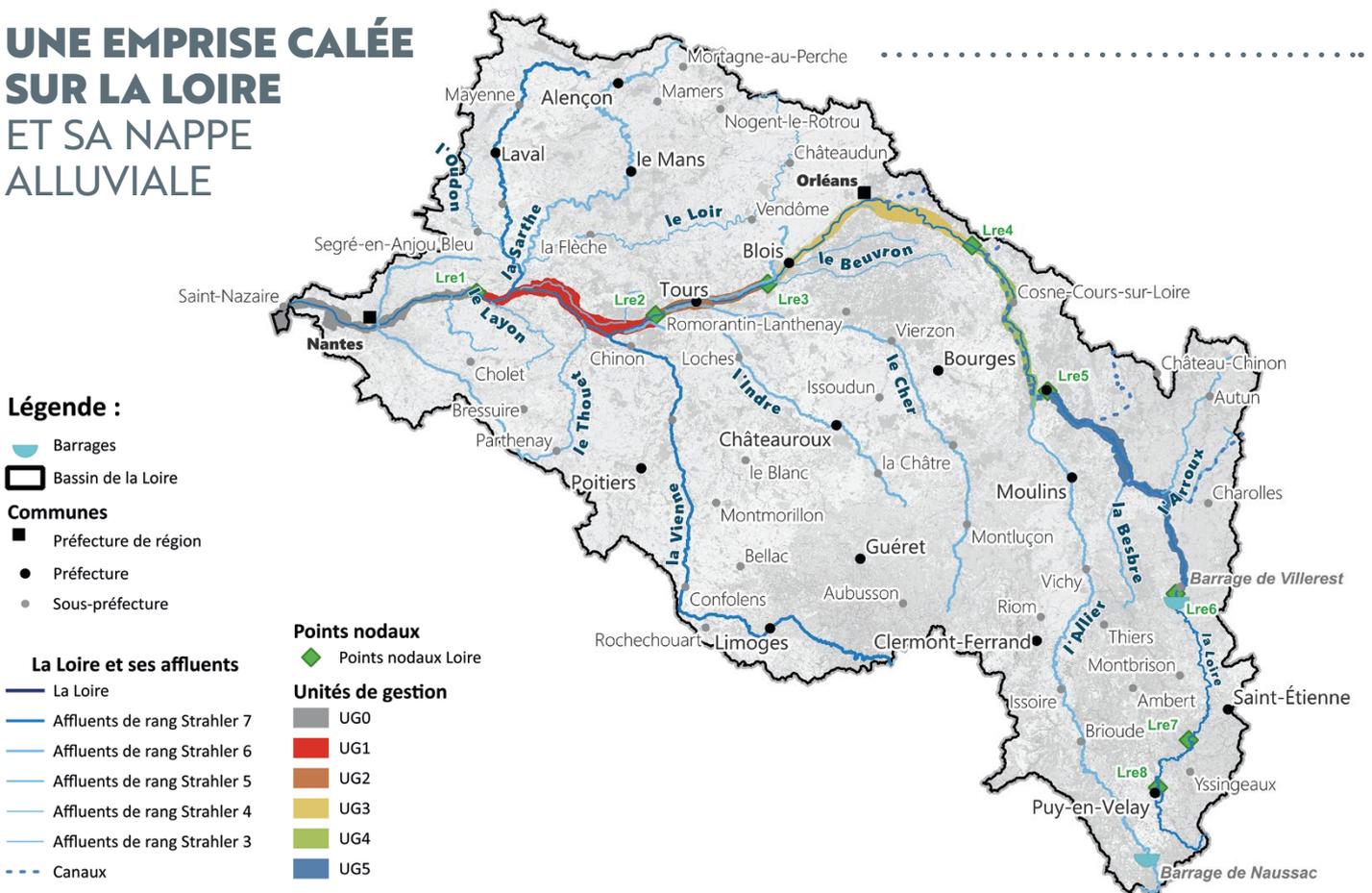
→ Une faisabilité technique

Les UG tiennent compte de la disponibilité des données sur l'eau (stations, piézomètres), ce qui facilite la production d'indicateurs fiables.

→ Une pertinence locale

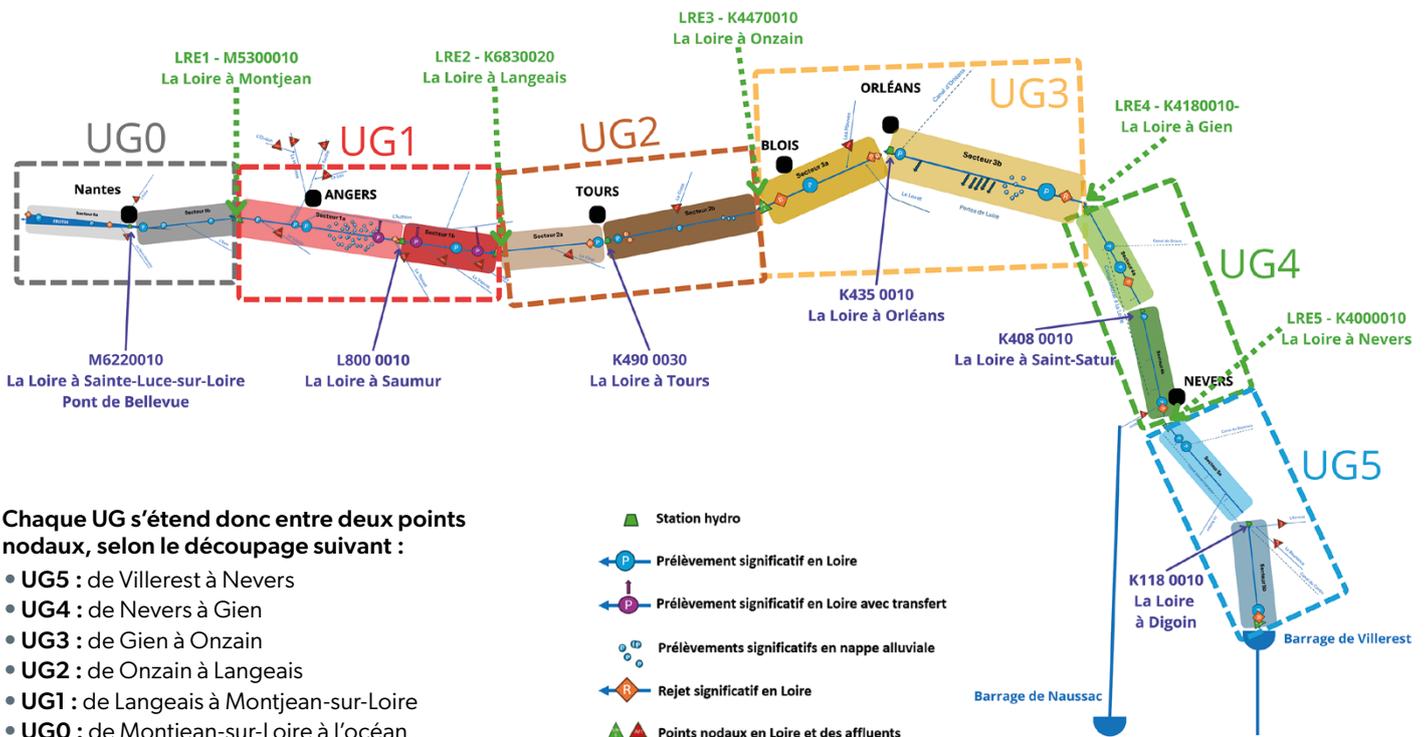
Elles prennent en compte les enjeux et usages propres à chaque secteur, pour garantir des résultats adaptés au terrain.

UNE EMPRISE CALÉE SUR LA LOIRE ET SA NAPPE ALLUVIALE



Le périmètre de l'étude s'étend de l'aval du barrage de Villerest jusqu'à l'océan, en suivant l'axe de la Loire réalimentée et sa zone alluviale.

La limite latérale des UG correspond à la nappe alluviale telle que définie dans le référentiel national BDLISA (Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères).



APPROFONDIR L'ANALYSE AVEC DES SOUS-SECTEURS

Si les UG constituent l'échelle principale d'analyse, elles sont complétées par des sous-secteurs, plus fins. Pourquoi ce découpage supplémentaire ?

- **Pour mieux prendre en compte les spécificités locales**, qui peuvent varier au sein d'une même UG (par exemple, des différences de pression sur la ressource ou de types d'usage).
- **Pour approfondir la connaissance** du territoire et affiner les diagnostics.
- **Pour mieux analyser** la cohérence des politiques de gestion de l'eau à une échelle locale.

TENIR COMPTE DES USAGES ET DE LA RESSOURCE

Ce découpage permet de cartographier plus finement :

- **Les rejets dans le milieu**, notamment issus des stations d'épuration (collectives ou industrielles),
- **Les prélèvements dans la ressource**, qu'elle soit de surface ou souterraine.

Ce découpage ne se limite pas à l'aspect administratif : il s'appuie sur des données hydrologiques fiables, essentielles pour croiser usages et fonctionnement de la ressource.

Chaque unité de gestion est ainsi divisée en deux sous-secteurs pour allier précision technique et connaissance locale.

Ce découpage plus fin n'a aucun objectif réglementaire. L'ensemble des décisions de gestion (débits objectifs d'étiage et volumes prélevables) seront prises à l'échelle des 6 UG

MÉTHODES ET OUTILS MOBILISÉS



Pour définir les unités de gestion et les sous-secteurs, l'étude s'est appuyée sur les supports suivants :

- **Les points nodaux** : stations hydrométriques de référence servant de bornes entre unités,
- **La nappe alluviale de la Loire**, identifiée à partir du référentiel national BDLISA,
- **Les données disponibles** sur les débits de rivières et les niveaux des nappes,
- **Les enjeux locaux** : usages de l'eau, rejets, contraintes territoriales,
- **Un croisement** entre logique physique (hydrologie/hydrogéologie) et logique d'usage (gestion quantitative).



ÉTAT ACTUEL, INFLUENCES HUMAINES ET FONCTIONNEMENT NATUREL

L'analyse de l'hydrologie et de l'hydrogéologie de la Loire est la première étape de l'étude HMUC Axe Loire. Elle permet de comprendre comment la ressource en eau fonctionne et quelle est sa capacité, pour ensuite la confronter aux effets du changement climatique et aux besoins des usagers. Pour cela, une méthodologie en quatre temps a été déployée : observer les régimes actuels, reconstituer un état naturel, évaluer le rôle des barrages et analyser les échanges entre rivière et nappe.

1 OBSERVER L'EAU TELLE QU'ELLE CIRCULE AUJOURD'HUI

La première étape consiste à analyser les données historiques de la Loire, de 2000 à 2022, pour comprendre le fonctionnement actuel des cours d'eau et des nappes souterraines. L'analyse s'appuie sur des stations de mesure sélectionnées selon plusieurs critères : leur répartition géographique (chaque unité de gestion dispose d'une station à l'amont et à l'aval), la disponibilité et la fiabilité des données.

→ Pour les rivières

L'étude utilise les données recueillies dans des stations réparties le long de la Loire. Ces stations mesurent la quantité d'eau qui s'écoule chaque jour, ce qui permet de comprendre le comportement du fleuve selon les saisons et les années.

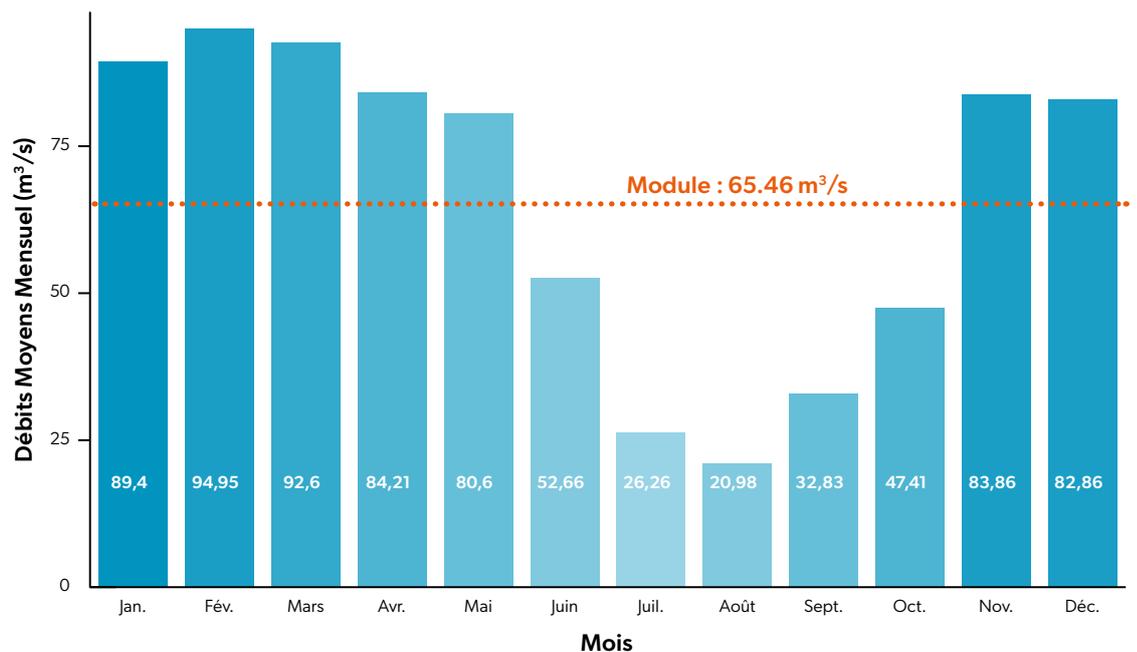
→ Pour les nappes souterraines

Les niveaux d'eau ont été suivis sur plus de 20 ans, pour repérer les périodes où elles se remplissent ou se vident, et voir si ces évolutions changent dans le temps.

→ Des indicateurs ont été calculés

Pour décrire le fonctionnement de l'eau, comme les débits moyens ou les périodes de basses eaux (étiages), ils permettent d'identifier des tendances et d'anticiper les situations critiques, comme les sécheresses.

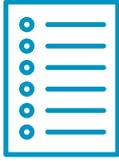
La Loire à Villerest
Aval : [K091001010]
Évolution des Débits Moyens Mensuels interannuels (QMM) et du module (QA) sur la période [1921-2022].



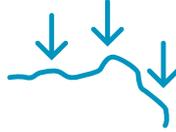
Cette phase correspond à une « hydro(géo)logie mesurée », c'est-à-dire déjà influencée par les activités humaines (prélèvements, transferts, rejets), indispensable pour poser une base de compréhension solide.

2 RECONSTITUER L'ÉTAT "NATUREL" DES COURS D'EAU

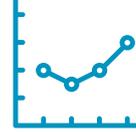
Les mesures actuelles de débit sont influencées par les activités humaines : prélèvements pour l'eau potable, l'irrigation ou l'industrie, mais aussi rejets d'eaux usées. Pour mieux comprendre comment la Loire fonctionnerait sans ces interventions, l'étude a reconstitué des débits dits "naturels".



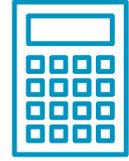
Un inventaire précis
des volumes d'eau utilisés ou rejetés pour chaque usage (eau potable, irrigation, industrie, etc.)



Un rattachement géographique
de chaque prélèvement ou rejet à son unité de gestion sur le bassin de la Loire



Un calcul journalier
des volumes concernés, pour ajuster les mesures au plus près du terrain



Une méthode de calcul simple*
Les débits renaturalisés sont obtenus en ajoutant aux débits mesurés les volumes prélevés, et en retranchant les rejets.

$$* Q_{\text{Renaturalisés}} = Q_{\text{Mesurés}} + \sum \text{Prélèvements} - \sum \text{Rejets}$$

3 ÉVALUER LE RÔLE DES BARRAGES

Les barrages de Naussac et Villerest libèrent de l'eau en été pour maintenir un débit minimal dans la Loire, notamment en période de sécheresse. Pour mesurer l'impact réel de ce soutien, l'étude a testé quatre scénarios complémentaires, combinant la présence ou non des barrages et l'influence des usages humains (prélèvements, rejets).

→ Scénario A

Situation entre les débits mesurés et les volumes réellement libérés par les barrages – pour quantifier leur contribution.

→ Scénario B

Simulation de la situation actuelle sans intervention des barrages, mais avec les usages d'eau tels qu'ils existent aujourd'hui.

→ Scénario C

Situation avec barrages mais dans un environnement où aucune activité humaine n'influence les débits.

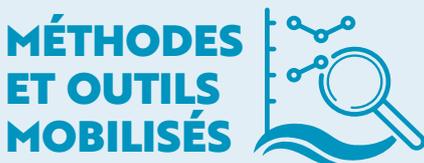
→ Scénario D

Cas "zéro influence" : ni barrages, ni usages humains – pour observer le fonctionnement entièrement naturel du bassin.

	Avec $Q_{\text{Soutien d'étiage}}$	Sans $Q_{\text{Soutien d'étiage}}$
$Q_{\text{Mesurés}}$	A $Q_{\text{Mesurés}}$ (inclut le soutien d'étiage)	B $Q_{\text{Mesurés}} - Q_{\text{Soutien d'étiage}}$
$Q_{\text{Renaturalisés}}$	C $Q_{\text{Renaturalisés}}$ (inclut le soutien d'étiage)	D $Q_{\text{Renaturalisés}} - Q_{\text{Soutien d'étiage}}$

4 ANALYSER LES ÉCHANGES ENTRE NAPPE ET RIVIÈRE

Enfin, l'étude a intégré une analyse des échanges entre la nappe alluviale (eau souterraine) et la Loire. Cette approche aide à estimer quelle part de l'eau de surface provient de la nappe, pour mieux piloter l'usage de la ressource.



L'étude s'est appuyée sur des méthodes statistiques et des outils de modélisation reconnus.

- **Tests statistiques (Mann-Kendall, Pettitt)** pour repérer des tendances dans les niveaux des nappes.
- **Indicateurs hydrologiques :** débits moyens, jours sous seuil, QMNA, VCNx, Q10, Q15, etc.
- **Modèle MORDOR-TS** pour valider les résultats.
- **Méthode arithmétique** pour simuler les débits sans intervention humaine.

COMPRENDRE LES BESOINS DU VIVANT POUR MIEUX ADAPTER LES DÉBITS

Le volet « Milieux » de l'étude HMUC Axe Loire s'intéresse à la façon dont les milieux aquatiques réagissent aux variations de débit, saison après saison.

L'objectif : identifier les débits de bon fonctionnement, c'est-à-dire ceux qui permettent aux espèces et aux habitats de se maintenir en bon état, dans le contexte spécifique de la Loire.

Cette démarche, élaborée avec un groupe d'experts, repose sur des protocoles opérationnels déployés sur tout l'axe Loire, qu'il soit fluvial (UG1 à UG5) ou estuarien (UG0). Elle prend en compte l'ensemble du cycle hydrologique, avec une attention particulière portée aux périodes sensibles comme l'étiage.

DES DÉBITS ADAPTÉS AUX BESOINS DU MILIEU

On parle ici de débits biologiques, mais surtout de débits de bon fonctionnement. Ce sont des débits qui permettent aux milieux naturels de respirer, de se régénérer, de rester vivants — en prenant en compte toutes les saisons, pas

uniquement les périodes de sécheresse. Contrairement à une simple valeur seuil, ces débits s'accompagnent d'autres indicateurs : durées, fréquences, températures... car le vivant réagit à un ensemble de conditions, pas à un chiffre

Débit de bon fonctionnement (E-FLOWS)

Débit écologique

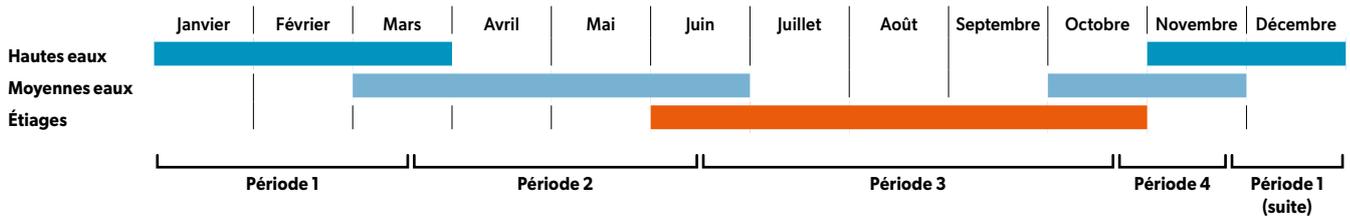
Objectifs complémentaires, physico-chimiques, morphologiques...

Débit biologique

Besoin en eau des communautés vivantes (hauteur, vitesse, fréquence)

Relation simplifiée entre les différents types de débits concourant au bon état des eaux

UNE APPROCHE SAISONNIÈRE



Le fonctionnement de la Loire et des milieux naturels change au fil des saisons.

C'est pourquoi l'étude s'intéresse à l'ensemble de l'année, en distinguant quatre grandes périodes :

- **L'hiver**, quand les niveaux d'eau sont généralement hauts,
- **Le printemps et l'automne**, périodes de transition,
- **L'été**, marqué par des niveaux très bas (étiage).

Chaque période a ses enjeux : reproduction des poissons, déplacement des espèces, accès aux zones de refuge ou de repos...

Les protocoles sont donc adaptés à chaque saison et à chaque secteur étudié. Leur durée peut varier d'une zone à l'autre, selon les espèces présentes ou les particularités locales (par exemple, le temps nécessaire au saumon pour migrer entre l'amont et l'aval).

DES FONCTIONNALITÉS ÉCOLOGIQUES À PRÉSERVER

Les protocoles permettent d'évaluer différents paramètres essentiels au bon état écologique :

- | | | | | | |
|---|---|--|---|---|---|
| → Dans l'estuaire :
Les apports d'eau douce nécessaires à la qualité de l'eau (taux d'oxygène, turbidité) et la position des zones de salinité. | → La circulation des espèces :
Vérifier que certaines espèces peuvent franchir les obstacles à chaque saison. | → Les habitats :
Analyser si les espèces trouvent encore les zones où elles se reproduisent, se nourrissent ou se reposent, notamment en période de stress hydrique. | → La connectivité :
Évaluer si les annexes (zones de reproduction, abritées ou de repos) sont suffisamment reliées à la Loire, et à quelle fréquence. | → Les sédiments :
Étudier la capacité du fleuve à transporter les matériaux (sable, graviers...) qui façonnent son lit. | → Les périodes de migration :
Observer le lien entre température et débit pour les espèces migratrices. |
|---|---|--|---|---|---|

UN TRAVAIL PRÉPARATOIRE INDISPENSABLE

Pour ce volet, l'agence de l'eau Loire-Bretagne a réalisé un important travail préparatoire, accompagnée par un groupe d'experts interdisciplinaires, afin d'imaginer des **protocoles adaptés aux spécificités** du contexte ligérien et de son estuaire.

Les protocoles présentés sont des propositions issues de ce premier travail et sont susceptibles d'évoluer.

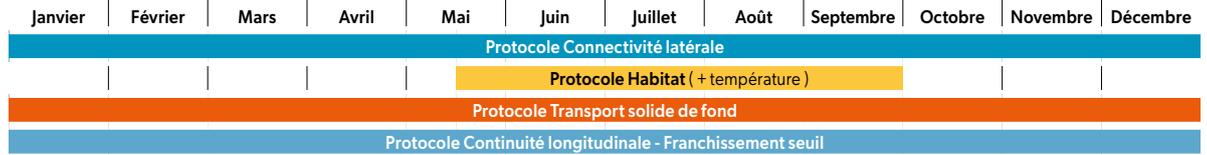
MÉTHODES ET OUTILS MOBILISÉS



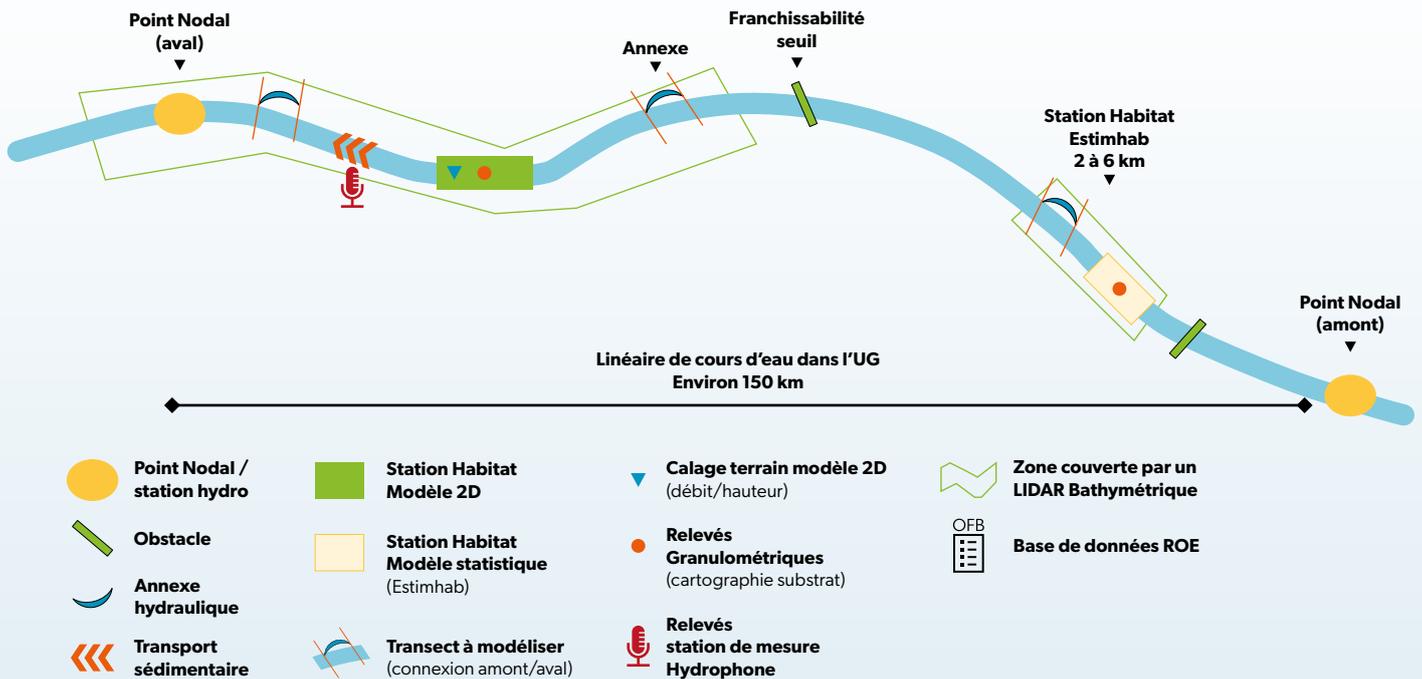
- **Définition collective des protocoles**, en lien avec un groupe d'experts et l'agence de l'eau.
- **Approche différenciée** entre le fleuve (UG1 à UG5) et l'estuaire (UG0), avec un secteur de transition (UG0b).
- **Évaluation par période saisonnière** : hiver, printemps, été, automne.
- **Outils mobilisés :**
 - Plateforme HABBY pour évaluer les habitats en lien avec le débit,
 - Indicateurs de connectivité latérale : fréquence et durée des connexions avec les annexes,
 - Calcul du transport sédimentaire,
 - Analyse débit-température pour les migrations.

SYNTHÈSE DES PROPOSITIONS DE PROTOCOLES - VOLET MILIEUX PARTIE FLUVIALE UGOB À UGIO

Répartition temporelle d'application des protocoles

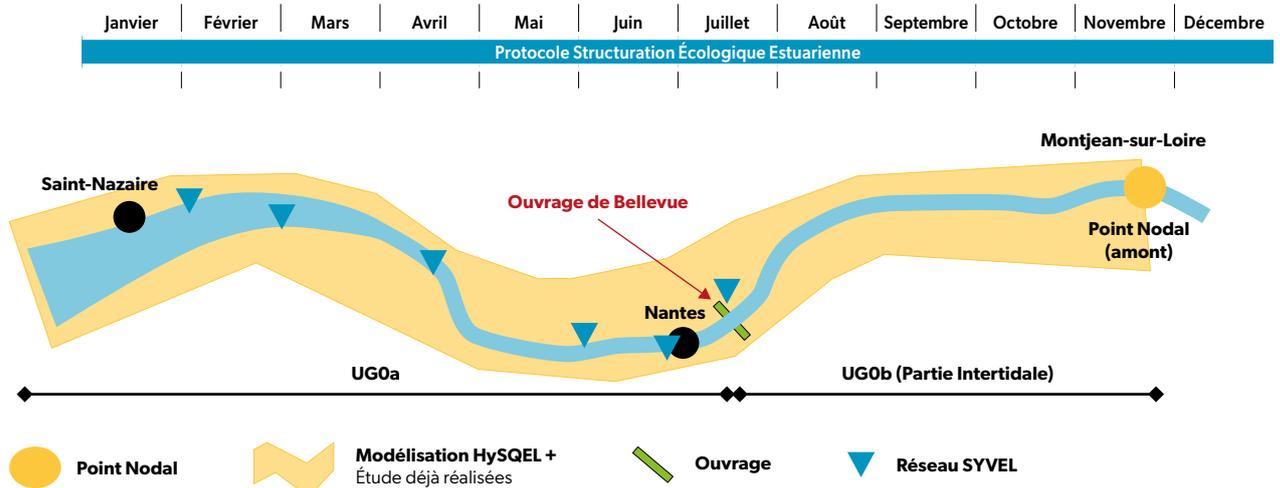


Représentation schématique des éléments du volet Milieux



SYNTHÈSE DES PROPOSITIONS DE PROTOCOLES - VOLET MILIEUX PARTIE ESTUAIRE UGOA

Répartition spatiale et temporelle d'application des protocoles



CE QUE L'ON PRÉLÈVE ET CE QUE L'ON REND À LA LOIRE

Pour comprendre l'équilibre entre besoins et ressources en eau, il faut d'abord savoir combien d'eau est prélevée et combien est restituée. C'est l'enjeu du volet "Usages" de l'étude HMUC Axe Loire. Ces données sont essentielles pour renaturaliser les débits mesurés, autrement dit simuler le fonctionnement de la Loire sans intervention humaine. Elles permettent aussi d'analyser l'évolution des usages et d'affiner les projections futures.

CETTE ANALYSE REPOSE SUR DEUX GRANDES ÉTAPES :

- ➔ **Mesurer les volumes réellement mobilisés** pour chaque type d'usage (alimentation en eau potable, irrigation, industrie, navigation, etc.)
- ➔ **Comprendre l'évolution de ces usages** dans le temps pour affiner les projections et mieux intégrer ces données dans les autres volets de l'étude, notamment l'hydrologie.

L'OBJECTIF :

Si les données journalières ne sont pas disponibles, transformer des données mensuelles ou annuelles en volumes journaliers utilisables dans les analyses hydrologiques. Cela permet d'avoir une vision plus fine et réaliste des usages, adaptée à la démarche HMUC, à l'échelle de chaque unité de gestion.

Référentiel de base

- Points géolocalisés
- Communes
- Surfaces

Deux types de volumes d'eau :

- ➔ **Volumes collectés**
Annuels/Mensuels
- ➔ **Volumes reconstitués**
Hypothèses spécifiques à chaque usage

Hypothèse de ventilation des volumes

en fonction de la période de l'année

Chroniques journalières

- ➔ Renaturalisation Volet Hydro
- ➔ Agrégation et analyse à l'échelle des unités de gestion cohérente

COMMENT L'EAU PRÉLEVÉE EST-ELLE UTILISÉE ?

Eau potable

Les données sur les prélèvements en eau potable ont été croisées entre plusieurs sources :

agence de l'eau, agences régionales de santé (ARS) et collectivités locales. Cette base permet d'avoir une photographie claire des volumes utilisés par territoire.



Industrie

Les volumes d'eau prélevés par les sites industriels ont été reconstitués à partir des bases de données existantes

(agence de l'eau, IREP). La méthode tient compte du rythme d'activité (jours ouvrés, saisonnalité).



Irrigation

Les usages agricoles dépendent fortement des saisons. L'étude distingue donc les volumes mobilisés pendant la période d'irrigation (printemps-été) de ceux utilisés en hiver, grâce à des estimations mensuelles basées sur des référentiels de gestion collective et des données des Directions Départementales des Territoires (DDT).



Navigation

Pour la navigation, seules certaines prises d'eau, comme celles de Roanne et de Briare, sont concernées sur le périmètre d'étude.

Les données, issues de Voies Navigables de France, permettent de suivre les volumes prélevés, quotidiennement ou mensuellement selon les sites.



Énergie

Les volumes d'eau utilisés pour la production d'énergie ont été recueillis auprès d'EDF, d'Engie et de l'agence de l'eau.

Ces données sont agrégées pour obtenir des chroniques journalières ou mensuelles, en fonction des disponibilités.



Abreuvement des animaux

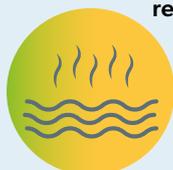
Ce type de prélèvement, moins documenté, a fait l'objet d'une reconstitution basée sur des données agricoles (nombre d'animaux par secteur, besoins estimés par espèce).



Évaporation

Les pertes d'eau par évaporation sur les plans d'eau ont également été prises en compte, car elles représentent une forme "d'usage" indirect.

La méthode repose sur un calcul de bilan hydrique journalier.



COMMENT L'EAU REVIENT-ELLE AU MILIEU NATUREL ?

L'étude s'intéresse aussi aux volumes d'eau restitués dans le milieu naturel, principalement via les réseaux d'assainissement.



Assainissement collectif

Les données sur les rejets des stations d'épuration ont été analysées pour chaque unité de gestion. Deux méthodes ont été mobilisées : soit à partir de mesures mensuelles, soit en estimant les volumes à partir de la capacité des stations.

Assainissement individuel

Les volumes rejetés par les logements en ANC, à savoir en Assainissement Non Collectif (qui traitent leurs eaux usées sur place via fosse toutes eaux, filtre à sable, micro-station, etc), ont été estimés à l'échelle communale, en tenant compte de la part effectivement restituée au milieu naturel selon les saisons.



Rejets industriels

Pour estimer les rejets liés aux activités industrielles, plusieurs sources sont croisées : les déclarations d'émissions polluantes, les données de suivi des installations classées et les résultats d'autosurveillance transmis à l'agence de l'eau. À ce stade, plusieurs méthodes sont envisagées : utiliser les données disponibles, extrapoler à partir de moyennes récentes, ou appliquer des coefficients de restitution selon les secteurs d'activité. Des extractions ciblées peuvent aussi être demandées pour compléter les informations manquantes.

MÉTHODES ET OUTILS MOBILISÉS



- **Croisement de données multi-sources** : agence de l'eau, ARS, DDT, BRGM, UGC, organismes agricoles, Voies Navigables de France, EDF, ENGIE, IREP, GIDAF...
- **Construction de référentiels géolocalisés** des usages à l'échelle des unités de gestion.
- **Reconstitution chronologique** des volumes à partir de données mesurées ou estimées (journalier, mensuel, annuel).
- **Modélisation de l'évaporation** via un bilan hydrique journalier (modèle SAFRAN).
- **Méthodes spécifiques** selon les usages (par exemple : distribution mensuelle type pour l'irrigation, estimation via population et logement pour l'ANC).
- **Prise en compte des coefficients de restitution** selon le type de rejet et la période de l'année.

QUELS SCÉNARIOS POUR LA RESSOURCE EN EAU À L'HORIZON 2100 ?

Comprendre les effets du changement climatique sur l'eau est essentiel pour anticiper et planifier les usages à long terme. Dans le cadre de l'étude HMUC Axe Loire, le volet climat a été confié à l'INRAE, en partenariat avec l'agence de l'eau Loire-Bretagne, à travers le projet EHCLLO (Exploration Hydro-Climatique de la Loire).
L'objectif ? Construire des scénarios d'évolution du climat et de la ressource en eau sur l'axe Loire tout au long du XXI^e siècle, pour accompagner les territoires dans leurs décisions.

COMPRENDRE L'ÉVOLUTION PASSÉE

Une première étape a consisté à analyser les 60 dernières années de données climatiques et hydrologiques sur le bassin de la Loire. Cela a permis de dégager les tendances suivantes :

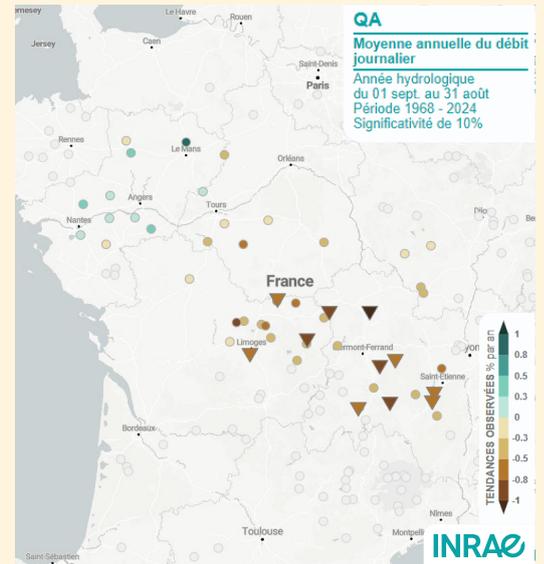


EXPLORER LES FUTURS POSSIBLES

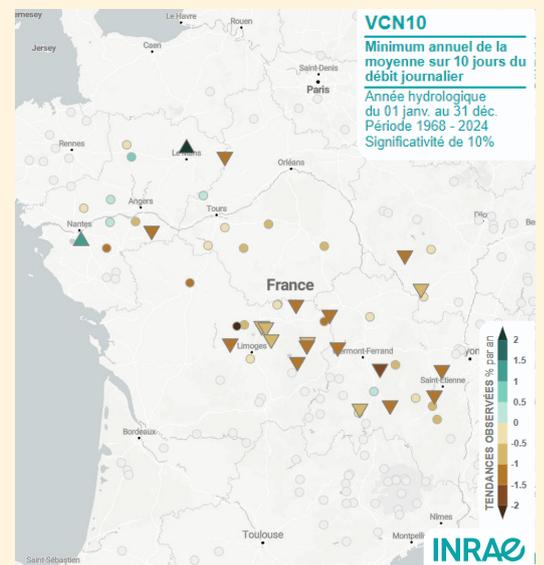
Pour simuler les effets du changement climatique sur les régimes d'eau à venir, des projections ont été réalisées à **3 horizons temporels** :



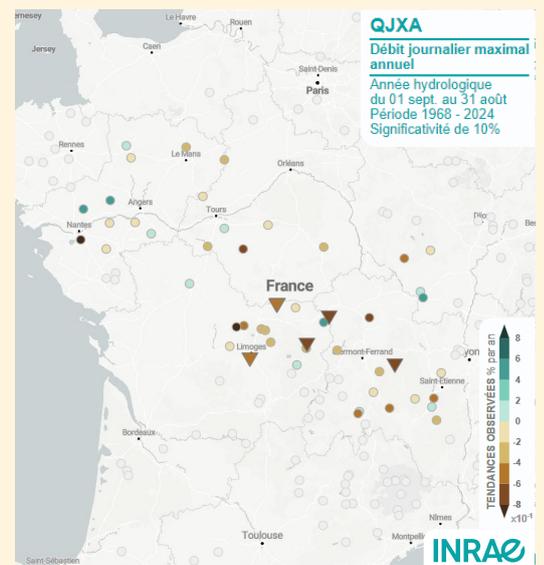
Ces projections s'appuient sur des modèles hydrologiques croisés avec des scénarios climatiques afin de voir comment les hautes, moyennes et basses eaux pourraient évoluer.



Tendance significative à la baisse pour l'amont et le centre du bassin.



Tendance significative à la baisse pour l'amont et le centre du bassin avec quelques singularités à l'aval.



Baisse à l'amont et au centre du bassin mais moins marquée que pour les bas débits et les débits moyens.

Légende :
 ○ Tendance non significative
 △ hausse significative
 ▽ Baisse significative

LES GRANDES TENDANCES IDENTIFIÉES :

Hauts débits (CRUES)



- ❓ Résultats très variables selon les scénarios et les modèles.
- ↗ L'intensité des crues pourrait fortement augmenter, mais avec une grande incertitude.

Moyens débits



- ↘ Une diminution progressive sur l'ensemble du siècle, plus marquée à l'amont.
- ❓ La baisse est assez homogène sur l'axe Loire, mais dépend fortement du scénario climatique.

Bas débits (ÉTIAGES)



- ↘ Une forte diminution des débits en été, sur tout le linéaire.
- ! La sévérité des étiages s'aggrave dans tous les scénarios.

CONSTRUIRE DES SCÉNARIOS NARRATIFS

Pour rendre ces projections plus concrètes et utiles à l'échelle locale, l'étude a développé une méthode de "narratifs hydro-climatiques".

Ces narratifs permettent de regrouper les simulations en scénarios contrastés, utiles pour explorer différents futurs possibles.

La méthodologie repose sur :

- La sélection de stations représentatives sur le bassin de la Loire,
- Le choix d'un horizon temporel commun (30 ans ou basé sur un niveau de réchauffement),
- L'identification d'indicateurs clés : débit moyen, crues, étiages,
- Une méthode de regroupement des résultats pour définir quatre grands scénarios.

LES QUATRE NARRATIFS HYDRO-CLIMATIQUES

Narratif A

Débits réduits et étiages extrêmes

- ➔ Forte baisse des débits moyens, étiages sévères, pression forte en été, notamment à l'amont.



Narratif B

Intensification des extrêmes

- ➔ Crues plus intenses, basses eaux plus faibles et variabilité accentuée d'année en année.



Narratif C

Débits en hausse et crues plus intenses

- ➔ Hausse du débit moyen et augmentation des crues, mais impact modéré sur les étiages.



Narratif D

Changements modérés avec une tendance à la baisse

- ➔ Légère diminution générale, mais avec un renforcement des basses eaux et peu d'évolution sur les crues.



TRAJECTOIRE D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Ce travail s'inscrit dans le cadre du Plan national d'adaptation au changement climatique.

Les narratifs doivent permettre aux territoires de réfléchir dès maintenant à l'adaptation de leurs usages de l'eau, en tenant compte de scénarios compatibles avec les hausses de température anticipées :

- +2°C en 2030,
- +2,7°C en 2050,
- +4°C en 2100 (par rapport à l'ère préindustrielle).

MÉTHODES ET OUTILS MOBILISÉS



L'étude climat s'appuie sur une combinaison d'analyses historiques, de modélisations climatiques et hydrologiques, et d'outils statistiques

- **Analyse des données passées** sur le climat et les débits de la Loire (60 ans de recul).
- **Modèles climatiques nationaux** issus du projet Explore 2, croisés avec les caractéristiques du bassin.
- **Modèles hydrologiques** pour simuler l'évolution des débits futurs selon différents scénarios.
- **Construction de narratifs hydro-climatiques** via une méthode de regroupement statistique (clustering k-means).
- **Indicateurs clés utilisés** : **QA** (débit moyen annuel), **QJXA** (débit de crue), **VCN10** (débit d'étiage sévère)
- **Horizon temporel structuré** en 3 périodes : 2021-2050, 2041-2070, 2070-2099.

GLOSSAIRE

ANC (Assainissement Non Collectif) : Système d'assainissement des eaux usées domestiques non raccordé à un réseau collectif, utilisé principalement dans les zones rurales ou isolées.

ARS : Agence Régionale de Santé

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

E-FLOWS : débits de bon fonctionnement utilisés dans la littérature européenne, nécessaire au maintien des écosystèmes aquatiques.

Etiage : 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.

Hydrogéologie : Branche de la géologie qui étudie la circulation et la répartition des eaux souterraines dans le sol et le sous-sol.

Hydrophone : Appareil servant à capter les sons sous l'eau, utilisé notamment pour enregistrer les bruits aquatiques ou surveiller la faune et les activités humaines sous-marines, ici utilisé pour quantifier les déplacements de sédiments.

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

IREP (Installations industrielles rejetant des polluants) : Jeu des données correspondant aux émissions polluantes des installations industrielles (IREP).

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

Piézomètre : Instrument ou forage permettant de mesurer la pression ou le niveau d'une nappe d'eau souterraine.

Plateforme HABBY : plateforme logicielle utilisée pour l'évaluation des habitats aquatiques, notamment pour modéliser l'impact des débits sur la faune piscicole et les habitats.

Point nodal : Point clé pour la gestion des eaux défini en général à l'aval des unités de références hydrographiques pour les Schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) et/ou à l'intérieur de ces unités dont les contours peuvent être déterminés par les Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE). A ces points peuvent être définies en fonction des objectifs généraux retenus pour l'unité, des valeurs repères de débit et de qualité. Leur localisation s'appuie sur des critères de cohérence hydrographique, écosystémique, hydrogéologique et socio-économique.

Différents 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.

Mordor-TS : Modèle hydrologique disponible sur le bassin de la Loire développé par EDF.

SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie) : Le module d'analyse objective SAFRAN (Durand et al, 1993), initialement développé au CNRM/CEN pour des besoins d'estimation opérationnelle des risques d'avalanche en zone montagneuse, est une application particulièrement bien adaptée pour alimenter les modèles de surface à base physique nécessitant des données météorologiques complètes.

Transect : Ligne ou parcours le long duquel des observations ou des mesures sont prises, souvent utilisé dans les études écologiques ou hydrologiques.

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

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

Strahler : Méthode de classification des cours d'eau selon leur rang dans le réseau hydrographique (ordre de Strahler).

Axe Loire réalimenté : Partie du fleuve Loire où le débit est, parfois, artificiellement augmenté pour maintenir des niveaux d'eau suffisants, souvent en période d'étiage.

DOE (débits d'objectifs d'étiage) : débits permettant de satisfaire l'ensemble des usages en moyenne huit années sur dix et d'atteindre le bon état des eaux.

DO (débits d'objectifs) : idem que les DOE mais pouvant être définis hors de la période d'étiage et adaptés aux variations des régimes hydrologiques.

VP (Volumes prélevables) : Le volume prélevable correspond au volume pouvant statistiquement être prélevé huit années sur dix en période de basses eaux dans le milieu naturel aux fins d'usages anthropiques, en respectant le bon fonctionnement des milieux aquatiques dépendant de cette ressource et les objectifs environnementaux du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux.

Hydrologie influencée : Correspond à l'hydrologie naturelle observée qui est généralement influencée par des actions anthropiques, que ce soient les prélèvements ou les rejets, mais aussi toutes les opérations d'artificialisation des cours d'eau et des bassins versants (recalibrage et déplacement des cours d'eau, destruction des zones humides...)

Hydrologie désinfluencée : Correspond aux débits observés, désinfluencés des influences connues (prélèvements, rejets, impacts des plans d'eau). Ils sont reconstitués par addition des prélèvements et soustraction des rejets aux débits observés.

Nappe alluviale : Nappe d'eau souterraine située dans les alluvions (dépôts de sédiments) d'une vallée fluviale.

contact@eau-loire-bretagne.fr

Rédaction : agence de l'eau Loire-Bretagne, Antea Group, INRAE, Women-and-Men
Illustrations : bigbang, Women-and-Men
Création et réalisation :  women-and-men.com
Mai 2025

