

# Etude Hydrologie Milieux Usages Climat - HMUC

SAGE Loire en Rhône Alpes

## Rapport volet « Ressources »

Caractérisation de l'hydrologie

Synthèse hydrogéologie

Désinfluence des débits

*Juillet 2024*

Porteur de l'étude :

**Loire**  
LE DÉPARTEMENT

Avec le soutien financier de :



Établissement public du ministère  
chargé du développement durable

Bureau d'étude :

  
anteagroup

---

# Sommaire

1. Les sources de données mobilisées pour caractériser la ressource en eau .....	4
2. Synthèse du contexte hydrogéologique .....	5
3. Synthèse du contexte hydrologique .....	9
4. Méthodes de caractérisation de l'hydrologie influencée .....	17
4.1. Méthode d'analyse des données hydrologiques mesurées.....	17
4.2. Les bassins non instrumentés .....	20
5. Méthode de désinfluence des débits .....	27
5.1. Affection des points de prélèvements .....	28
5.2. Origine des données sur les usages et répartition journalière .....	29
5.3. Abreuvement .....	30
5.4. Cas particulier des barrages .....	34
5.5. La désinfluence des débits par sous bassin .....	39
5.6. Synthèse des résultats de désinfluence .....	41
6. Annexes	47

L'objectif de l'analyse HMUC est de confronter la ressource disponible aux besoins des milieux aquatiques et des différents usages présents sur le territoire étudié. La connaissance des régimes hydrologiques et piézométriques constitue ainsi la base permettant de mener cette analyse.

Le volet Hydro(géo)logie de l'étude HMUC s'attache donc à décrire de manière précise l'ensemble du système hydrologique et des interactions existantes entre les eaux de surface et les eaux souterraines, notamment en période de basses eaux. Cette analyse repose sur le découpage du territoire en entité hydrologique et hydrogéologique (Phase 1).

La connaissance de la ressource disponible constitue la clé de voute de la gestion de la ressource et implique une description fine du bassin versant et de son hydrologie superficielle et souterraine. Cette analyse repose sur plusieurs étapes :

- La **caractérisation générale** de l'hydrologie observée à différentes échelles de temps (annuelle, mensuelle voire journalière) et notamment de la nature des régimes hydrologiques et de certaines périodes caractéristiques (étiages). Dans le cas d'un territoire peu instrumenté, une étape de reconstitution des régimes hydrologiques aux exutoires des entités hydrologiques définies est nécessaire.
- **L'analyse des variables statistiques descriptives** des régimes hydrologiques observées et/ou reconstituées aux différents pas de temps cités et sur les périodes clés pour la gestion des ressources en eau.
- La **reconstitution des débits pseudo-naturels** (ou débits désinfluencés) à partir de l'analyse des prélèvements, rejets et des autres sources de modifications des régimes hydrologiques dans le cadre du volet « Usages ».

# 1. Les sources de données mobilisées pour caractériser la ressource en eau

Les données mobilisées pour traiter le volet « ressource en eau » de l'étude sont les suivantes :

**1** Les chroniques hydrologiques journalières issues du réseau de suivi de la DREAL et disponibles sur Hydroportail. En l'occurrence les données ont été directement téléchargées sur la plateforme API Hub'eau d'EauFrance.

Une carte des stations hydrométriques est insérée en page suivante.

**2** Les données de suivi des assecs issues du réseau de suivi ONDE.

**3** Les chroniques piézométriques disponibles dans la banque ADES.

**4** Certaines chroniques de débit ont été reconstituées par modélisation pluie-débit en reprenant les critères de calage mis à disposition par l'INRAE.



**Les contextes hydrologiques et éléments d'analyse et indicateurs hydrologiques sont détaillés dans les fiches unité de gestion.**

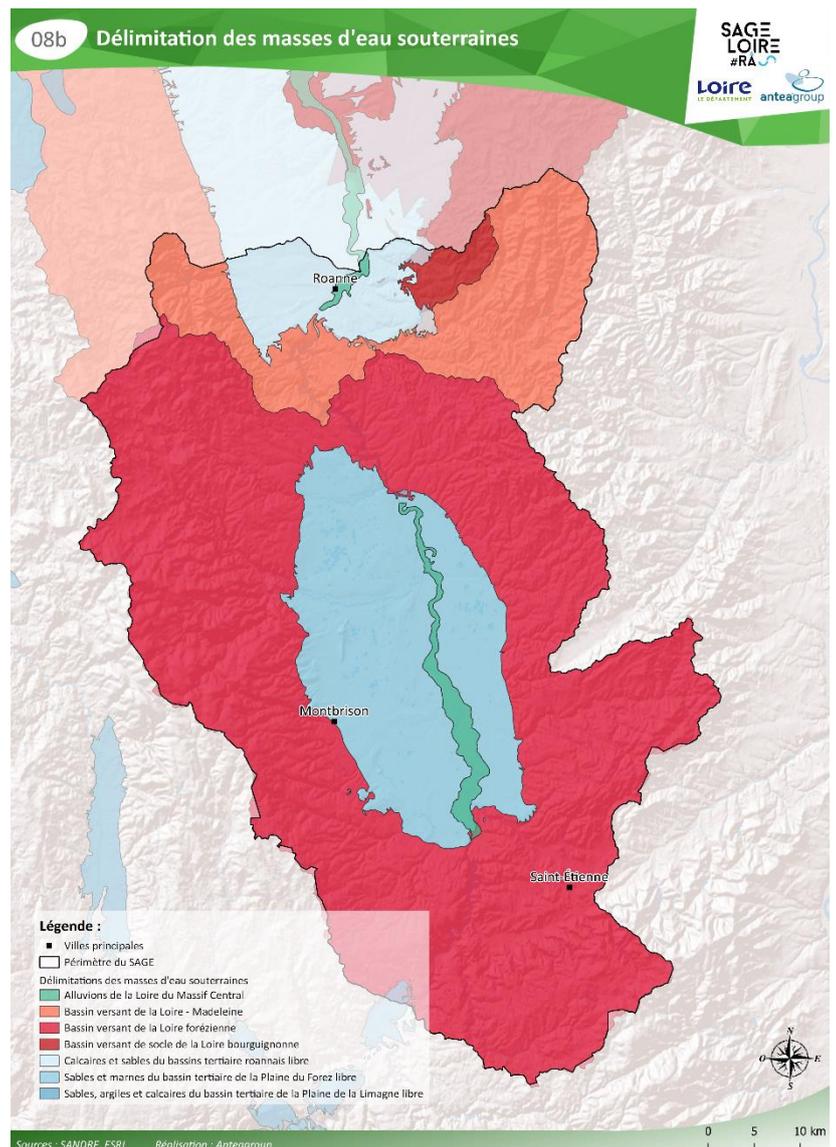
**L'ensemble des graphiques sur toutes les stations étudiées sont également mis à disposition.**

## 2. Synthèse du contexte hydrogéologique

### 2.1. Contexte général

On distinguera sur le territoire trois grands types de contextes géologiques qui vont présenter des caractéristiques aquifères distinctes :

- **Le socle** – métamorphique (gneis / shistes) ou plutonique (granites) selon les secteurs – est présent à l’affleurement sur une large partie du périmètre d’étude. Ce grand ensemble géologique a été distingué en plusieurs masses d’eau souterraines selon des critères géographiques (masses d’eau dans la gamme de rouge dans la carte ci-dessous), mais leurs caractéristiques sont similaires. Il s’agit de réservoirs aquifères assez mal connus et cartographiés, influencés par la présence de failles qui peuvent, localement, contenir des nappes. Il s’agit néanmoins, en globalité, d’aquifères faiblement capacitifs, en majorité de petits réservoirs alimentant des sources.
- **Le domaine sédimentaire**, au centre du territoire d’étude, contient **la nappe de la plaine du Forez**. Il s’agit d’une nappe libre et en contact avec les alluvions de la Loire. Elle prend place au sein du fossé d’effondrement du Forez, plus profond dans sa partie orientale (soit en rive droite de la Loire), qui a pour simplifier été progressivement comblé par des sédiments continentaux et lacustres.
- **Le domaine alluvionnaire** avec les alluvions de la Loire qui repose que le domaine sédimentaire, au sein de la plaine du Forez. Les échanges entre les deux compartiments sont importants mais pas quantifiés avec précision.



## 2.2. Focus sur la nappe de la plaine du Forez

Le BRGM a conduit en 2023 une synthèse hydrogéologique de la rive droite de la plaine du Forez. Les paragraphes suivants en reprennent les conclusions, ainsi que les résultats issus de la thèse soutenue par Jordan Re-Bahuaud en 2012, qui consistait en une modélisation de la nappe du Forez.

### Fonctionnement de la nappe

La partie supérieure de la nappe (50 premiers mètres), composée d'alluvions et de sédiments, est alimentée par les eaux de pluie, par des échanges avec la Loire et ses affluents et par des échanges avec les parties plus profondes de la nappe qui alimentée par le socle à la faveur des failles qui l'entailent. Les écoulements sont le plus souvent libres.

Certaines zones de l'aquifère montrent une très grande réactivité, avec une grande amplitude de fluctuations piézométriques en fonction de la pluviométrie saisonnière, notamment à Montrond-les-bains. D'autres secteurs sont peu réactifs, par exemple à Saint Galmier et Chalain-le-Comtal, avec une faible recharge et donc un lent renouvellement des eaux : dans ce contexte, lorsque des niveaux bas sont atteints, le retour à l'équilibre est plus long.

**En l'état des suivis et des connaissances de la nappe, le BRGM n'a cependant pas pu définir un schéma conceptuel abouti, en raison du manque de données piézométriques, de connaissance des usages et des échanges nappe-rivières.** Il est nécessaire de déployer des investigations plus poussées en nappe profonde car il n'est pas possible d'établir une géométrie de la nappe, la profondeur de la plaine sédimentaire n'étant pas établie. L'estimation des flux entre les différents horizons aquifères (et également entre l'aquifère et la Loire) n'est donc pas possible.

### Lien nappe rivière

**Les différentes études hydrogéologiques locales ont pu montrer que la Loire draine la formation aquifère de la plaine du Forez, a minima les alluvions récentes.**

Les affluents de la Loire ont également une influence sur les eaux souterraines à l'échelle locale (infiltration vers la nappe), de 0,5 à 1 km de part et d'autre du cours d'eau (exemple : la Coise, la Toranche, le Garollet, la Loise).

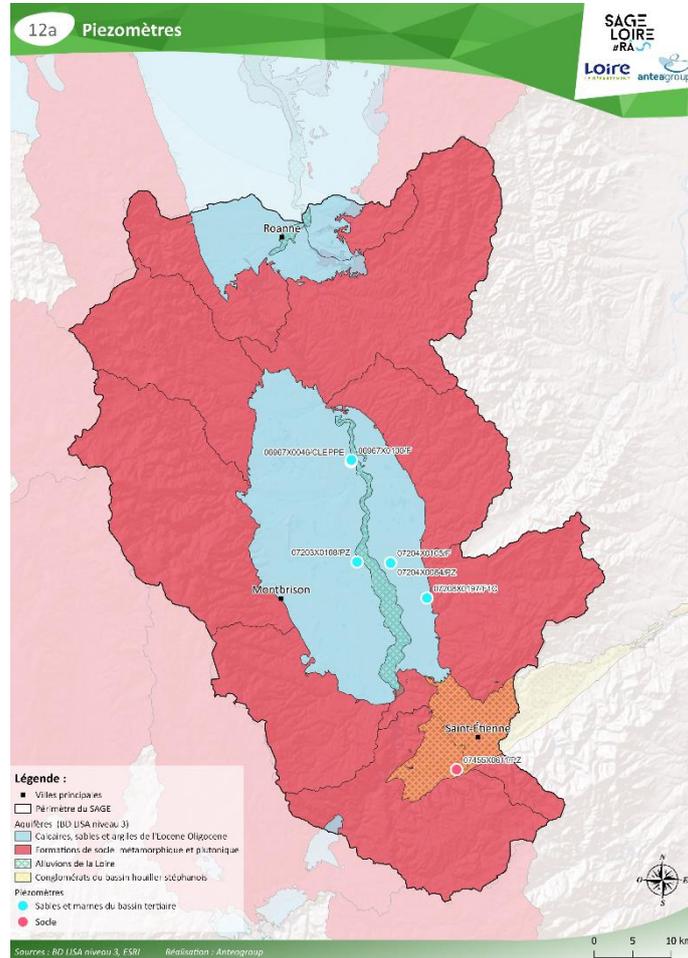
Il a été montré par les travaux et cartes piézométriques du SIVAP que l'Anzieux alimente la nappe souterraine, avec des pertes de l'ordre de 18 l/s.

### Prélèvements dans la nappe

Le BRGM a cherché à identifier les prélèvements ayant lieu dans la nappe de Forez, en soulignant que le croisement des bases de données a été difficile. La synthèse hydrogéologique retient néanmoins que **la partie profonde de la nappe (au-delà de 50 mètres de profondeur) est peu connue et nettement moins exploitée à l'exception des prélèvements pour le thermalisme (Montrond-les-Bains) et l'embouteillage (St-Galmier, Badoit).**

## Evolution piézométrique

6 piézomètres sont identifiés au sein du réseau de référence du BRGM dans le domaine sédimentaire.



La synthèse hydrogéologique de 2023 conduite par le BRGM se borne à étudier deux piézomètres situés dans le périmètre retenu (rive droite de la Loire). L'étude des niveaux piézométriques de ces deux piézomètres montre les résultats suivants :

- **Piezomètre BSS001UNYH (St-Galmier)**

Les variations piézométriques sont assez faibles à l'échelle intra-annuelle (moins de 1mètre) et les périodes basses eaux / hautes eaux peu marquées. Le piézomètre est profond d'une quinzaine de mètres, cette faible dynamique saisonnière s'explique donc par la présence d'horizon peu perméables et/ou par une alimentation en eau latérale plutôt que par infiltration directe des eaux de pluie. **On mesure une tendance à la baisse depuis 2010 de l'ordre de -0,2 mètres par an.**

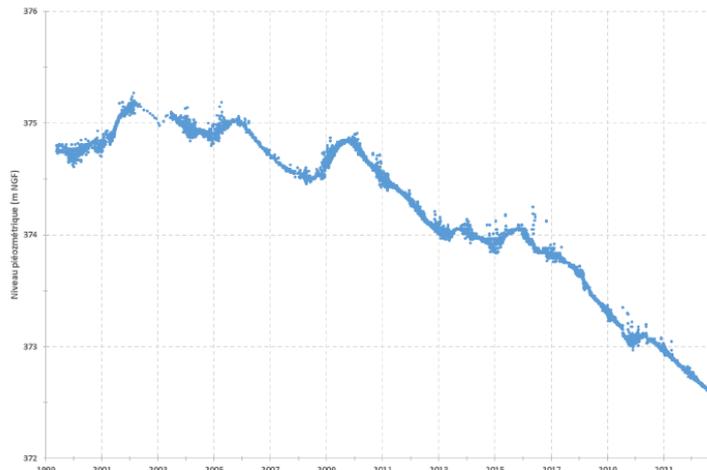


Illustration 18 - Chronique piézométrique du point BSS001UNYH (07208X0197/F1C) à St-Galmier  
(Source: BRGM / ADES)

- **Piézomètre BSS001UNAB (St André le Puy)**

Les variations piézométriques sont beaucoup plus marquées sur le piézomètre de St André le Puy, moins profond également (7,7 mètres). Les périodes de basses eaux et de hautes eaux sont facilement identifiables. **Le BRGM ne relève pas visuellement de tendance à la baisse, l'analyse statistique montre en revanche une légère tendance à la baisse sur les 10 dernières années.**

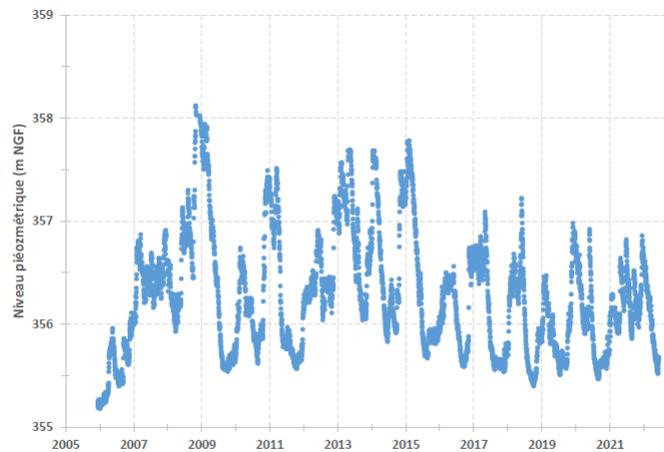
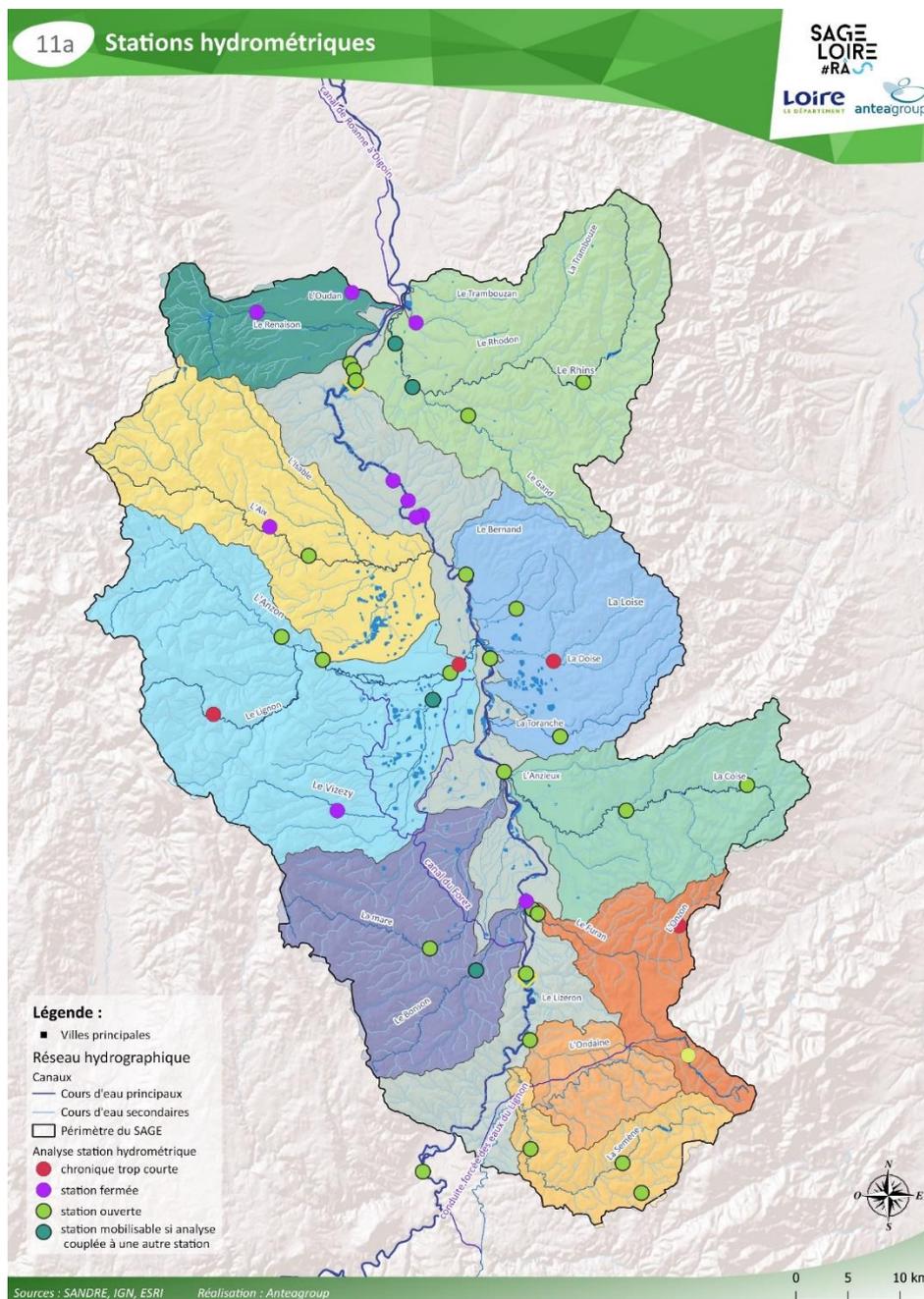


Illustration 19 - Chronique piézométrique du point BSS001UNAB (07204X0105/F) à St-André-le-Puy  
(Source: BRGM / ADES)

### 3. Synthèse du contexte hydrologique

Les méthodologies ayant permis de rendre compte de l'hydrologie mesurée aux stations hydrométrique (hydrologie influencée) sont détaillées dans la partie 4. **Il s'agit ici de rappeler, succinctement, le contexte hydrologique du périmètre. Pour rappel, les résultats des indicateurs hydrologiques et l'analyse des contextes est réalisée au sein des fiches unités de gestion.**

Le périmètre de la Loire en Rhône Alpes est bien instrumenté avec des stations hydrométriques sur les principaux affluents et plusieurs stations de suivi dans la Loire, qui font néanmoins l'objet de chroniques disparates. Une analyse détaillée de la complétude des données a par ailleurs été réalisée station par station au pas de temps mensuel.



La liste des stations hydrométriques mobilisées est la suivante :

Nom station	Code	Début	Fin	Nb années rejetées	Années rejetées
L'Aix à Grézolles [Château d'Aix]	K081301001	1965	1995	1	1975
L'Aix à Saint-Germain-Laval	K081302001	1973	2023	4	1987, 1988, 1989, 2023
L'Anzon à Débats-Rivière-d'Orpra - Cotes	K074401001	1972	2023	5	1978, 1979, 1988, 1989, 2023
L'Ondaine à Unieux - Le Pertuiset	K058000101	2020	2023	1	2023
L'Onzon à Sorbiers	K061601001	1982	1985	3	1982, 1983, 1985
L'Oudan à Riorges	K093701001	1984	2009	6	1984, 1985, 1989, 1992, 1998, 2009
La Coise à Larajasse [Le Nézel]	K066331001	1970	2023	3	1986, 1990, 2023
La Coise à Saint-Médard-en-Forez - Moulin Brûlé	K067331001	1961	2023	13	1979, 2000 à 2010, 2023
La Loire à Bas-en-Basset	K055001010	1919	2023	1	2023
La Loire à Feurs - Aval – Ancienne	K070001010	1984	2014	1	2014
La Loire à Montrond-les-Bains	K069001001	1981	2023	5	1981, 1982, 1983, 1984, 2023
La Loire à Saint-Just-Saint-Rambert - Barrage de Grangent	K060001001	2015	2023	4	2015, 2017, 2021, 2023
La Loire à Villerest - Aval	K091001010	1921	2023	1	2023
La Loire à Villerest - Pont de Villerest	K091001011	2005	2023	2	2005, 2023
La Loise à Salt-en-Donzy	K071401001	1972	1983	1	1983
La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez - Vérines	K064311001	1971	2023	2	1997, 2023
La Semène à Jonzieux	K056753001	1977	2023	2	2008, 2023
La Semène à Saint-Didier-en-Velay-Le Crouzet	K056752001	1963	2023	4	1997, 2008, 2009, 2023
La Toranche à Saint-Cyr-les-Vignes	K070451001	1977	2023	4	1991, 2008, 2009, 2023
Le Bonson à Saint-Marcellin-en-Forez - Le Bled - Ancienne	K062451001	1971	2008	1	2008

<b>Le Bonson à Saint-Marcellin-en-Forez - Le Bled - Pont</b>	K062451002	2011	2023	2	2011, 2023
<b>Le Furan à Andrézieux-Bouthéon</b>	K061401001	1968	2023	10	1978, 1979, 1983, 1989, 2009, 2017 à 2020, 2023
<b>Le Furan à Andrézieux-Bouthéon - Pont de l'Avenue de l'Europe</b>	K061401002	2021	2023	2	2021, 2023
<b>Le Gand à Neaux</b>	K097401001	1972	2023	2	1985, 2023
<b>Le Gourtarou [Chanasson] à Civens [La rivière]</b>	K072451001	1972	2023	2	2016, 2023
<b>Le Lignon à Boën</b>	K075321001	1982	2023	1	2023
<b>Le Lignon à Chalmazel - Chevelières</b>	K073322001	1958	2023	4	1963, 1980, 1995, 2023
<b>Le Lignon à Poncins - 1</b>	K077322101	1966	1993	0	
<b>Le Lignon à Poncins - Le Bourg</b>	K077322001	1966	2023	1	2023
<b>Le Renaison à Renaison - Ancienne</b>	K092401001	2013	2019	1	2019
<b>Le Rhins à Amplepuis</b>	K094301001	1970	2023	3	1970, 1988, 2023
<b>Le Rhins à Saint-Cyr-de-Favières [Pont Mordon]</b>	K098301001	1969	2020	1	2003
<b>Le Rhins à Saint-Vincent-de-Boisset - Pont Maréchal</b>	K098301101	2017	2023	2	2017, 2023
<b>Le Rhodon à Perreux</b>	K100451001	1973	2015	3	2000, 2001, 2015
<b>Le Vizezy à Essertines-en-Châtelneuf - La Guillauche - Ancienne</b>	K076331001	1969	2013	6	1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 2013
<b>Le Vizezy à Poncins - Précivet</b>	K076331201	2019	2023	1	2023
<b>[L'Ecotay] à Marlhes</b>	K056831001	1978	2023	2	1992, 2023

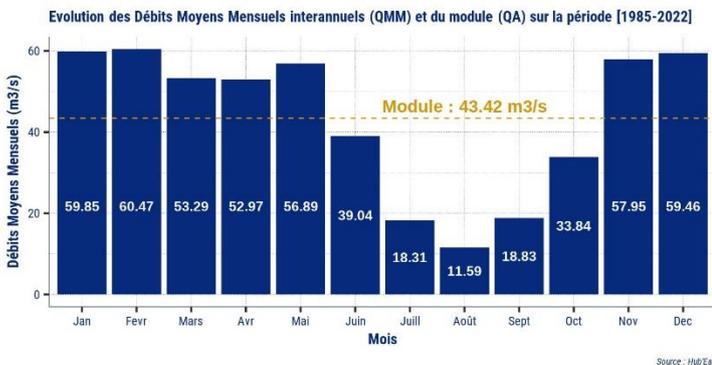


La variabilité inter-mensuelle des débits est marquée sur l'ensemble des stations avec des hautes eaux hivernales et des basses eaux en période estivale. Il s'agit d'un régime pluvial classique, avec des régimes tirant vers le pluvio-nival sur l'amont des bassins versant enneigés en période hivernale (Lignon, Semène), stations sur lesquelles on identifie des débits légèrement plus importants au printemps qu'au cœur de l'hiver.

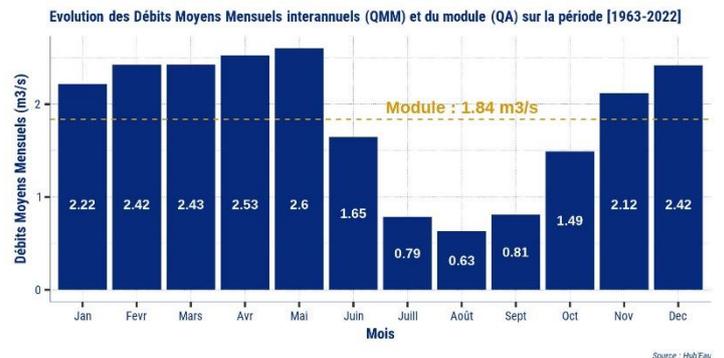
La période de basses eaux au sens hydrologique (et non pas au sens du SDAGE) est sur la totalité des stations **de juin à octobre**. Il s'agit de la période au cours de laquelle les débits mesurés sont inférieurs au module. Le mois de mai, pluvieux sur l'ensemble du périmètre, garanti des débits plus élevés ce mois-ci.

Quelques graphiques des débits moyens mensuels pour illustration :

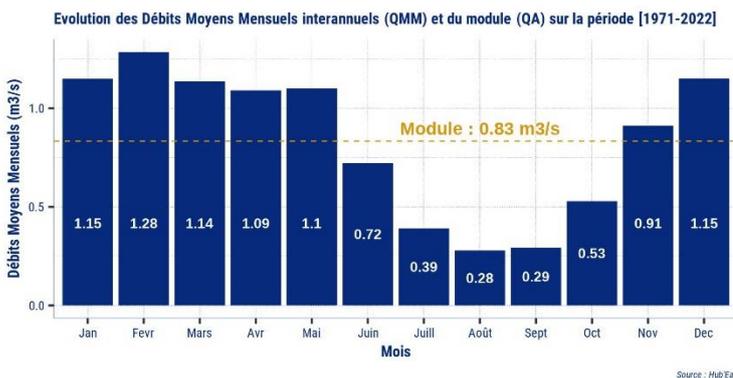
La Loire à Montrond-les-Bains : [K069001001]



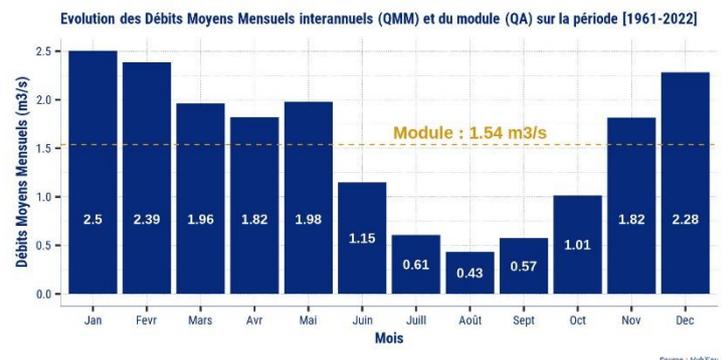
La Semène à Saint-Didier-en-Velay-Le-Crouzet : [K056752001]



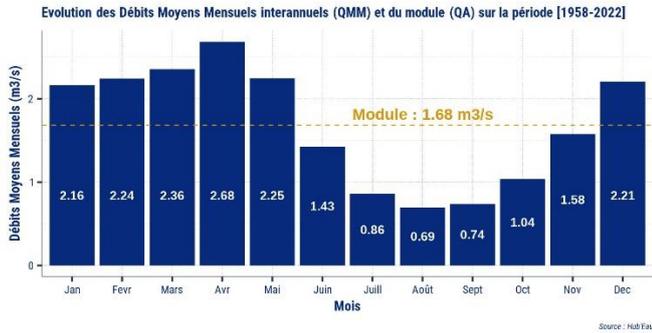
La Mare à Saint-Marcellin-en-Forez - Vérines : [K064311001]



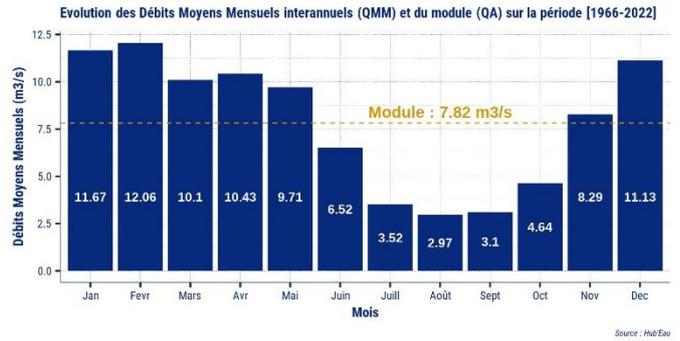
La Coise à Saint-Médard-en-Forez - Moulin Brûlé : [K067331001]



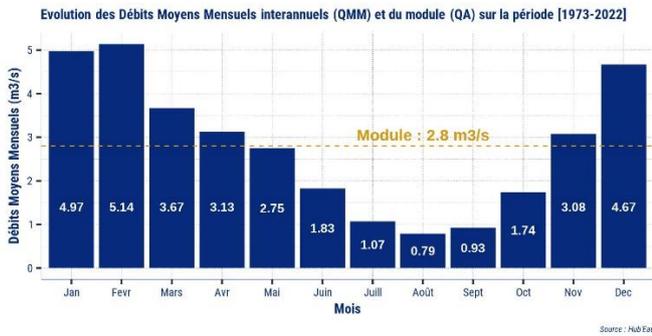
**Le Lignon à Chalmazel - Chevelières : [K073322001]**



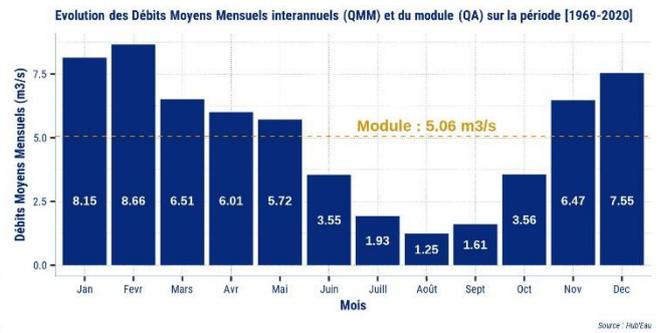
**Le Lignon à Poncins - Le Bourg : [K077322001]**



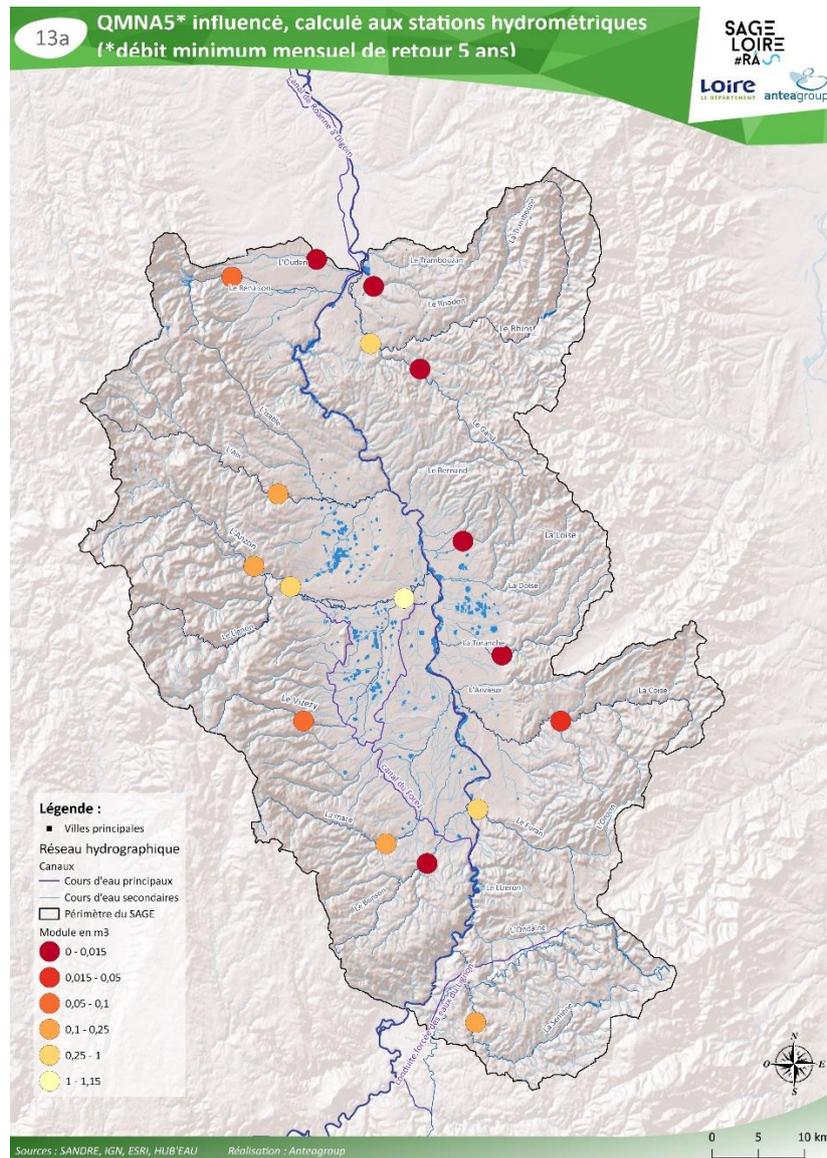
**L'Aix à Saint-Germain-Laval : [K081302001]**



**Le Rhins à Saint-Cyr-de-Favières [Pont Mordon] : [K098301001]**

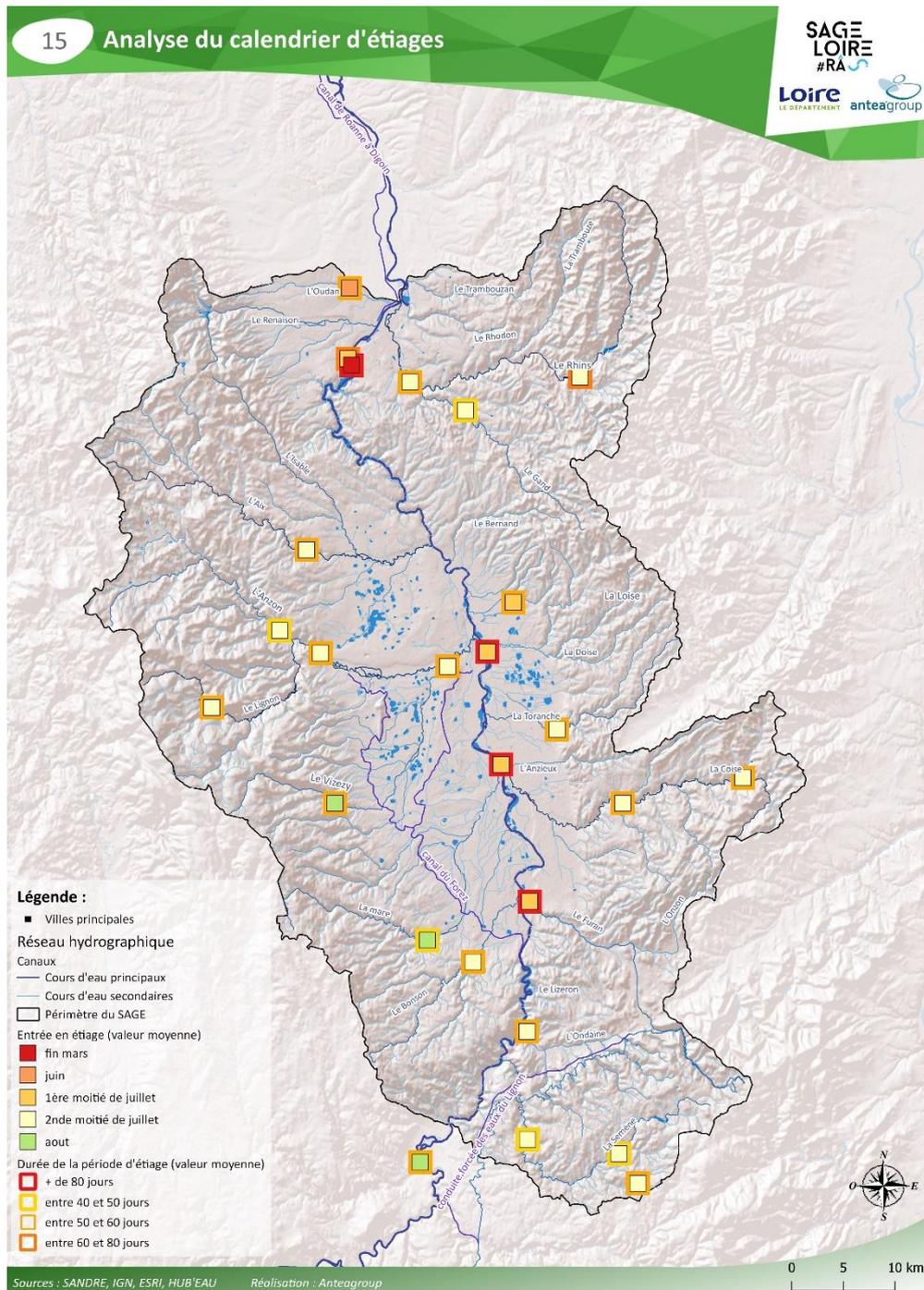


Les étiages sont intenses sur l'ensemble des cours d'eau du bassin qui sont très réactifs aux pluies et donc sensibles aux sécheresses météorologiques. L'intensité des étiages est plus marquée sur les cours d'eau qui sont moins soutenus par de petits réservoirs de tête de bassin arrosés : la Coise, la Mare et le Bonson, les cours d'eau rive droite de la Toranche à la Revoute, le Gand.



Une méthode d'analyse spécifique de la période d'étiage, basée sur une valeur seuil d'étiage (quantile 15), permet à travers le calcul d'indicateurs de saisonnalité et d'impact, de caractériser cette période et son évolution. Pour rappel, l'étiage est considéré comme étant la période d'exacerbation des basses eaux, ou l'on retrouve les conditions hydrologiques les plus critiques.

**Sur le territoire, le profil des épisodes d'étiage est assez homogène avec une entrée dans l'étiage durant le mois de juillet ; et une durée assez longue, de 60 à 80 jours.**



## 4. Méthodes de caractérisation de l'hydrologie influencée



Le travail spécifique de désinfluence des débits, mobilisant à la fois les données d'usage et d'hydrologie mesurée, est détaillé en partie 5 du présent rapport.

### 4.1. Méthode d'analyse des données hydrologiques mesurées

#### 4.1.1. L'analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les évènements passés caractéristiques d'un processus hydrologique donné (crue, étiage, sécheresse). Différentes lois statistiques sont classiquement utilisées en fonction du processus étudié.

Les courbes de fréquences, classiquement utilisées en analyse fréquentielle représentent la probabilité d'occurrence d'un événement donné en fonction de son intensité et de sa fréquence de retour qui indique la fréquence à laquelle on peut s'attendre qu'un évènement spécifique se produise.

Ce type d'analyse permet également de caractériser l'intensité d'un phénomène passé. A titre d'exemple, l'analyse fréquentielle des QMNA au droit de la station hydrométrique de la Loire à Orléans montre que l'étiage de l'année 2022 correspond à un phénomène exceptionnel ayant une fréquence de retour cinquantennale (1 événement tous les 50 ans).

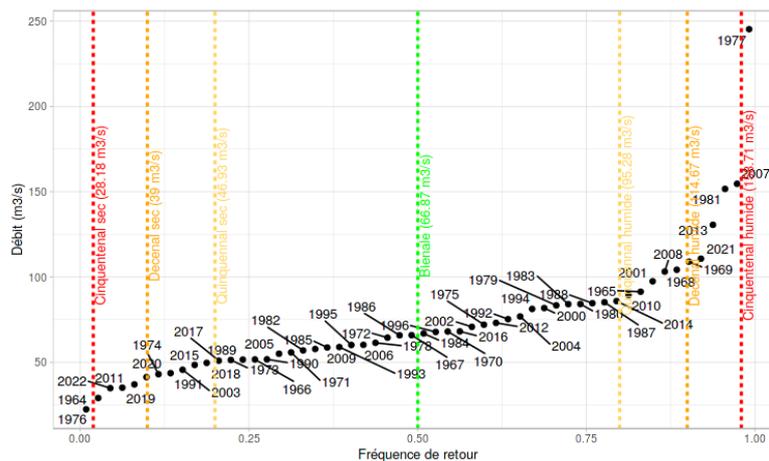


Figure 1 Illustration de l'analyse fréquentielle des QMNA sur la Loire à Orléans

## 4.1.2. L'analyse des débits classes

Certains indicateurs utilisés en hydrologie sont issus de l'analyse des débits classés ou de la courbe de fréquence des débits qui permet de caractériser la relation entre le débit et sa fréquence d'occurrence sur une période donnée.

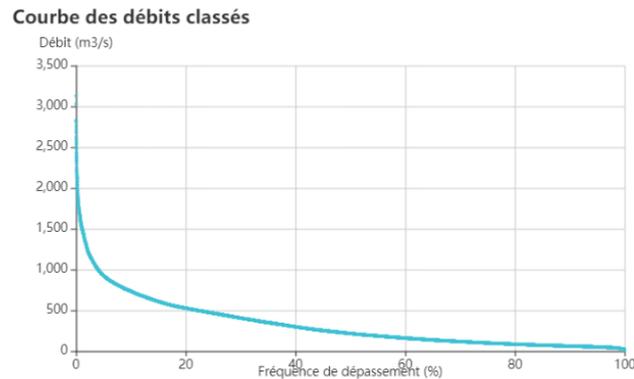


Figure 2 Courbe des débits classés sur la Loire à Orléans (1964 – 2023)

Cette courbe est construite à partir des valeurs de débits journaliers classés par ordre croissant. Chaque valeur de débit est ensuite associée à une probabilité d'occurrence c'est-à-dire la fréquence (%) pour laquelle un débit donné est égalé ou dépassé.

Cette probabilité est estimée en utilisant des méthodes statistiques telles que la méthode des rangs.

## 4.1.3. Le test de mann-kendall

Le test de Mann-Kendall est une des méthodes les plus couramment utilisée pour détecter des tendances dans une série temporelle (Kendall, 1955 ; USGS, 2001). Cette méthode présente de nombreux avantages :

- Elle est basée sur une statistique non paramétrique (applicable quel que soit la distribution des données) ;
- Elle nécessite peu de données en entrée (10 analyses minimum) ;
- Elle permet de détecter tout type de tendance (croissante, décroissante linéaire ou non).

La principale restriction de cette méthode réside dans le fait que les données doivent être considérées comme indépendantes (sans autocorrélation). Lorsque les données sont auto-corrélées, le test de Mann-Kendall modifié doit être appliqué.

Le test est associé au calcul de la pente de Sen (pente de droite de régression) qui est la médiane de toutes les pentes calculées entre chaque paire de point. Cette pente, positive ou négative, représente

la tendance d'évolution de la variable testée. Cette tendance est dite significative lorsque que la p-value du test est inférieure à 5 % (p-value = 0.05).

La tendance calculée par le biais de ce test peut s'exprimer dans l'unité du paramètre analysé (m<sup>3</sup>/s, mm, °C, ...) par unité de temps (an, décennie, ...) mais également en relatif (%).

#### 4.1.4. Caractérisation de l'étiage

La méthode de caractérisation des étiages mobilisée repose sur les travaux du Cemagref réalisé dans le cadre de l'identification du Réseau de Référence pour la Surveillance des Etiages (RRSE). Plus précisément ces travaux ont été menés par Giuntoli I. et Renard B. : *Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : vers un réseau de référence pour la surveillance des étiages. Rapport, 2009.*

La méthode identifiée à la suite de ces travaux consiste en l'utilisation d'une valeur de débit seuil pour définir le niveau d'étiage. La valeur retenue car représentative du phénomène d'étiage sur un échantillon de cours d'eau représentant la variabilité des contextes hydrographiques métropolitains est le quantile 15 (Q15) qui est la valeur supérieure à 15 % des valeurs de débits les plus faibles.

A partir de cette valeur calculée sur l'ensemble de la chronique analysée, une analyse annuelle des caractéristiques des étiages peut être réalisée par confrontation des chroniques journalières au débit seuil.

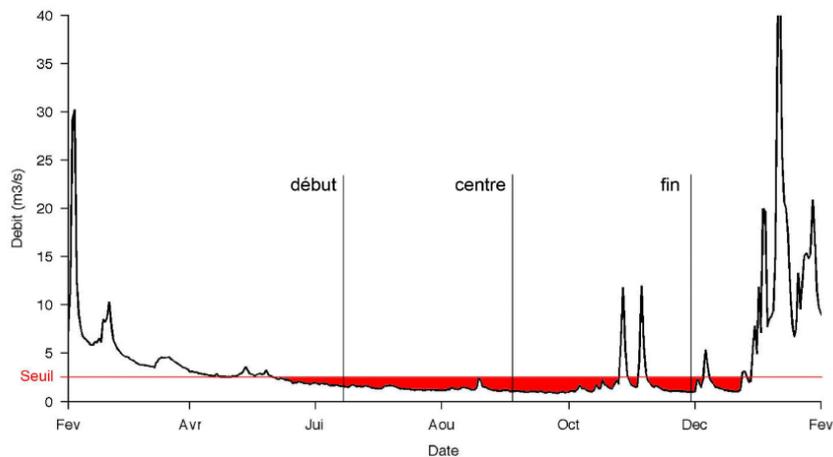


Figure 3 Représentation graphique de l'étiage annuel

Pour chaque année, le régime d'étiage peut être décrit par 7 indices calculés comme suit :

Compartment d'analyse	Indice	Description de l'indice
Indices de saisonnalité	Date de début d'étiage	Date correspondant au centre de masse à 10 % en volume (date à laquelle 10 % du volume d'étiage est atteint)
	Date de centre de l'étiage	Date correspondant au centre de masse à 50 % en volume (date à laquelle 50 % du volume d'étiage est atteint)

	Date de fin de l'étiage	Date correspondant au centre de masse à 90 % en volume (date à laquelle 90 % du volume d'étiage est atteint)
	Date du pic de l'étiage	Date du débit minimum annuel sur l'année
Indices de sévérité	Durée de l'étiage	Durée annuel (en nombre de jours) sous le seuil d'étiage (quantile 15)
	Déficit en volume	Volume total écoulé sous le seuil d'étiage (quantile 15)
Autres indices	Temps de récession	Durée entre le centre et le début de l'étiage qui correspond à la phase de décroissance du débit (tarissement des stocks hydriques naturels de l'hydrosystème)

L'évolution de ces indicateurs est étudiée sur la période ciblée par application d'un test de Mann-Kendall.

## 4.2. Les bassins non instrumentés

Certains sous bassins versants homogènes ne disposent pas de station hydrométrique, il faut donc reconstruire les débits influencés, et plusieurs méthodes sont mobilisables :

- **Transférer les débits depuis une station proche ;**
- **Réutiliser les chroniques modélisées (LoiEAU, RCH, ...)** ;
- **Lancer un modèle pluie-débit.**

**1. Le recours aux chroniques modélisées LoiEAU et RCH a été écarté**, suite à des tests sur les bassins instrumentés il s'avère que les débits d'étiage sont mal retranscrits.

**2. Le transfert de débit n'a été mobilisé que sur l'Ondaine**, car le fonctionnement est proche de celui de la Semène et que la station hydrométrique récente (ouverture e 2020) permettait de vérifier la validité du transfert.

**3.** Pour tous les autres bassins, qui ne présentaient d'après les retours du COTECH pas forcément de fonctionnement proche des bassins voisins, **nous avons privilégié la modélisation pluie-débit**. La mise à disposition des données climatiques SAFRAN, spatialisées et disponibles au pas de temps journalier, guidait également vers le choix de cette méthode.

**Le modèle utilisé est le modèle GR4J**, un modèle pluie-débit qui est un modèle conceptuel, c'est-à-dire qu'il ne repose pas sur la physique du bassin mais sur des fonctions mathématiques de transformation de la pluie en débit. En entrée, il faut renseigner la pluviométrie journalière, l'ETP journalière et la taille du bassin versant. Les autres paramètres du modèle n'ont pas pu être approchés par calage puisqu'il n'y a pas sur ces bassins de chronique de débit mesurée, et qu'il est aléatoire de se baser sur les chroniques d'une station voisine. Nous avons donc repris les valeurs guides proposées

par l'IRSTEA par tronçon de cours d'eau<sup>1</sup>. Ces valeurs seraient plus robustes que celles d'une station voisine car elles compilent les données de tous les bassins à caractéristique équivalentes.

**Attention, faute de calage sur des chroniques mesurées, on ne peut pas préciser qu'elle est la gamme de validité des valeurs modélisées.**

Après avoir produit ces chroniques « pseudo-naturelles », nous les avons réinfluencées à l'exutoire avec l'ensemble des usages, au pas de temps journalier.

### 4.2.1. La méthode de transfert de bassin

La méthode de transfert de bassin également connue sous le nom de modélisation débit – débit est une méthode simple et régulièrement utilisée pour reconstituer un débit à l'exutoire d'un bassin versant.

Cette méthode est applicable dans les cas suivants :

- Il existe un site de suivi hydrométriques positionné en amont ou en aval de la localisation ciblée ;
- Il existe, à proximité du bassin étudié un bassin instrumenté présentant des caractéristiques morphologiques similaires (surface, géologie, climat).

La méthode de calcul repose sur une transposition directe du débit d'une station voisine avec un ajustement correspondant au ratio des surfaces respectives des bassins :

$$Q_{non\ jaugé} = Q_{jaugé} \times \frac{Surface\ BV_{jaugé}}{Surface\ BV_{non\ jaugé}} \quad \text{Avec : } Q \text{ en m}^3/\text{s} \text{ et } Surface\ BV \text{ en km}^2$$

### 4.2.2. Modélisation pluie -débit (GR4J et GR6J)

Le modèle GR4J est un modèle hydrologique global et conceptuel qui permet de simuler des débits au pas de temps journalier à partir de 4 paramètres de calage. Le modèle nécessite entrée des séries temporelles continues de pluies (P) et d'évapotranspiration potentielles (ETP).

Les 4 paramètres de calage du modèle sont les suivants :

- La capacité du réservoir de production (mm) (X1) ;

<sup>1</sup> Cartographie des paramètres des modèles GR en France (pour les bassins versants non jaugés), HYCAR Research Unit - INRAE Antony, Génot, B., Delaigue, O., Andréassian, V. & Poncelet, C.

- Le coefficient d'échanges souterrains (mm/jour) (X2) ;
- La capacité à un jour du réservoir de routage (mm) (X3)
- Le temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (jours) (X4)

La modélisation du régime hydrologique d'un bassin versant se fait classiquement selon deux grandes étapes :

L'étape de calage-contrôle qui consiste à calibrer le modèle à partir des données observées (séries temporelles climatiques et données hydrométriques). Autrement dit, on cherche à optimiser les paramètres du modèle sur une période de calage afin de reproduire au mieux les chroniques observées sur une période de validation. Les performances du modèle hydrologique sont jugées grâce à une fonction objectif (critère de Nash, KGE, ...). La meilleure combinaison de paramètres est recherchée pour chaque bassin versant.

L'étape de modélisation qui consiste, lorsque le modèle est calé, en l'utilisation de cette combinaison de paramètres pour simuler les débits sur la période cible, sur laquelle on ne dispose pas de données de débit.

En l'absence de station hydrométrique sur le bassin versant ou un bassin voisin, il est possible de caler le modèle à partir des valeurs guides produites par l'INRAE : *Cartographie des paramètres des modèles GR en France (pour les bassins versants non jaugés) - Mapping of GR model parameters in France (for ungauged basins) HYCAR Research Unit - INRAE Antony - Génot, B., Delaigue, O., Andréassian, V. & Poncelet, C.*

### 4.2.3. La méthode d'agrégation

La méthode de reconstitution des régimes hydrologiques par agrégation est une méthode simple qui consiste à sommer les débits journaliers de plusieurs sous-bassins pour reconstituer le débit journalier à l'exutoire du bassin versant dans lequel ces sous-bassins s'intègrent comme illustré dans le schéma ci-dessous.

Dans ce cas illustré, le débit à l'exutoire correspondra à la somme des débits des sous-bassins A, B et C.

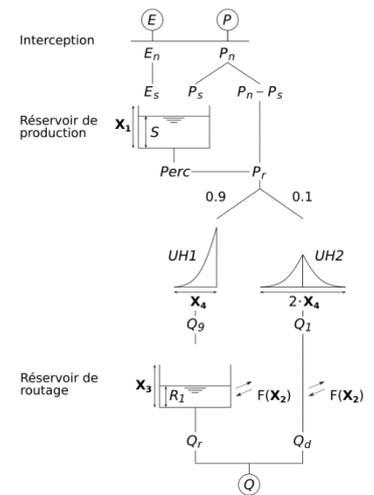


Figure 4 Schéma de fonctionnement du modèle hydrologique journalier GR4J  
(Source : INRAE)

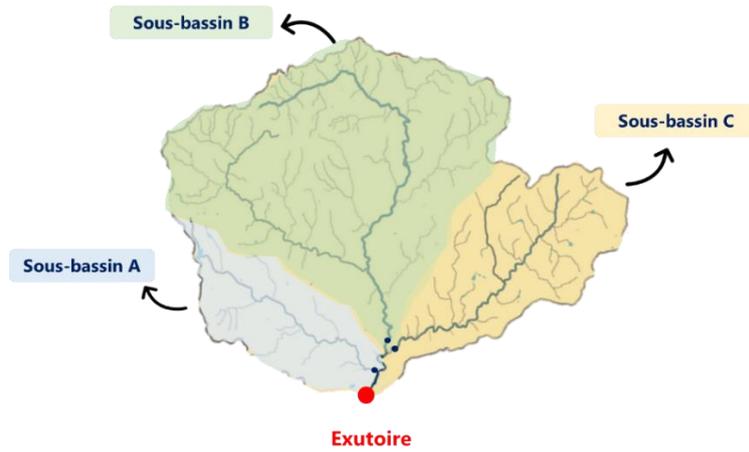


Figure 5 Illustration de la méthode par agrégation

Cette méthode peut être couplée à d'autres méthodes de reconstitution (transfert, modélisation, ..) appliquées au préalable pour reconstituer le débit d'un ou plusieurs sous-bassins.

## 4.2.4. Synthèse des méthodes mobilisées pour caractériser l'hydrologie à l'exutoire de l'ensemble des sous bassins versants homogènes

En fonction des données disponibles pour chaque sous bassin versant homogène (présence d'une station hydrométrique ou non, positionnement de la station, etc), plusieurs méthodes ont été mobilisées pour reconstituer l'hydrologie à l'exutoire des bassins versant.

On distingue 3 grands cas :

1. **Présence d'une station** : transfert des débits renaturalisés à la station hydrométrique vers l'exutoire ; ils sont ensuite réinfluencés avec l'ensemble des usages du bassin versant ;
2. **Absence de station** : modélisation des débits au travers un modèle pluie-débit callé avec les paramètres issus des valeurs guides proposées par l'INRAE ou une station proche ;
3. **Agrégation** : compilation des résultats de plusieurs affluents à l'exutoire.

Unité de gestion	Num sous BV	Sous BV homogène	Méthode
La Semène	1.1	La Semène	1) Renaturalisation des débits à la station 2) Transfert à l'exutoire 3) Réinfluence des débits à l'exutoire
L'Ondaine	2.1	L'Ondaine	1) Renaturalisation du débit à la station 2) Reconstitution : Transfert du débit naturalisé de la Semène [K056752001] puis comparaison avec le débit renaturalisé à la station [K058000101] 3) Réinfluence des débits à l'exutoire
Le Furan	3.3	Le Furan aval	1) Renaturalisation des débits à la station 2) Transfert à l'exutoire 3) Réinfluence des débits à l'exutoire
Mare Bonson	4.1	Le Bonson	1) Renaturalisation des débits à la station 2) Transfert à l'exutoire 3) Réinfluence des débits à l'exutoire
Mare Bonson	4.2	La Mare	1) Renaturalisation des débits à la station 2) Transfert à l'exutoire 3) Réinfluence des débits à l'exutoire
La Coise	5.1	La Coise	1) Renaturalisation des débits à la station 2) Transfert à l'exutoire 3) Réinfluence des débits à l'exutoire

<b>Loise Toranche</b>	7.1	Toranche	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Renaturalisation des débits à la station</li> <li>2) Transfert à l'exutoire</li> <li>3) Réinfluence des débits à l'exutoire</li> </ol>
<b>Lignon du Forez</b>	6.1	Le Vizezy	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Calage modèle pluie-débit station</li> <li>2) Modélisation à l'exutoire du sous-bassin par transfert des paramètres de calage et vérification avec les données de la station aval.</li> <li>3) Transfert du débit modélisé</li> <li>4) Influence des débits pseudo-naturels</li> </ol>
<b>Lignon du Forez</b>	6.2	Le Lignon aval	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Renaturalisation des débits à la station</li> <li>2) Transfert à l'exutoire</li> <li>3) Réinfluence des débits à l'exutoire</li> </ol>
<b>Lignon du Forez</b>	6.2	Le Lignon amont	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Renaturalisation du débit à la station</li> <li>2) Transfert à l'exutoire</li> <li>3) Réinfluence des débits à l'exutoire</li> <li>4) Vérification des résultats à partir de la station aval [K077322001] et débit à l'exutoire du sous-bassin du Vivezy</li> </ol>
<b>Lignon du Forez</b>	6.3	L'Anzon	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Renaturalisation des débits</li> <li>2) Transfert à l'exutoire</li> <li>3) Réinfluence des débits à l'exutoire</li> </ol>
<b>Loise Toranche</b>	7.3	Loise	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Modélisation par transfert paramètres GR4J</li> <li>2) Réinfluence des débits</li> </ol>
<b>Loise Toranche</b>	7.5	Le Goutarou	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Renaturalisation des débits à la station</li> <li>2) Transfert à l'exutoire</li> <li>3) Réinfluence des débits à l'exutoire</li> </ol>
<b>Loise Toranche</b>	7.7	Le Pouilly	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Modélisation par transfert paramètres GR4J</li> <li>2) Réinfluence des débits</li> </ol>
<b>Loise Toranche</b>	7.6	Les Odiberts	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Modélisation par transfert paramètres GR4J</li> <li>2) Réinfluence des débits</li> </ol>
<b>Loise Toranche</b>	7.9	Villechaise et Ronziere	Aucune
<b>Loise Toranche</b>	7.4	Le Bernand	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Modélisation par transfert paramètres GR4J</li> <li>2) Réinfluence des débits</li> </ol>
<b>Loise Toranche</b>	7.8	La Revoute	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Modélisation des débits pseudo-naturels à l'exutoire à partir de la station du Gourtarou</li> <li>3) Transfert à l'exutoire du sous-bassin</li> </ol>

			2) Réinfluence des débits
<b>Loise Toranche</b>	7.2	Garollet et zone d'étangs	Aucune
<b>Aix Isable</b>	8.2	L'Onzon	1) Modélisation par transfert paramètres GR4J 2) Réinfluence des débits
<b>Aix Isable</b>	8.3	L'Isable	1) Modélisation par transfert paramètres GR4J 2) Réinfluence des débits
<b>Aix Isable</b>	8.1	L'Aix	1) Renaturalisation des débits à la station 2) Transfert à l'exutoire 3) Ajout débit exutoire Isable + Onzon
<b>Renaison Oudan</b>	9.1	Le Renaison	1) Modélisation par calage et simulation GR4J 2) Transfert des débits à l'exutoire du sous-bassin homogène 3) Réinfluence des débits
<b>Renaison Oudan</b>	9.2	L'Oudan	1) Modélisation par calage et simulation GR4J 2) Transfert des débits à l'exutoire du sous-bassin homogène 3) Réinfluence des débits
<b>Rhins Rhodon Trambouze</b>	10.1	La Gand	1) Renaturalisation des débits à la station 2) Transfert à l'exutoire
<b>Rhins Rhodon Trambouze</b>	10.2	Le Rhins	1) Renaturalisation des débits à la station 2) Transfert à l'exutoire
<b>Rhins Rhodon Trambouze</b>	10.4	Le Rhodon	1) Renaturalisation du débit à la station 2) Transfert à l'exutoire 3) Somme avec débit Trambouzan
<b>Rhins Rhodon Trambouze</b>	10.3	Le Trambouzan	1) Modélisation par transfert paramètres GR4J 2) Réinfluence des débits

## 5. Méthode de désinfluence des débits

L'étude de l'hydrologie des cours d'eau s'effectue en deux étapes :

- 1 Etude de l'hydrologie influencée, c'est-à-dire les débits mesurés au niveau des stations hydrométriques et qui sont impactés par les prélèvements et rejets ;
- 2 L'hydrologie désinfluencée, ou « pseudo-naturelle » : on retire l'influence des prélèvements et rejets afin d'approcher les débits « naturels », tels qu'ils seraient observés s'il n'y a pas d'activité atrophique.



**Ce travail permet d'identifier et de quantifier l'impact des activités et ouvrages sur le régime hydrologique des cours d'eau.**

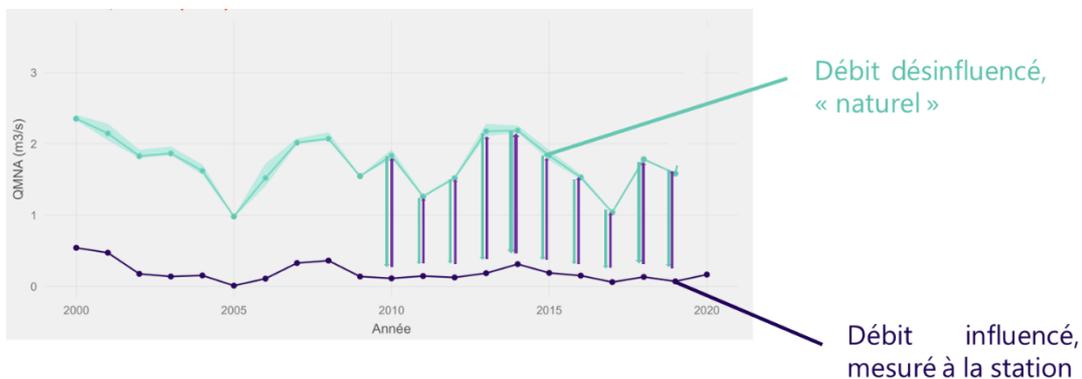


Figure 6 exemple d'une comparaison entre débit influencé et désinfluencé – Antea

Il y a deux moyens d'estimer les débits désinfluencés :

- **La méthode arithmétique** : on soustrait et on ajoute au débit mesuré au niveau d'une station hydrométrique les rejets et prélèvements enregistrés en amont ; **c'est la méthode que nous privilégions** ;
- **La modélisation** : on modélise des débits « naturels » en connaissant la pluie, l'évaporation et la taille du bassin versant ; cependant on ne peut pas caller le modèle sur des chroniques de débit mesurées puis désinfluencées ce qui engendre de l'incertitude.

Les étapes de désinfluence par la méthode arithmétique sont les suivantes :

1. **Affecter des points de prélèvement aux différents types de ressources ;**
2. **Reconstituer les usages au pas de temps journalier (prélèvements et rejets) ;**
3. **Quantifier l'impact des barrages sur l'hydrologie des bassins concernés ;**
4. **Désinfluencer les débits journaliers par méthode arithmétique ou modélisation ;**
5. **Transférer les débits désinfluencés aux exutoires des bassins.**

## 5.1. Affection des points de prélèvements

L'affectation des points de prélèvements est une étape importante du travail de désinfluence, et peut être dans certains cas une source d'incertitude.

Il s'agit de distinguer les prélèvements **impactant la ressource en eau superficielle**, qu'il faut inclure dans le travail de désinfluence des débits ; des prélèvements en eau souterraine n'impactant pas, ou à la marge, les eaux superficielles.

Les hypothèses suivantes ont été retenues sur le SAGE LRA :

- **Les prélèvements sur source**, dans la zone de socle du périmètre, sont considérées comme des prélèvements impactant les eaux superficielles et sont donc inclus dans les calculs de désinfluence des débits ;
- **Les prélèvements en nappe alluviale** et situés à proximité du cours d'eau sont également considérés comme impactant les eaux superficielles et sont donc inclus dans les calculs de désinfluence des débits ;
- **Les prélèvements dans la nappe du Forez** sont considérés comme impactant les eaux souterraines et ne sont pas intégrés dans les calculs de désinfluence. **Point « incertitude »** : il existe des échanges locaux entre la nappe alluviale de la Loire et la nappe du Forez, auquel cas certains prélèvements peuvent impacter l'hydrologie de la Loire. **Néanmoins, faute de modélisation détaillée de ces processus, on préférera ne pas considérer les prélèvements**, afin de limiter l'incertitude des résultats. L'étude conduite par le BRGM pour mieux connaître la nappe du Forez en rive droite de la Loire permettra peut-être d'apporter des pistes de réponse ; en l'état, l'étude souligne que les limites de la nappe sont mal connues et les prélèvements difficiles à affecter à un réservoir ou à un autre...
- Les prélèvements en retenues déconnectées du cours d'eau sont considérés comme impactant la ressource superficielle mais en période hivernale, lors du remplissage de la retenue. Idem pour le volume de perte par évaporation, il impactera la ressource en période hivernale. **Point « incertitude »** : on considère, compte tenu du contexte géologique du bassin et des pratiques identifiées, que les retenues déconnectées sont alimentées en hiver par un prélèvement dans les eaux superficielles et non souterraines. On ne peut pas identifier les plans d'eau mis en transparence durant la période estivale, car la donnée n'est pas renseignée dans les bases. C'est une incertitude importante à l'échelle de l'usage plans d'eau.

### L'affectation des points de prélèvement à un type de ressource s'est opérée de cette manière :

1. Reprise par défaut de l'information sur la ressource sollicitée dans la base de données des prélèvements de l'Agence de l'eau ;
2. Modification des certaines informations, en particulier pour les prélèvements AEP, au regard des éléments issus des RPQS, des études adéquation besoins-ressources et des échanges en COTECH. Certains prélèvements identifiés en nappe profonde ont été modifiés et réaffectés comme étant de prélèvements en nappe alluviale ou en source ;
3. Pour les prélèvements dont la ressource sollicitée est « inconnue » (en particulier pour les prélèvements d'irrigation), nous avons opéré un croisement avec les données de la DDT qui précise s'il s'agit de prélèvement souterrain ou superficiel. Le soubassement géologique (socle ou plaine du Forez) a également été considéré pour distinguer des prélèvements sur source ou en nappe.
4. Pour les prélèvements que nous n'avons pas réussi à affecter à partir des données de la DDT et pour les prélèvements en nappe alluviale, une bande tampon a été dessinée autour du réseau hydrographique, plus ou moins importante selon le rang du cours d'eau. Les prélèvements situés dans cette zone ont été considérés comme impactant les eaux superficielles (cours d'eau ou nappe alluviale).

Cette méthode a également été employée pour la détermination de la connexion ou non des plans d'eau aux cours d'eau, quand cette information n'est pas renseignée (soit tout le bassin hors département 69).

## 5.2. Origine des données sur les usages et répartition journalière

L'ensemble des données d'usage ont été agglomérées. Les données, souvent annuelles et parfois mensuelles, ont été ramenées à un pas de temps journalier. Les données mobilisées et hypothèses de mise au pas de temps journalier sont synthétisées par catégorie d'usage ci-après.

### 5.2.1. Alimentation en eau potable

Les prélèvements d'eau potable dans les barrages ont été traités dans le volet « barrage ». Des données précises (quotidiennes ou mensuelles) de ces prélèvements ont été transmises, car nécessaires pour traduire le fonctionnement des barrages.

Les autres prélèvements d'eau potable sont issus de la couche de prélèvement de l'Agence de l'eau consolidée à partir des données locales (RPQS, transmission de données par les syndicats, ...). Ainsi des affectations d'usage et le positionnement de nombreux points de prélèvement ont été corrigés.

La chronique débute en 1998, bien l'incertitude sur la robustesse des données avant 2008 soit importante.

La mensualisation des volumes annuels a été opérée à partir des données collectées auprès des syndicats d'eau potable, mais la plupart du temps les données mensuelles n'ont pu être transmises.

Dans ce cas, le prélèvement annuel a été divisé par 12 et un coefficient de répartition a été appliqué pour rendre compte d'une légère augmentation des consommations en été (coefficient 1.2 pour juillet et août).

Ensuite, les prélèvements mensuels ont été divisés par le nombre de jours du mois.

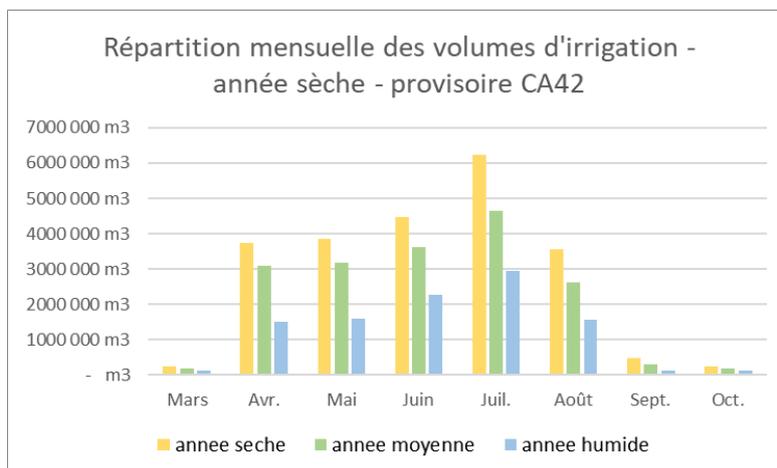
## 5.2.2. Irrigation

Les prélèvements d'irrigation ont été traités à partir des données de l'Agence de l'eau. Ces données comportent probablement une part d'incertitude : non prise en compte des prélèvements sous les seuils de déclaration, mutualisation de prélèvements, erreurs de déclarations... Cependant, elles permettent de localiser les prélèvements et renseigner, pour une partie d'entre eux, sur l'origine de la ressource sollicitée. Les prélèvements réalisés à partir du canal du Forez ont bien été affectés à la Loire. Un travail de recoupement entre les données de redevance de l'Agence et les données du canal du Forez a été opéré, en lien avec les équipes techniques du canal, pour s'assurer de leur robustesse.

Les volumes globaux annuels de ces dernières années correspondent globalement aux volumes estimés par la chambre d'agriculture dans le cadre de l'étude prospective, bien que la répartition des zones de prélèvements diverge ; mais l'étude de la chambre ne portait pas sur l'origine de la ressource sollicitée.

Les données de la DDT 42 font état d'un nombre important de prélèvements autorisés, sans volume associé, et dont on ne sait pas s'ils sont effectifs ou non. Il a semblé plus sûr de se reporter aux données de prélèvements de l'Agence de l'eau.

La répartition mensuelle de ces volumes a été opérée à partir des travaux réalisés par la Chambre d'Agriculture au sein de son étude prospective sur l'évolution des besoins en eau agricoles.



Ensuite, les prélèvements mensuels ont été divisés par le nombre de jours du mois.

## 5.3. Abreuvement

Les prélèvements liés à l'abreuvement ont été estimés par la chambre d'agriculture de la Loire dans le cadre de son étude prospective en cours sur l'évolution des besoins en eau agricoles.

Les estimations avaient été réalisés à l'échelle des unités de gestion, or dans le cadre des travaux de désinfluence les données doivent être traitées à l'échelle des sous bassins versants homogènes (échelle plus fine).

La répartition des données d'une unité de gestion entre les différents sous bassins homogènes qui la compose a été réalisée en fonction des pourcentages de surfaces en herbe.

Les données d'abreuvement sont produites par la chambre d'agriculture à l'échelle mensuelle, cette répartition a donc été reprise. Issue d'échanges avec les techniciens de la chambre, la donnée est robuste.

#### **Ressource en eau mobilisée :**

La chambre a estimé à 5% le recours au réseau d'eau potable pour l'abreuvement du bétail. Cette valeur a été reprise. Elle comporte une part d'incertitude car varie selon les secteurs du bassin, type d'élevage, etc. Sur certains secteurs le recours à l'eau potable pourrait être plus important.

Les prélèvements en milieu naturel sont considérés comme étant effectués en cours d'eau exclusivement. L'activité d'élevage est plus concentrée sur les zones de socle de bassin, au sein desquelles il n'y pas de nappe capacitive, d'où le choix de considérer ces prélèvements comme impactant les eaux superficielles.

### 5.3.1. Industrie

Les données mobilisées sont celles de la base redevances de l'Agence de l'eau.

La mensualisation a été réalisée à partir des données transmises par certaines industries (au nombre de 5), à défaut, le volume annuel a été réparti sur 12 mois, puis divisé par le nombre de jours du mois.

### 5.3.2. Evaporation plans d'eau

La méthodologie visant à qualifier l'impact des plans d'eau est différente selon que le plan d'eau est connecté ou non à un cours d'eau. Dans les deux cas, la méthode de calcul de la perte par évaporation est utilisée pour estimer les pertes en eau liées à leur présence. Ainsi, il n'est pas nécessaire de connaître le volume du plan d'eau, mais seulement sa surface.

Dans un 1<sup>er</sup> temps, une couche des plans d'eau a été reconstituée, en reprenant les données des DDT (couche « point » que nous avons redigitalisée afin de disposer de la surface des plans d'eau) et des référentiels (BT Topage, ...). L'attribut de connexion / déconnexion des plans d'eau a été renseigné en fonction de la distance des plans d'eau au cours d'eau (bande tampon dont la taille varie selon le rang du cours d'eau). Les plans d'eau alimentés par ruissellement (retenues collinaires) ont été identifiés comme « déconnectés » lorsqu'éloignés de la bande tampon proche des linéaires de cours d'eau (BD Cartage). L'attribut connexion / déconnexion n'est pas repris au sens réglementaire mais nous permet d'identifier les plans d'eau alimentés directement par le cours d'eau par remplissage direct (plan d'eau sur cours d'eau) ou dérivation ; à l'opposé de ceux alimentés en période hivernale par prélèvement et de ceux alimentés par ruissellement (retenues collinaires).

**Les pertes en eau correspondent aux volumes nets évaporés.** Nous avons repris la valeur d'ETP journalière SAFRAN (en l'absence de consensus ou de mesure terrain, c'est cette valeur d'évaporation

qui est retenue dans les travaux scientifique sur les plans d'eau), puis retranchés au pas de temps quotidien les volumes de précipitations journalières (qui certains jours compensent les pertes par évaporation) et multiplié cette valeur par la surface du plan d'eau. **On considère que le prélèvement en eau pour l'évaporation a lieu dès lors que le cumul d'ETP est supérieur aux précipitations.**

Les volumes d'évaporation des plans d'eau connectés sont considérés comme impactant la ressource superficielle **toute l'année**. Les volumes journaliers d'évaporation nette sont ainsi affectés au calcul de désinfluence des débits.

Les volumes d'évaporation des plans d'eau « déconnectés » ou alimentés par le ruissellement sont comptabilisés sur toute l'année, y compris l'été, mais **sont considérés comme impactant la ressource superficielle en période hivernale** (= lors de la remise à niveau du plan d'eau). Ils sont affectés au calcul de désinfluence des débits sur la période hivernale (novembre-mars).

**Point « incertitude » :** On ne peut pas distinguer précisément les plans d'eau qui seraient déconnectés du cours d'eau ou mis en transparence pendant l'étiage faute de données de caractérisation des plans d'eau. L'incertitude induite sur le volet « plans d'eau » peut être importante. Afin de réduire cette incertitude, il faudra savoir précisément quel est le mode d'alimentation des retenues et leur mode de gestion (déconnectée ou non, ...), ce qui nécessite d'engager des moyens sur le terrain. Cette estimation de la pression des plans d'eau sur l'hydrologie peut être vue comme une 1<sup>ère</sup> approche à l'échelle du SAGE, qui méritera à être affinée en fonction des données collectées.

### 5.3.3. Rejet des stations d'épuration

Plusieurs types de données et hypothèses ont été mobilisées pour traiter des rejets de station d'épuration.

- Lorsqu'elles étaient disponibles, **les données d'autosurveillance ont été mobilisées**. Cela concerne les plus grosses stations du périmètre. Seules les données A4, c'est-à-dire les données de sortie de station des effluents traités ont été prises en compte. D'expérience, il ne faut pas prendre en compte les déversements d'eau pluviales (déversoirs du réseau de collecte ou by-pass) dans les rejets, car les volumes peuvent être conséquents et répartis au pas de temps mensuel puis journaliers ils faussent complètement les calculs de désinfluence des débits. Aussi, une large partie de ces eaux pluviales aurait sûrement rejoint les eaux superficielles.

**Les données d'autosurveillance communiquées débutent en 2016.** Nous avons repris les valeurs de cette année et l'avons appliqué aux années précédentes.

- En l'absence de données d'autosurveillance, les suivis 24h transmis par les services du département de la Loire ont été mobilisées.
- En l'absence de suivi 24h, c'est la donnée des équivalents habitants qui a été mobilisée, en lui affectant une hypothèse de rejet par équivalent habitant (120l/s).

La date d'ouverture de la station a été prise en compte dans les calculs.

Les données produites par les différentes méthodes sont cohérentes entre elles.

### 5.3.4. Rejets industriels

La base de données GEREP, qui répertorie les rejets industriels, ne bancarise des données que pour les années 2019 et 2020, et semble ne pas être exhaustive.

Nous avons donc estimé des coefficients de rejets directs en cours d'eau à partir des volumes prélevés, appliqués ensuite à toutes les industries du même type qui prélèvent en direct.

### 5.3.5. Barrages

**La méthodologie est détaillée en partie suivante.**

Ont été étudiés de manière détaillée les barrages suivants :

- Rouchain et Chartain sur le Renaison ;
- Le Pas du Riot sur le Furan. Le gouffre d'Enfer, situé sur le Furan, n'a pas été considéré, car il n'a plus d'usage aujourd'hui. Les années où il était en service ne doivent donc pas être considérées ;
- Le barrage des Plats sur la Semène ;
- Le barrage du Cotatay sur un affluent de l'Ondaine ;
- Le barrage de l'Ondenon sur un affluent de l'Ondaine ;
- Le barrage de l'Echapre sur un affluent de l'Ondaine ;

Le barrage de l'Echancieux sur le Gantet (affluent du Gand, bassin versant du Rhins) n'a pas été étudié faute de données disponibles. Il n'a plus d'usage d'alimentation en eau potable depuis 2023.

Après le test de plusieurs méthodologies, il n'a cependant pas été possible de désinfluencer les débits de l'Ondaine, de la Semène et du Furan, faute de suivi suffisant complet et permettant de rendre compte au pas de temps journalier du fonctionnement du barrage. Seul le Renaison a pu être désinfluencé.

### 5.3.6. Etangs piscicoles

L'alimentation en eau des étangs de la plaque de Montbrison est comptabilisée au travers un prélèvement par alimentation gravitaire du canal du Forez, qui dessert également d'autres usages. Les autres étangs (plaques d'Arthun et de Feurs) sont alimentés par les eaux de ruissellement, en période hivernale ; et ont été considérés dans les calculs des pertes en eau des plans d'eau « déconnectés » pour le travail de désinfluence.

## 5.4. Cas particulier des barrages

**De nombreux barrages influencent les régimes hydrologiques des cours d'eau** du bassin versant : sur le Renaison, le Furan, la Semène, L'Ondaine. Il s'agit de barrages destinés à l'alimentation en eau potable. Pour désinfluencer les débits à l'exutoire des bassins / au niveau de la station hydrométrique, il faut donc approcher au pas de temps journalier le fonctionnement du barrage et estimer son impact : soutien des débits ou interception des écoulements.

Disposer de données au pas de temps journalier est indispensable pour limiter les approximations et donc les incertitudes : contrairement aux autres usages, les valeurs de stockage / déstockage sont extrêmement variables d'un jour à l'autre.

### 5.4.1. Données disponibles et fonctionnement du barrage

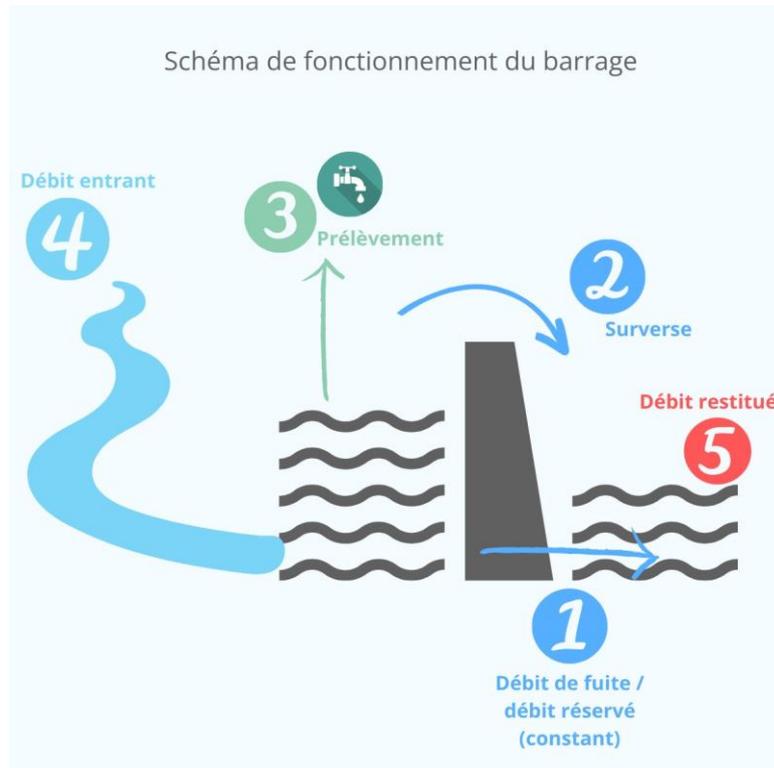
Plusieurs types de données ont été transmises par les gestionnaires de barrage (la Roannaise de l'eau et Saint Etienne Métropole), avec qui nous avons également plus échangé sur le fonctionnement des barrages :

- Jaugeage journalier des débits entrants de certains cours d'eau (sur les barrages du Renaison uniquement) ;
- Variation de volume journalier du barrage et variation de la cote du barrage ;
- Prélèvement journalier (AEP / autre) ;
- Surverse journalière.

L'examen des données a montré que :

- **Les débits jaugés entrant sur les barrages du Renaison ne doivent pas être mobilisés pour les calculs.** Ils sous estiment très largement les débits entrants dans les barrages. Ce point avait déjà été identifié dans les travaux de l'étude ABR du Renaison, mais dans une bien moindre mesure : l'étude identifiait un écart de 20 à 40%. Nos calculs montrent des écarts bienb plus importants sur le barrage de Chartrain en période de basses eaux. Les gestionnaires du barrage ont pu noter que les jaugeages journaliers comportaient des biais et qu'il ne fallait pas s'y fier pour travailler sur le fonctionnement du barrage : pas de prise en compte de certains ruisseaux très contributifs lors des épisodes d'orage ; écoulement sub-surface ; mesure journalière unique qui peut ne pas rendre compte de l'évolution journalière du débit ;
- Certaines valeurs aberrantes et erreurs se glissent dans les chroniques de donnée journalières, **elles ont été manuellement identifiées et supprimées** ;
- Certains barrages ne disposaient pas de données quotidiennes sur certaines périodes. Les données ont alors été **interpolées** afin de reconstituer la chronique quotidienne ;
- Les données transmises par SEM concernant les barrages de la Semène, de L'Ondaine et de du Furan sont incomplètes et **ne permettent pas de reconstituer finement le fonctionnement du barrage**. En particulier, il n'est pas possible, avec les données disponibles, de reconstituer fidèlement les débits entrants au pas de temps journalier ; en l'absence d'une chronique de mesure amont des débits entrants, les données de fonctionnement du barrage doivent être exhaustives et complète (outre la cote de l'ouvrage, tous les volumes en sortie doivent être connus).

Le schéma conceptuel du fonctionnement « classique » d'un barrage est le suivant :



1. Débit de fuite ou débit réservé,  $Q_{\text{réservé}}$
2. Débit de surverse,  $Q_{\text{deversé}}$
3. Débit prélevé pour l'AEP,  $Q_{\text{prélevé}}$
4. Débit entrant,  $Q_{\text{entrant}}$
5. Débit restitué, influencé,  $Q_{\text{sortant}}$

**\* Q = débit**

D'autres types de prélèvements / transferts d'eau sont identifiés sur les barrages. Il a été considéré que les rejets de vanne de fonds, les débits turbinés et le by pass sont à considérer dans les formules comme le débit réservé. Les débits de purge et de la bouche incendie ont quant à eux été considérés comme des débits prélevés.

**Trois types de « fonctionnement » du barrage sont possibles :**

- Si surverse, le barrage est **transparent** : le débit sortant correspond au débit entrant.  
Le barrage est également **transparent** lorsqu'il n'y a pas de surverse et que  $\frac{\Delta V}{\Delta t} = 0$
- Si pas de surverse et  $\frac{\Delta V}{\Delta t} > 0$  alors le barrage est en phase de **stockage**
- Si pas de surverse et  $\frac{\Delta V}{\Delta t} < 0$  alors le barrage est en phase de **déstockage**

## 5.4.2. Quantification des influences du barrage

Plusieurs étapes sont nécessaires avant de mesurer l'influence du barrage et d'injecter ces volumes dans le calcul de désinfluence en aval du bassin versant.

### 5.4.2.1. L'estimation des débits entrants dans le barrage

Le débit (théorique !) tel qu'il serait « mesuré » au niveau du site en l'absence du barrage correspond au débit entrant naturel.

Il s'agit donc d'estimer ce débit entrant à partir de la variation de stock du barrage. Ce débit entrant se calcule différemment selon qu'il y ait surverse ou qu'il n'y ait pas surverse :

- Si **surverse** alors  $Q_{\text{deversé}} > 0$  alors  $Q_{\text{entrant}} = Q_{\text{réservé}} + Q_{\text{deversé}} + Q_{\text{prélevé}}$
- Si **pas de surverse**  $Q_{\text{deversé}} = 0$  alors  $Q_{\text{entrant}} = \frac{\Delta V}{\Delta t} + Q_{\text{réservé}} + Q_{\text{prélevé}}$



Il faut regarder la variation de volume du barrage entre J1 et J2 et traduire cette variation en débit.

**Si la méthode est correcte en théorie, elle se heurte dans l'application aux erreurs et approximations des mesures effectuées sur les barrages, qui engendrent des chaînes d'incertitudes. En faible débit, cela peut notamment engendrer une reconstitution de débits entrants inférieure à zéro, à des périodes ou ce pas possible au vu de l'ensemble des données.**

Des corrections spécifiques ont donc été effectuées.

### Correction du débit entrant sur les barrages du Renaison

Sur les barrages du Renaison, situés sur un petit bassin peu influencé en dehors des barrages, les données de fonctionnement du barrage ont été corrigées en examinant les données à la station hydrométrique située en aval des barrages.

La comparaison avec les débits à la station sur les années disposant d'un suivi complet (2013, 2015, 2016 et 2017) ont permis de supprimer les valeurs aberrantes de rendre cohérente l'ensemble de l'équation, en l'occurrence il s'agit de ne pas avoir de débits entrants inférieurs à zéro (lorsque les débits entrants sont très faibles, les petites erreurs ou approximations dans les données de suivi des barrages peuvent engendrer ce type de résultat).

Ce travail a également permis d'estimer la gamme d'erreur sur les débits entrants mesurés par jaugeage quotidien par la Roannaise de l'eau. **Un coefficient de proportionnalité a donc été calculé en période de bas débit entre les débits entrants fournis et les débits entrants calculés** sur les années 2013, 2015, 2016 et 2017. Pour le barrage de Chartain, le coefficient à appliquer sur les données fournies est de 1,3. Pour Rouchain, il est de 5.

Ainsi, pour les années ne disposant pas de suivi hydrométrique, lorsque le débit entrant calculé est inférieur à zéro en été, ce qui est une erreur, les débits entrants et le coefficient de correction ont été repris.

Lorsque  $Q_e < 0$  :  $Q_e = \text{Débits entrants fournis} * C$

avec  $C$  un coefficient de proportionnalité entre les bas débits entrants fournis et le débits entrants calculés sur les années 2013, 2015, 2016 et 2017

Pour le barrage Chartrain,  $C = 1,3$

Pour le barrage Rouchain,  $C = 5$

#### 5.4.2.2. L'estimation des débits restitués par les barrages (= influencés)

Pour intégrer les influences du barrage à l'échelle du bassin, il faut pouvoir comparer le débit entrant estimé et le débit sortant (débit restitué par le barrage).

Le débit sortant est estimé différemment s'il y a surverse ou non :

- Si **surverse** alors  $Q_{\text{deversé}} > 0$  et  $Q_{\text{sortant}} = 1 + 2$
- Si **pas de surverse** alors  $Q_{\text{deversé}} = 0$  alors  $Q_{\text{sortant}} = 1$

#### 5.4.2.3. La quantification de l'influence

L'influence du barrage, qui peut être positive (déstockage, et donc soutien des débits) ou négative (stockage, soustraction de débits), doit être estimée pour être injectée dans le calcul de désinfluence au niveau de la station hydrométrique en aval du sous bassin versant étudiée.

L'impact du barrage correspond à la différence entre  $Q_{\text{entrant}}$  et le  $Q_{\text{sortant}}$

#### 5.4.2.4. L'impossible caractérisation de l'impact des barrages sur le Furan, la Semène et l'Ondaine.

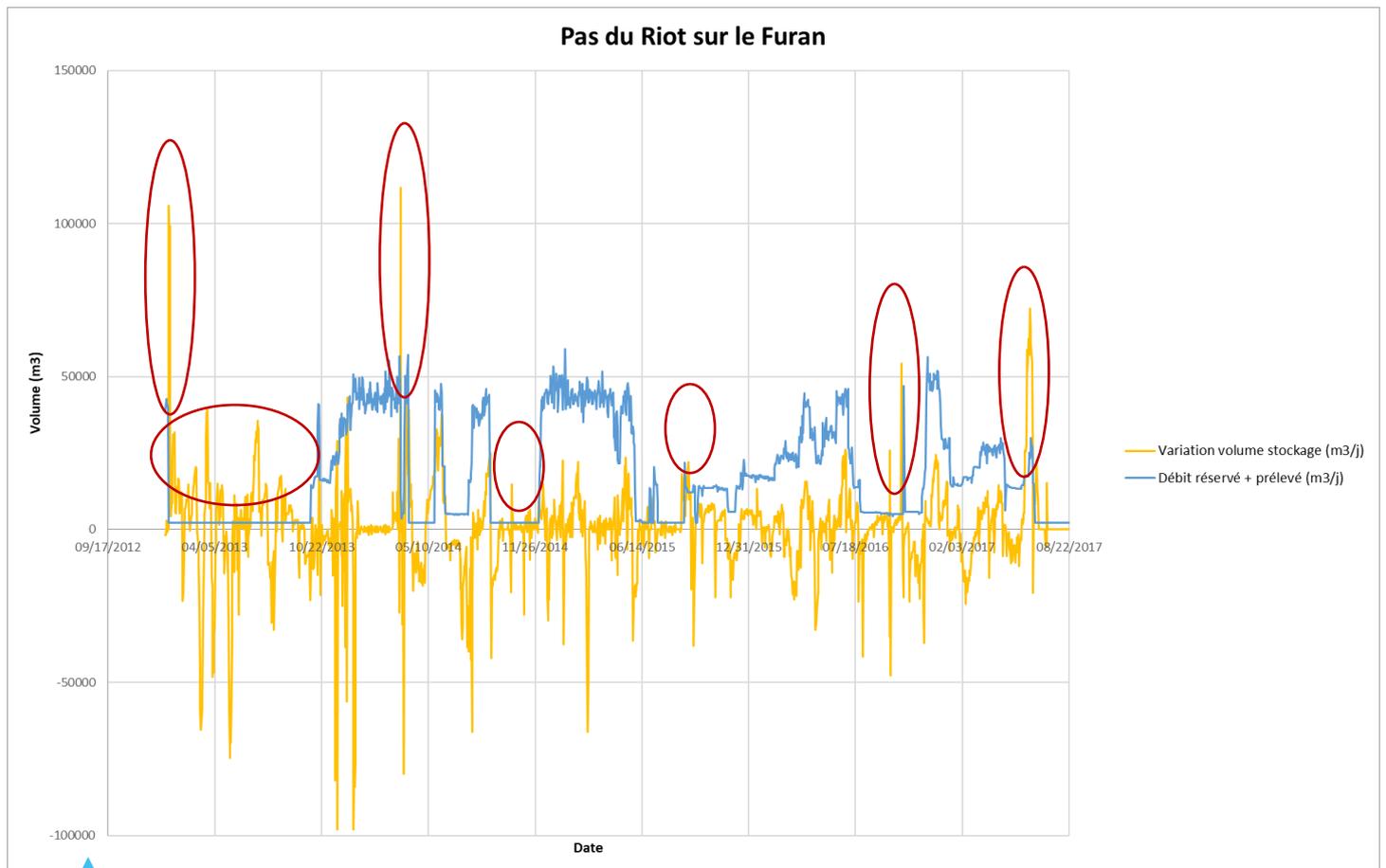
**La caractérisation des débits entrants sur ces bassins a été rendue difficile par l'absence de suivi amont du barrage et par des problèmes avec la loi de surverse des barrages.**

En effet pour ces barrages, nous n'avons ni le débit entrant, ni le débit restitué, la loi de surverse est fautive sur certains ouvrages et le débit réservé est considéré comme constant alors que l'examen du stock du barrage montre que ce n'est pas le cas.

Nous nous sommes rendu compte au fur et à mesure des calculs que la désinfluence des débits avec ces données produisait des valeurs aberrantes (débits négatifs, etc...). En effet, faute de débits entrants, nous avons indispensablement besoin, pour traduire l'impact du barrage, de connaître sa variation de stock ET les débits qu'il restitue. **Les données de suivi ne rendent cependant compte que d'une partie seulement des volumes restitués, rendant impossible l'application de notre méthodologie.**

Sur le Pas du Riot par exemple, on ne connaît pas précisément la surverse, la loi de surverse étant erronée. On ne connaît pas non plus les volumes sortant par la prise/vanne de fond lorsqu'ils sont supérieurs aux débits réservés. **Ainsi lors des chasses ou vidanges on observe une variation du volume**

**stocké par le barrage qui ne se traduit pas par une évolution des restitutions.** C'est illustré par le graphique ci-dessous qui compare les volumes « soustraits » au barrage et les volumes restitués & prélevés. Les volumes « soustraits » au barrage que l'on calcule avec la variation ne peuvent, en toute logique, pas être inférieurs aux débits restitués et prélevés. C'est pourtant ce que l'on observe à de multiples reprises sur le Pas du Riot, parce que le calcul des débits restitués est incomplet. Et même si cette erreur est parfois masquée en raison de débits entrants importants, elle est présente sur l'ensemble des chroniques.



*Attention, en jaune, nous avons inversé les signes des valeurs. Ainsi quand la variation de volume est négative, la valeur est indiquée positivement dans le graphique, afin de comparer avec les volumes restitués, en bleu.*

**Il est impossible de reconstituer l'impact journalier des barrages et donc les débits désinfluencés sur les 3 unités de gestion suivantes : Pas du Riot, Semène et Ondaine.** Les études ABR n'avaient par ailleurs pu qu'approcher un fonctionnement « théorique » du barrage à partir des données moyennées de prélèvement et de débit réservé.

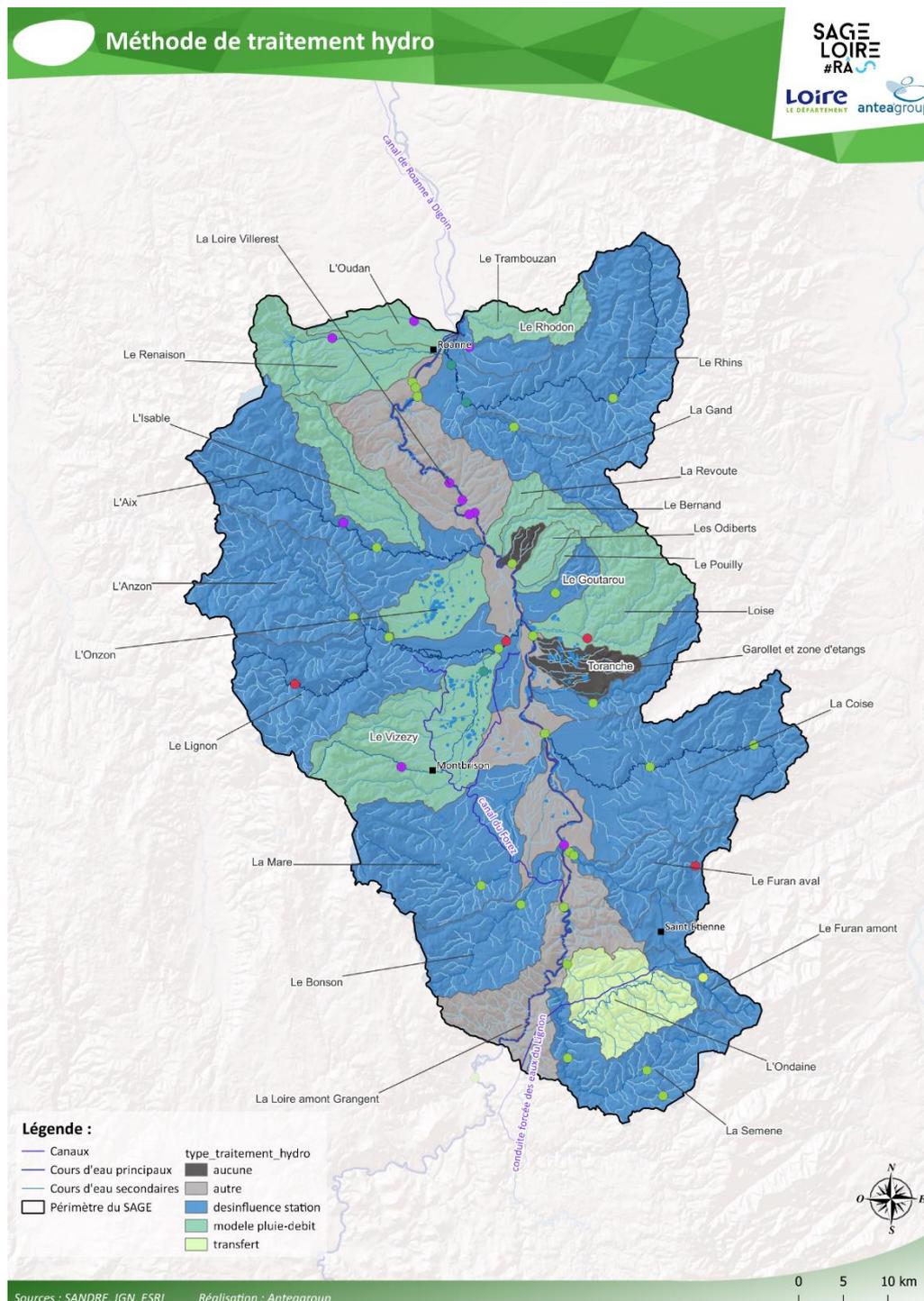
#### **Alternative méthodologique :**

A défaut, nous avons testé un modèle pluie-débit au droit des stations hydrométriques, à partir des paramètres de calage de l'INRAE, pour avoir des ordres de grandeur de comparaison avec les débits influencés. Les résultats n'ont pas été satisfaisant car les paramètres de calage incluent l'influence des stations hydrométriques et ne permettent pas de visualiser les effets d'un soutien d'étiage du barrage.

## 5.5. La désinfluence des débits par sous bassin

Comme vu en introduction, 3 méthodes ont été mobilisées pour désinfluencer les débits :

- La méthode arithmétique, avec une désinfluence à la station hydrométrique
- La modélisation pluie-débit, pour les bassins non instrumentés
- Le transfert de débit, appliqué uniquement sur l'Ondaine à partir de la station de la Semène, en corrigeant les données à partir des mesures 2019-2020 de la récente station mise en place sur l'Ondaine.



## La désinfluence arithmétique

Sur les secteurs disposant d'une station hydrométrique, les débits ont été désinfluencés en retranchant aux débits journaliers les rejets qui soutiennent le débit du cours d'eau et en ajoutant les prélèvements qui soustraient de l'eau.

L'équation de désinfluence est la suivante :

$$Q_{nat} = Q_{obs} + V_{prélevé} AEP + V_{prélevé} Irrigation + V_{prélevé} Industrie + V_{prélevé} Plans\ Eau\ (connectés / déconnectés) + V_{prélevé} Abreuvement + V_{prélevé} Barrages) - ( V_{rejets} Industriels + V_{rejets} Assainissement\ Collectif + V_{rejets} Barrages)$$

**Débit désinfluencé = débit mesuré + prelev AEP, irrigation, abreuvement, industrie, stockage barrages – rejets indus, assainissement, et déstockage barrages**

Seuls les prélèvements situés à l'échelle des bassins versants de stations hydrométriques ont été pris en compte pour le travail de désinfluence.

**Le calcul est réalisé au pas de temps journalier sur la chronique 2000-2020.** Les débits sont ensuite transférés en fermeture de bassin versant pour avoir une estimation des débits pseudo-naturels à l'échelle de l'ensemble du sous bassin versant homogène.

### Point sur les incertitudes

Deux incertitudes importantes sont identifiées à ce stade :

→ **La traduction des prélèvements annuels en prélèvements journaliers**, souvent opérée par répartition arithmétique. Elle peut masquer des variations soudaines des prélèvements et des rejets. Néanmoins, les prélèvements les plus « saisonniers », que sont l'irrigation et l'abreuvement, ont été mensualisés grâce aux travaux de la chambre d'agriculture, ce qui limite l'incertitude globale ;

→ **Les chroniques de données sur les usages ne sont pas forcément complètes sur les 2 décennies étudiées.** Des hypothèses ont permis d'interpoler les données, mais l'incertitude peut être importante et les manques difficiles à détecter. Pour l'assainissement, les données d'auto-surveillance de 2016 ont été reprises et appliquées aux années précédentes. Pour l'eau potable, les données de l'année la proche ont été mobilisées pour remplir les années sans données (mais pas indiquées à « zéro prélèvement »). Pour l'abreuvement, on n'a pas considéré d'évolution du cheptel, les données sont constantes. Pour les plans d'eau, on ne considère pas d'évolution de leur nombre, et on rappellera qu'on ne connaît pas précisément leur mode de gestion (connecté/ déconnecté).

Enfin, les prélèvements domestiques, en dessous des seuils de déclaration, n'ont pas été considérés pour l'étude. Mais des travaux spécifiques, menés par exemple sur le SAGE de l'est Lyonnais, ont montré que l'impact de ces prélèvements était **négligeable sur l'hydrologie**.

### Sur les secteurs sans station hydrométrique :

En plus des incertitudes sur la qualification des usages (voir page précédente), **s'ajoute l'incertitude sur la validité des débits modélisés, que nous ne pouvons pas quantifier.** La comparaison des résultats des modèles avec les chroniques influencées sur les bassins instrumentés montre néanmoins de bonnes performances, sauf pour la retranscription des épisodes de crue.

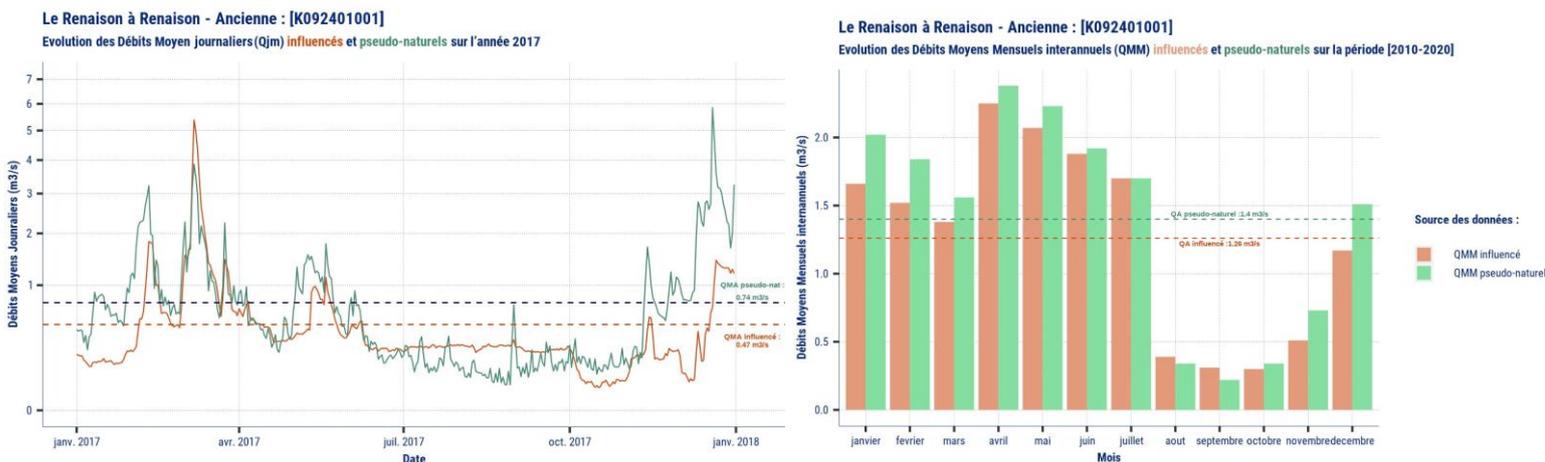
## 5.6. Synthèse des résultats de désinfluence

Les résultats sont détaillés dans les fiches unité de gestion ; il s'agit ici de synthétiser les résultats à l'échelle du SAGE LRA.

Les résultats ont été produits à deux échelles :

- **L'échelle des stations hydrométriques**, sur lesquelles la désinfluence arithmétique a été opérée ;
- **L'échelle des exutoires de bassin versant**, au travers un transfert de débit désinfluencé de la station vers l'exutoire. Une réinfluence a été opérée pour établir la comparaison entre débits influencés et désinfluencés.

Aussi, les débits désinfluencés et influencés ont été traduits en indicateurs hydrologiques annuels afin de les comparer plus facilement. Il est en particulier intéressant d'observer l'évolution du débit moyen et des débits d'étiage, ici représentés par le QMNA (débit mensuel minimal annuel). Les régimes désinfluencés moyens à l'échelle mensuelle et à l'échelle journalière sont également renseignés pour chaque station hydrométriques et présentés dans les fiches UG. *Exemple sur le Renaison :*



### 5.6.1. Comparaison du module influencé et désinfluencé

*Cartographie des résultats en double page suivante.*

**A l'échelle des stations hydrométrique**, les débits moyens désinfluencés sont supérieurs aux débits mesurés sur la plupart des bassins, sauf le Rhins, le Bonson, et le Vizezy qui bénéficient d'un phénomène de soutien d'étiage artificiel par le biais des rejets de stations d'épuration (alors que l'eau potable est importée depuis l'extérieur du bassin versant de la station hydrométrique).

**A l'échelle des exutoires de bassins versants**, les débits moyens pseudo-naturels sont supérieurs aux débits mesurés sur la plupart des bassins, sauf le Rhins, le Vizezy et la Mare.

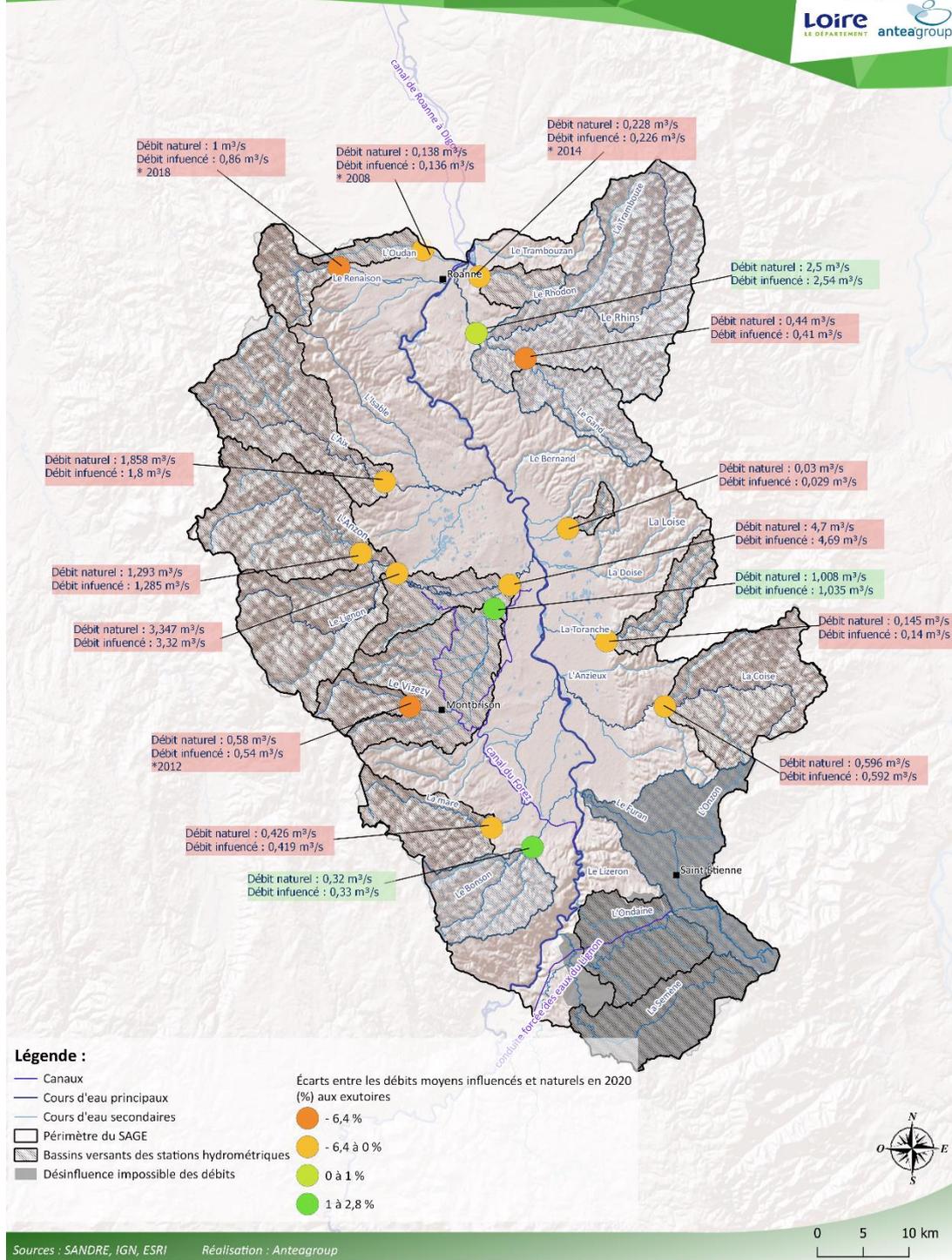
Certains des résultats différents l'échelle de la station hydrométrique et celle de l'exutoire, en raison de la présence d'usages en aval, situés entre la station hydrométrique et l'exutoire (prélèvement ou rejet important). Par exemple sur la Mare, avec la présence d'un rejet situé après la station hydrométrique, et sur le Bonson ou à l'inverse un prélèvement AEP important se situe après la station ; ce qui explique les résultats différents.

32

Comparaison des débits moyens (QMA) influencés et naturels en 2020 aux stations hydrométriques

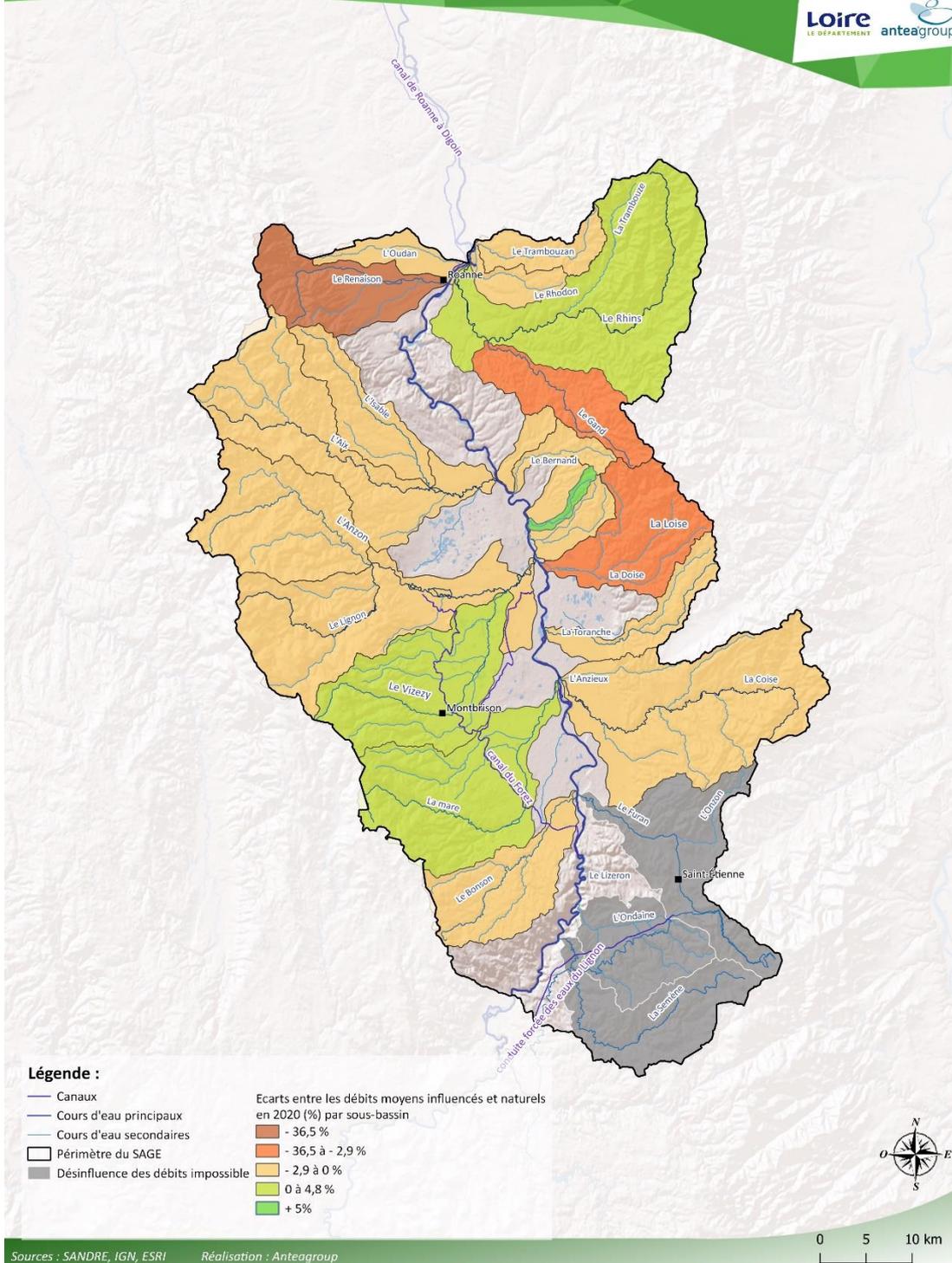
SAGE LOIRE #RA

Loire LE DÉPARTEMENT anteagroup



32b

Comparaison des débits moyens (QMA) influencés et pseudo-naturels en 2020 à l'exutoire des sous bassins



---

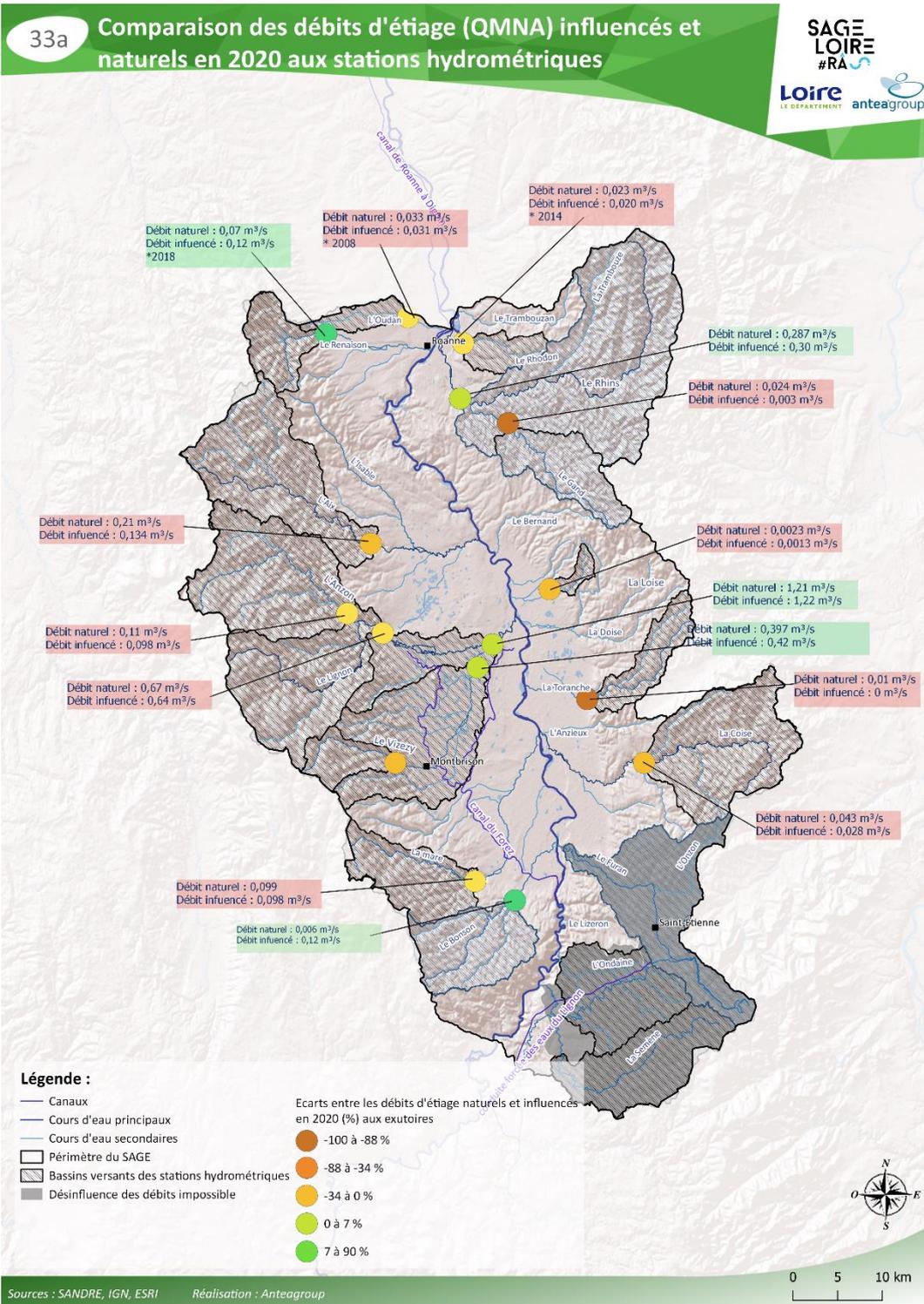
## 5.6.2. Comparaison en 2020 du QMNA influencé et désinfluencé

**A l'échelle des stations hydrométrique**, les tendances sont similaires entre les indicateurs d'étiage et les indicateurs de débits moyens : les débits influencés sont plus faibles que les débits désinfluencés sauf sur les stations du Rhins, le Lignon et le Bonson. Il y a une exception notable au niveau du **Renaison** : en raison de la présence des barrages, on note des prélèvements pour l'AEP importants (et exportés en partie), qui impactent le débit moyen ; en étiage cependant, avec les débits réservés permettent un soutien d'étiage du Renaison par les barrages.

Les travaux de désinfluence du Furan avaient montré que la tendance était similaire pour l'étiage ; et le suivi du Pas du Riot a montré un soutien d'étiage lors des étiages les plus sévère (2022 et dans une moindre mesure 2019).

On notera également que sur le périmètre les débits d'étiage sont très bas sur certains bassins, ainsi la comparaison entre les débits influencés et désinfluencés implique de comparer des très faibles débits à des très, très faibles débits : **les % d'écarts sont donc exacerbés.**

**A l'échelle des exutoires de bassins versants**, les débits moyens pseudo-naturels **sont supérieurs aux débits mesurés sur la plupart des bassins**, sauf les bassins du Rhins, du Vizezy et de la Mare, du fait d'un important soutien d'étiage par la station d'épuration, alors que l'eau potable est en partie importée, et le Renaison, avec le soutien d'étiage du barrage

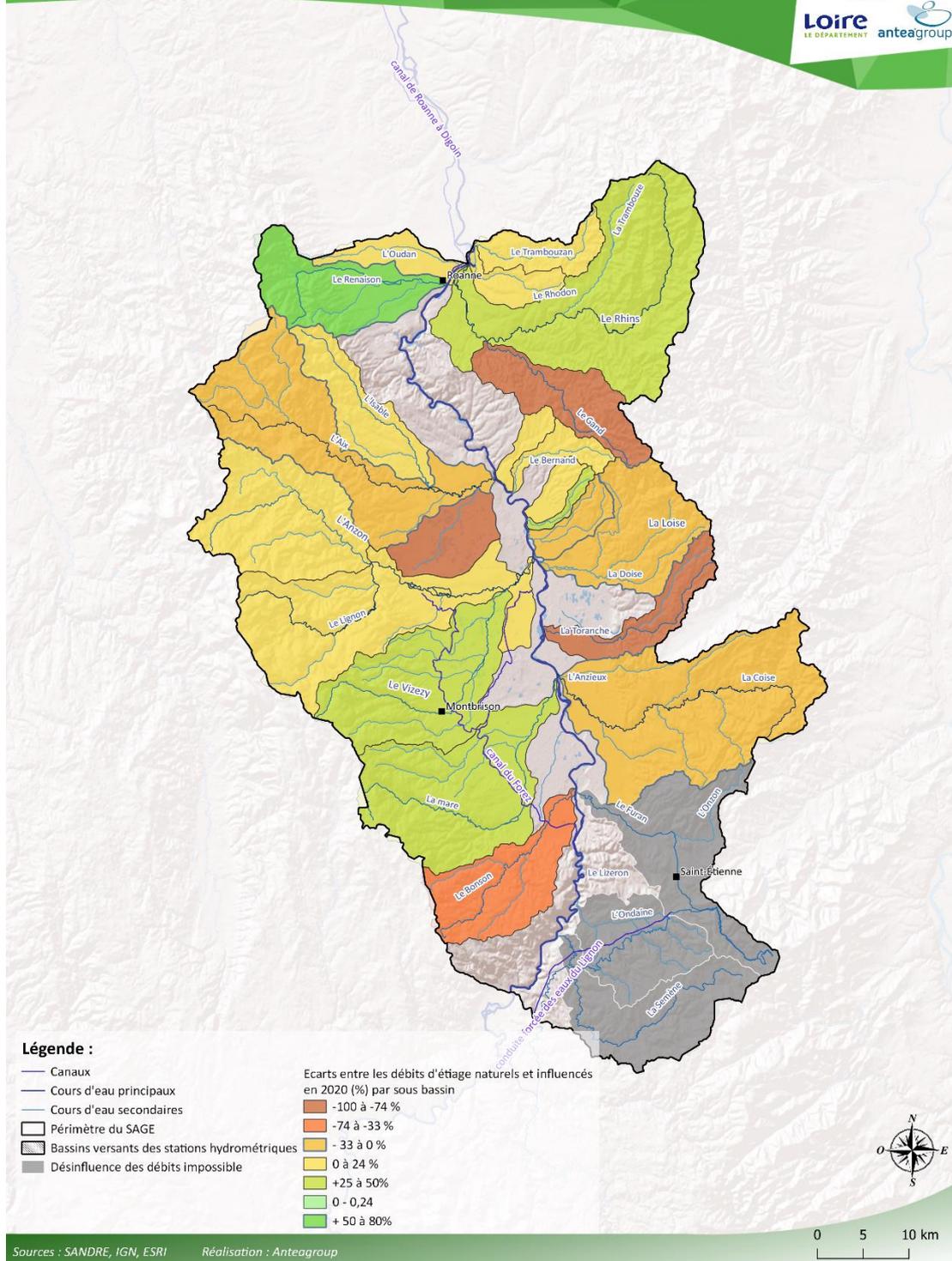


33b

Comparaison des débits d'étiage (QMNA) influencés et pseudo-naturels en 2020 à l'exutoire des sous bassins

SAGE LOIRE #RA

Loire LE DÉPARTEMENT anteagroup



## 6. Annexes

### Calendrier des chroniques de débit pour chacune des stations étudiées, 1990-2020.

Calendrier des chroniques de débit sur les stations du territoire  
Sur la période [1990-2020]

