

# Étude Hydrologie-Milieus- Usages-Climat (HMUC) du SAGE Estuaire de la Loire

## Rapport de phase 2

### « Cahier des méthodes »



Avec le soutien financier de :



Et l'accompagnement du bureau d'étude :



# SUIVI DE DOCUMENT

Rédacteur	Version	Objet	Date
ANTEA – JD	V0	Initialisation	07/2024
ANTEA – JD	V1	Prise en compte des retours de la maîtrise d'ouvrage	08/2024
ANTEA – JD	V2	Prise en compte des retours de la maîtrise d'ouvrage	09/2024

# SOMMAIRE

SOMMAIRE .....	3
TABLE DES FIGURES .....	5
TABLE DES TABLEAUX.....	7
INTRODUCTION.....	8
1. VOLET HYDRO(GÉO)LOGIE .....	9
1.1. MÉTHODE D'ÉVALUATION DES DÉBITS.....	10
1.1.1. La méthode RCH .....	10
1.1.2. La méthode LOIEAU.....	12
1.1.3. La méthode de transfert de bassin .....	14
1.1.4. Modélisation PLUIE -DEBIT (GR4J).....	15
1.1.5. La méthode d'agrégation.....	16
1.1.6. Déploiement des différentes méthodes à l'échelle du territoire d'étude.....	17
1.2. MÉTHODE D'ANALYSE DES DONNÉES HYDROLOGIQUES.....	17
1.2.1. L'analyse fréquentielle .....	17
1.2.2. L'analyse des débits classés .....	18
1.2.3. Le test de MANN KENDALL .....	18
1.2.4. Caractérisation de l'étiage .....	19
1.3. MÉTHODE D'ANALYSE DES DONNÉES PIÉZOMÉTRIQUES .....	20
1.3.1. Sélection des chroniques .....	20
1.3.2. Tendances .....	20
1.3.3. Corrélogramme .....	20
1.3.4. Périodogramme .....	21
1.3.5. Indice Piézométrique standardisé (IPS) .....	22
1.3.6. Sécheresse .....	22
2. VOLET MILIEU .....	24
2.1. MÉTHODE D'ÉVALUATION DES DÉBITS BIOLOGIQUES.....	25
2.1.1. Principe de fonctionnement des modèles de type microhabitats .....	25
2.1.2. LA Méthode EstimHAB.....	25
2.1.3. Choix des stations de débit biologique .....	28
2.1.4. Choix des espèces cibles.....	32
2.1.5. Campagnes de terrain .....	34
2.1.6. Détermination des bornes théoriques des débits biologiques.....	35
3. VOLET USAGE.....	38
3.1. ALIMENTATION EN EAU POTABLE.....	39
3.1.1. Données mobilisées et consolidation des volumes de prélèvements .....	39



3.1.2.	Descente d'échelle des volumes de prélèvements au pas de temps mensuel .....	39
3.1.3.	Gros consommateurs.....	43
3.2.	ASSAINISSEMENT COLLECTIF .....	43
3.2.1.	Données mobilisées et consolidation.....	43
3.2.2.	Estimation des volumes rejetés par les ouvrages d'assainissement collectif .....	45
3.3.	ASSAINISSEMENT NON COLLECTIF (ANC).....	46
3.4.	AGRICULTURE - IRRIGATION.....	49
3.4.1.	Constitution d'une couche points de prélèvements irrigation harmonisée.....	49
3.4.2.	Attribution des volumes de prélèvements .....	54
3.4.3.	Estimation des volumes non déclarés.....	55
3.4.4.	Répartition mensuelle des volumes annuels de prélèvement .....	55
3.5.	AGRICULTURE – ABREUVEMENT DES CHEPTELS.....	57
3.5.1.	Données mobilisées et consolidation.....	57
3.5.2.	Consommation des cheptels.....	64
3.6.	INDUSTRIES & AUTRES ACTIVITÉS ÉCONOMIQUES.....	66
3.6.1.	PRÉLÈVEMENTS EN EAU.....	66
3.6.2.	RESTITUTIONS.....	67
3.7.	PRÉLÈVEMENTS INDUITS PAR L'ÉVAPORATION DES PLANS D'EAU .....	67
3.7.1.	Constitution d'une couche plan d'eau harmonisée .....	67
3.7.2.	Attribution du caractère connecté aux plans d'eau .....	68
3.7.3.	Identification des plans d'eau de marais.....	71
3.7.4.	Association d'un poste Météo France de référence aux plans d'eau .....	73
3.7.5.	Calcul des prélèvements induits par l'évaporation.....	74
3.8.	AUTRES PRÉLÈVEMENTS.....	76
3.8.1.	Alimentation du canal de Nantes à Brest.....	76
3.8.2.	Alimentation du marais Breton .....	76
4.	VOLET CLIMAT .....	77
4.1.	CARACTÉRISATION DU CLIMAT PASSÉ .....	78
4.1.1.	Les données du DIGITALIS SILVAE.....	78
4.1.2.	Les données Météo France.....	78
4.2.	CARACTÉRISATION DU CLIMAT FUTUR.....	80
4.2.1.	La chaîne de modélisation Hydroclimatique .....	80
4.2.2.	La chaîne de modélisation Explore 2 – SIM2 .....	81



## TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des stations RRP et des bassins donateurs .....	10
Figure 2 : Bassins « donateurs » (en bordeaux) et bassin receveur (en gris) .....	10
Figure 3 : Schéma explicatif de la méthode de régionalisation basée sur la proximité géographique .....	11
Figure 4 : Echantillon de BV utilisé pour le développement du modèle (gauche) et échantillon de validation (droite).....	13
Figure 5 : Schéma conceptuel d'un modèle GR .....	13
Figure 6 : Indices statistiques d'étiages calculés sur les 130 000 bassins versants de la base LoiEau .....	14
Figure 7 : Schéma de fonctionnement du modèle hydrologique journalier GR4J (Source : INRAE) .....	15
Figure 8 : Illustration de la méthode de reconstitution par agrégation.....	16
Figure 9 : Illustration de l'analyse fréquentielle des QMNA sur la Loire à Orléans .....	18
Figure 10 : Courbe des débits classés sur la Loire à Orléans (1964 – 2023) .....	18
Figure 11 : Représentation graphique de l'étiage annuel .....	19
Figure 12 : Exemple de corrélogramme .....	21
Figure 13 : Exemple de périodogramme .....	21
Figure 14 : Caractérisation d'un épisode de sécheresse par le IPS - Source : Rapport Climsec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Rapport final du projet (2011) .....	23
Figure 15 - Répartition des transects et des points de mesures du protocole ESTIMHAB.....	27
Figure 16 : Entités cibles .....	29
Figure 17 : Pré-localisation des 20 stations de débit biologique .....	30
Figure 18 : Localisation des 17 stations de mesures du débit biologique .....	32
Figure 19 : étude des populations piscicoles dans le cadre du choix des espèces cibles.....	33
Figure 20 : synoptique de définition des bornes de débit biologique .....	36
Figure 21 : Exemple de détermination des points DB1 et DB2 pour la truite et le barbeau ....	37
Figure 22 : Détermination de la source de données à mobiliser pour calculer le flux rejeté pour chaque ouvrage d'assainissement collectif et pour chaque année.....	44
Figure 23 : Disponibilités des données relatives à l'Assainissement Non Collectif (ANC).....	47
Figure 24 : Synoptique de rapprochement des différentes sources de données .....	49
Figure 25 : Points de prélèvements irrigation issus du croisement entre les données agence de l'eau Loire Bretagne et la Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE) ....	51
Figure 26 : Points de prélèvements connus de la DDTM44 et dont l'usage est caractérisé en tant que « Irrigation », « abreuvement » ou n'est pas connu .....	52
Figure 27 : Exemple d'identification de potentiels doublons entre les données [AELB/BNPE] et les données DDTM44.....	53
Figure 28 : Points de prélèvements connus de la DDT49 et dont l'usage est caractérisé à « Irrigation », « abreuvement » ou n'est pas connu .....	54
Figure 29 : Volumétrie des points de prélèvements irrigation par typologie de disponibilité de l'information de volume .....	54
Figure 30 : Synoptique d'attribution du volume de prélèvement pour les points irrigation.....	55
Figure 31 : Répartition mensuelle du volume annuel prélevé pour les points irrigation à vocation principale maraîchère.....	56
Figure 32 : Répartition mensuelle du volume d'irrigation pour des cultures classiques (maïs fourrage, grains, semences et autres cultures) .....	56
Figure 33 : Répartition mensuelle du volume pour le remplissage hivernal des retenues destinées à l'irrigation .....	57



Figure 34 : Entités de restitution des résultats de la BDNI.....	58
Figure 35 : Schéma de principe de l'attribution des données du recensement agricole à l'échelle des sous entités .....	63
Figure 36 : Ventilation mensuelle des besoins en eau d'abreuvement.....	66
Figure 37 : Découpage du bassin versant selon la méthode des polygones de Thiessen appliquée aux stations météorologiques avec ETP.....	74
Figure 38 : Illustration du changement d'échelle entre GCM et RCM.....	81
Figure 39 : Schéma de la chaine SIM (Source : Météo France).....	81



## TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Indices d'analyse du régime d'étiage .....	20
Tableau 2 : Classes d'IPS.....	22
Tableau 3 : Critères de découpage des bassins versant de gestion du SAGE .....	29
Tableau 4 : Espèces cibles retenues dans le cadre de la détermination des débits biologiques .....	33
Tableau 5 : Dates de réalisation des campagnes de terrain .....	34
Tableau 6 : Source et pas de temps des données AEP collectées .....	41
Tableau 7 : Disponibilité des données abonnés « Gros consommateur » .....	43
Tableau 8 : ouvrages d'assainissement collectif présentant une potentielle anomalie d'attribution de la masse d'eau .....	45
Tableau 9 : Valeur de l'équivalent habitant selon le secteur de distribution (abonné et habitant) utilisé pour l'estimation des flux d'assainissement collectif .....	46
Tableau 10 : Valeurs de référence des volumétries d'installation ANC par tranche de population des communes .....	47
Tableau 11 : Valeur de l'équivalent habitant selon le secteur de distribution (abonné et habitant) utilisé pour l'estimation des flux d'assainissement non collectif .....	48
Tableau 12 : Volumétrie de points de prélèvements irrigation BNE et Agence de l'eau sur le périmètre d'étude.....	50
Tableau 13 : caractérisation des années selon l'indice standardisé des pluies .....	56
Tableau 14 : Coefficients de répartition entre sous-entité et entité BDNI .....	59
Tableau 15 : Association du type de coefficient de répartition communale aux types de cheptel issus des données à l'échelle des EPCI .....	62
Tableau 16 : Valeurs de références pour la consommation des cheptels .....	64
Tableau 17 : volumétrie des plans d'eau selon l'échelle géographique sélectionnée.....	68
Tableau 18 : Postes Météo France retenus pour le calcul de l'évaporation des plans d'eau ...	73
Tableau 19 : Modalités de répartition mensuelle du prélèvement annuel de l'alimentation du canal de Nantes à Brest .....	76
Tableau 20 : Modalités de répartition mensuelle du prélèvement annuel pour l'alimentation du marais Breton .....	76
Tableau 21 : Postes Météo France disposant mobilisée dans le cadre de l'étude .....	79
Tableau 22 : Postes Météo France du territoire disposant de longues séries homogénéisées.	80



## INTRODUCTION

Le présent document constitue un recueil des méthodes qui ont été déployées dans le cadre de la phase 2 de l'étude HMUC de l'estuaire de la Loire.

L'ensemble des méthodes présentées dans ce rapport ont fait l'objet de discussions avec les acteurs du territoire et ont été validées lors de groupes techniques, comités techniques et de pilotage.



# 1. VOLET HYDRO(GÉO)LOGIE



# 1.1. MÉTHODE D'ÉVALUATION DES DÉBITS

## 1.1.1. LA METHODE RCH

La méthode de reconstitution des chroniques hydrologiques (RCH) journalières ponctuelles, est appliquée au droit de **sites d'échantillonnage écologique et/ou de suivi de la qualité de l'eau** :

- des sites du Réseau de Référence Pérenne (RRP)
- des sites de pêches électriques bancarisés dans la base de données nationale sur les Milieux Aquatiques et Piscicoles (BDMAP).

Les résultats mobilisés sont issus d'un travail de recherche de l'INRAE, publié en 2018, et dont l'objectif était de faciliter l'interprétation des suivis hydro-biologiques. En effet, ces débits modélisés visent à fournir aux gestionnaires des ordres de grandeur concernant les débits journaliers et leur variabilité au cours des jours (et des années) qui ont précédé la mesure de qualité de l'eau ou du milieu.

### La méthode

Ces reconstitutions s'appuient sur un modèle hydrologique de type « pluie – débit » (GR4 voir plus bas) dont les paramètres de calage sont extraits par régionalisation. La méthode se base sur l'identification de bassins versants « donneurs » (BV instrumentés) par opposition aux bassins versants « receveurs » (non instrumentés) qui nécessitent une reconstitution des chroniques hydrologiques. Puis, des modèles pluie-débit sont calés sur chaque bassin donneur, permettant un transfert du vecteur de paramètres (paramètres de calage) vers les bassins receveurs.

Le jeu de données de référence est constitué des **2007 bassins versants « donneurs »**. Ces bassins sont non influencés<sup>1</sup> et disposent de données de débits journaliers issues de la BANQUE HYDRO disponibles sur une durée d'au moins 6 années avec peu de lacunes (moins de 10 %).

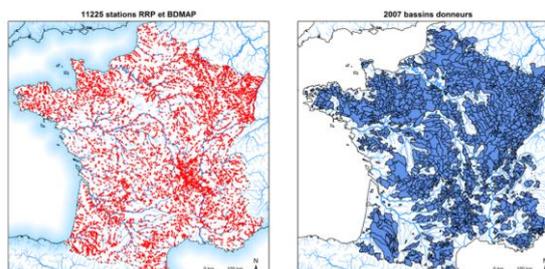


Figure 1 : Localisation des stations RRP et des bassins donneurs

A partir de ce jeu de données, une méthode de transfert de paramètres d'entrée climatiques nécessaires à une simulation hydrologique est mise en place entre bassins jaugés et non jaugés.

Cette méthode se base sur la proximité géographique entre sites jaugés et non jaugés.

Sur la figure ci-contre, pour le bassin cible (non jaugé) figuré en gris, on commence tout d'abord à rechercher les cinq bassins versants jaugés disponibles dans la base de données les plus proches géographiquement.

**Pour chaque bassin cible, les cinq bassins donneurs les plus proches ont été utilisés pour simuler une série de débits**

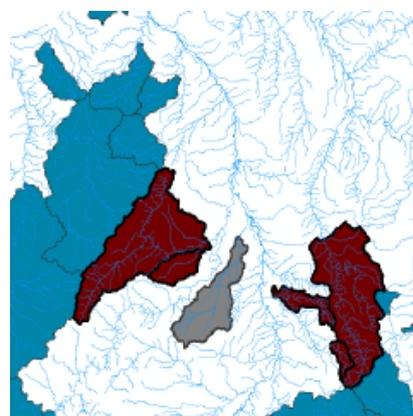


Figure 2 : Bassins « donneurs » (en bordeaux) et bassin receveur (en gris)

<sup>1</sup> Dans le cas présent, signifie que les stations hydrométriques ne sont pas situées à l'aval proche de grands barrages.

**journaliers, ensuite comparée avec la série de débits journaliers observés sur le bassin non jaugé cible.**

Les performances sont évaluées grâce au critère de Nash-Sutcliffe.

Afin d'éviter le transfert entre bassins versants de tailles très différentes, une distance pondérée entre les centres d'inertie des bassins versants et les exutoires de ces derniers est appliquée, ce qui évite le transfert de paramètres entre deux bassins concentriques de tailles très différentes.

La figure ci-dessous illustre la méthode de régionalisation en site non jaugé.

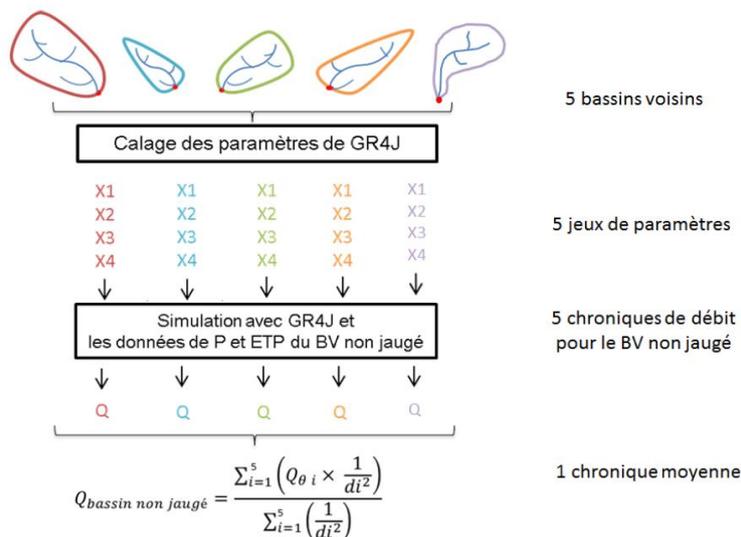


Figure 3 : Schéma explicatif de la méthode de régionalisation basée sur la proximité géographique

## Les résultats

La méthode de simulation de débits en site non jaugé est développée et mise en œuvre sur 11 225 stations non jaugées du Réseau de Référence Pérenne (RRP) et de la base de données sur les Milieux Aquatiques et Piscicoles (BDMAP).

Pour chaque station prise en compte, la série journalière produite par simulation déterministe (Qsim) couvre la période du **1<sup>er</sup> août 1958 au 31 juillet 2016**.

A noter que l'INRAE est actuellement en train de mettre à jour ces résultats jusqu'en 2023.

De plus, compte tenu de la marge d'erreur inhérente à la méthode, une méthode d'estimation de l'incertitude liée aux simulations est appliquée à chacune des stations considérées. Deux séries journalières de débits encadrant l'incertitude propre à chaque simulation sont également produites pour chaque station :

- 🌱 **Qsim\_05** : la série des bornes basses de l'intervalle de confiance à 90 % (= centile 5 %)
- 🌱 **Qsim\_95** : la série des bornes hautes de l'intervalle de confiance à 90 % (= centile 95 %)

## 1.1.2. LA METHODE LOIEAU

### Le contexte

Dans le cadre de ses missions de recherche et d'appui aux politiques publiques, l'INRAE avec l'aide de financements de l'OFB a développé une méthode visant à caractériser **des indices statistiques d'étiage, de bilan et de saisonnalité** sur l'ensemble du réseau hydrographique métropolitain.

Les résultats obtenus sont mis à disposition dans une base de données informatique sous la forme d'une interface web : la base de données LoiEau<sup>2</sup>. Cette base de données propose une estimation des indices statistiques sur des territoires dépourvus d'information à destination des DREAL, sollicités par les services de Police de l'Eau pour la mise en application de la réglementation sur les débits réservés.

### La méthode

La méthode LoiEau est une méthode **d'estimation de l'aléa hydrologique** lorsqu'il n'existe pas de station de mesures permanentes en rivière. La méthode repose sur le développement d'un **modèle hydrologique régionalisé**, faiblement paramétré (2 paramètres de calage) et capable de fournir des **chroniques hydrologiques au pas de temps journalier** en sites non instrumentés. A partir de ces chroniques journalières sont extraits des indices statistiques représentant l'étiage dans sa globalité temporelle (pas de temps annuels, mensuels et journaliers) à l'exutoire de bassins versants non instrumentés.

La régionalisation du modèle hydrologique repose sur une prise en compte homogénéisée des caractéristiques locales pouvant influencer le régime hydrologique naturel : sur la base des critères de sélection des chroniques hydrologiques (longueur de la chronique, anthropisation du bassin, diversité des régimes hydrologiques, ...). Un échantillon de **690 bassins versants** répartis sur toute la France est retenu. De plus, un **échantillon de validation** de la méthode, comprenant de **141 bassins versants** exclus du développement du modèle est constitué. Cet échantillon est mobilisé pour l'optimisation de la méthode de régionalisation.

---

<sup>2</sup> Lien vers le site : <https://loieau.inrae.fr/>



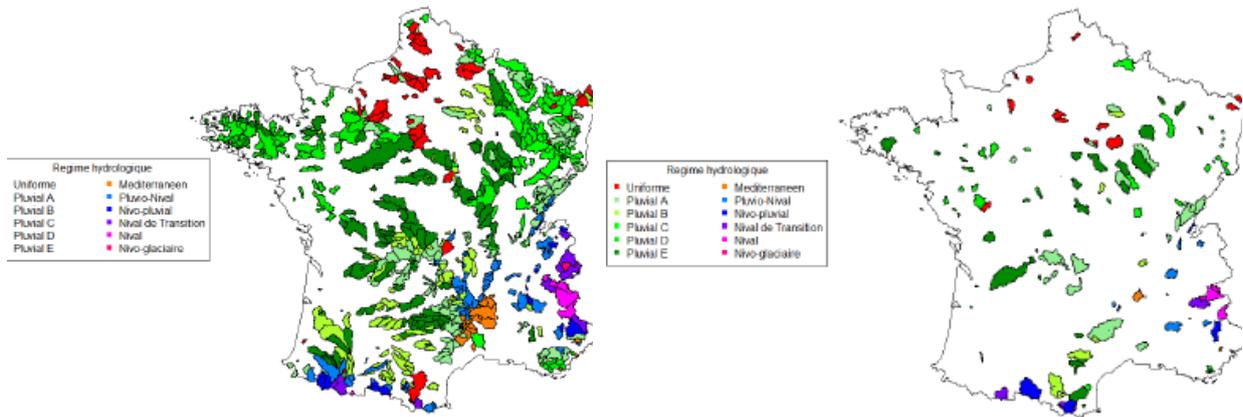


Figure 4 : Echantillon de BV utilisé pour le développement du modèle (gauche) et échantillon de validation (droite)

Le modèle utilisé est le modèle GRLoiseau2J. C'est un modèle hydrologique pluie-débit conceptuel global de la famille des modèles GR.

Le modèle est composé de trois réservoirs :

- ▬ Un **réservoir de production**<sup>3</sup> de capacité maximale **A** (mm)<sup>4</sup> qui assure le **bilan hydrique** de surface et calcule la part de la pluie contribuant à l'écoulement.
- ▬ Un **réservoir de stockage** de la pluie solide (Psol(t)) qui permet de déterminer le stock de neige (Snow(t)) à l'échelle du BV en intégrant les processus de fonte à travers une loi de vidange à 2 paramètres régionalisés.
- ▬ Un **réservoir de routage** de capacité maximale **C** (mm) associé à une **fonction de transfert** qui permet la différenciation entre la modélisation d'un écoulement de base et d'un écoulement de surface en fonction du taux de remplissage du réservoir.

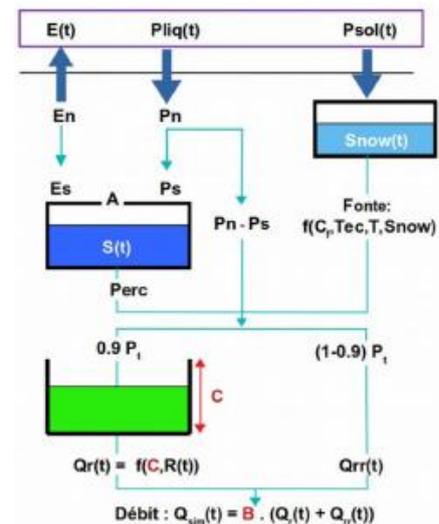


Figure 5 : Schéma conceptuel d'un modèle GR

La modélisation est réalisée selon les deux étapes classiques : le calage et la modélisation par régionalisation.

Le choix de la « régionalisation » répond au constat suivant : « Le calage des paramètres du modèle hydrologique n'est possible que si le bassin versant étudié possède des mesures de débit à son exutoire. En l'absence de débits mesurés, le calage ne peut être effectué sur le bassin et la connaissance de ces débits repose sur un transfert de l'information hydrologique disponible sur d'autres bassins ». La méthode de régionalisation se base sur l'idée que les phénomènes contrôlant les différents processus hydrologiques varient peu dans l'espace.

<sup>3</sup> La structure du module de production de GRLoiseau2J est similaire à celle du modèle hydrologique GR4J.

<sup>4</sup> La capacité maximale de ce réservoir n'est pas optimisée mais imposée : elle varie entre 200 et 250 mm en fonction de l'hydrogéologie.



Ainsi, des bassins versants proches auront des comportements hydrologiques similaires et par conséquent des paramètres de modèle hydrologique proches

L'étape de régionalisation consiste donc à transférer les jeux de paramètres du modèle calé (paramètres B et C) sur les bassins jaugés (« donneurs ») vers les bassins voisins non jaugés (« receveurs »). Pour un bassin cible, le choix du bassin donneur **le plus proche** est basé sur la proximité spatiale ou géographique qui est déterminée en retenant la pondération par l'inverse de la distance (entre les centroïdes des bassins versants).

## Les résultats

Les résultats obtenus intégrés dans une base de données accessible pour les services de l'État via une interface Web proposent, en affichage dynamique, les résultats de la BD LoiEau.

La méthode LoiEau a été appliquée sur **130 000 bassins** de cette base, ayant une superficie comprise entre 5 et 8000 km<sup>2</sup>. A l'exutoire de chaque bassin versant, des chroniques de débit journaliers sont simulées sur la période **1970 – 2020**. Sur la base de ces chroniques, **9 indicateurs statistiques d'étiages** (bilan, saisonnalité) sont calculés :

Tableau 1. Indices statistiques (IS)

Nom	Description des Indices Statistiques (IS)
<b>Statistiques d'étiage</b>	
VCN3(2);VCN3(5); VCN3(10)	Volume Consécutif Minimal pour 3 jours à T=2 ans, T=5 ans et à T= 10 ans
VCN10(2);VCN10(5); VCN10(10)	Volume Consécutif Minimal pour 10 jours à T=2 ans, T=5 ans et à T= 10 ans
QMNA2; QMNA5; QMNA10	Débit Mensuel Minimal Annuel à T=2 ans, T=5 ans et à T= 10 ans
<b>Saisonnalité</b>	
QMM 1 à 12	Débits moyens mensuels de janvier à décembre
<b>Module interannuel</b>	
QA	Module interannuel

Figure 6 : Indices statistiques d'étiages calculés sur les 130 000 bassins versants de la base LoiEau

Du fait de sa construction qui combine plusieurs étapes (calage et régionalisation), la méthode LoiEau multiplie les facteurs d'incertitudes. Une étude statistique des incertitudes est réalisée en deux temps :

- ✎ Dans un premier temps, l'incertitude des données d'entrée (P, ETP, débits observés (Q obs)) est analysée par rééchantillonnage aléatoire (100 échantillons sur 25 ans pour chaque bassin versant). Une mise en fréquence des 100 indices hydrologiques obtenus (1 par couple de paramètre) permet de calculer la médiane ainsi que les quantiles 5% et 95%.
- ✎ Dans un second temps, les incertitudes régionales sont prises en compte en mettant en œuvre 100 fois la régionalisation à partir de 100 jeux de paramètres issus des calages réalisés sur les données d'entrée rééchantillonnées. L'incertitude est calculée comme précédemment.

### 1.1.3. LA METHODE 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 :

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

Les bassins versants à partir desquels cette méthode a été employée ont fait l'objet d'une validation de la part de la DREAL.

#### 1.1.4. MODELISATION PLUIE -DEBIT (GR4J)

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 l'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) ( $X_1$ ) ;
- Le coefficient d'échanges souterrains (mm/jour) ( $X_2$ ) ;
- La capacité à un jour du réservoir de routage (mm) ( $X_3$ )
- Le temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (jours) ( $X_4$ )

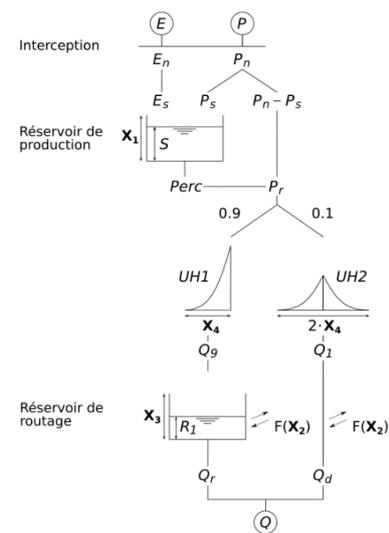


Figure 7 : Schéma de fonctionnement du modèle hydrologique journalier GR4J (Source : INRAE)

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 débits.

### 1.1.5. LA METHODE D'AGREGATION

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.

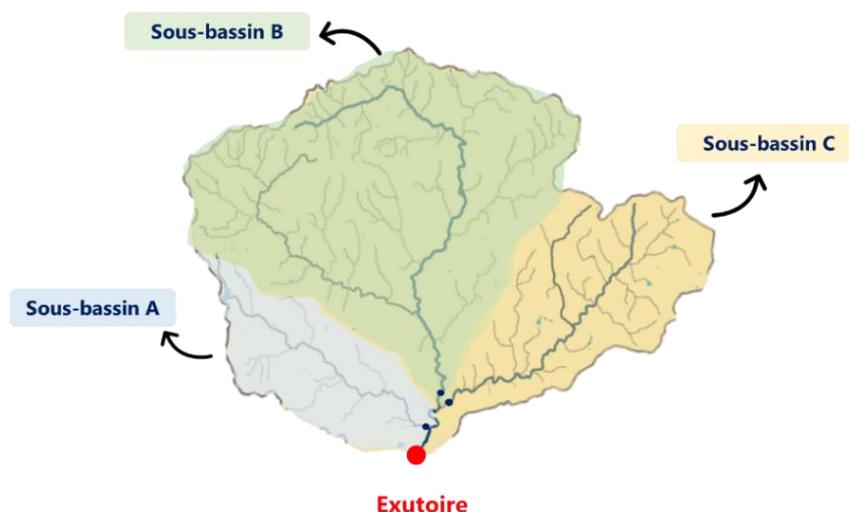


Figure 8 : Illustration de la méthode de reconstitution par agrégation.

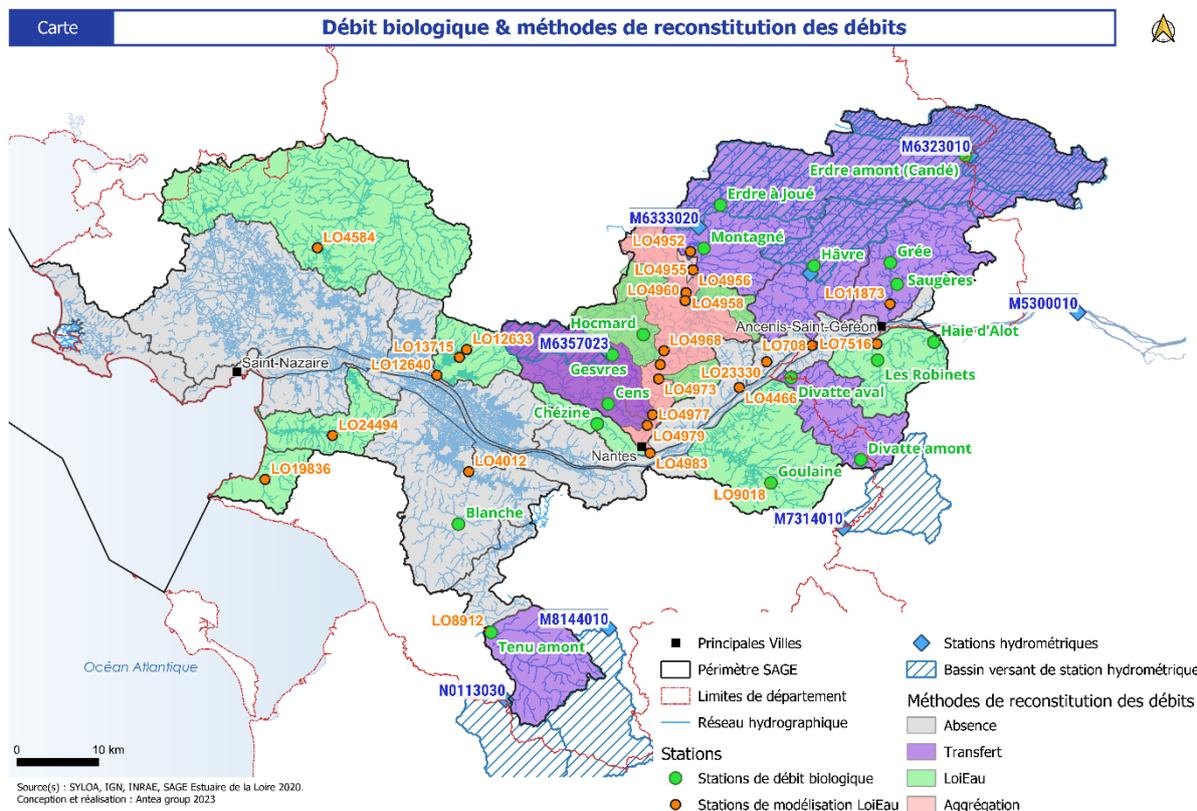
Dans ce cas illustré, le débit à l'exutoire correspondra à la somme des débits des sous-bassins A, B et C.

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.



## 1.1.6. DEPLOIEMENT DES DIFFERENTES METHODES A L'ECHELLE DU TERRITOIRE D'ETUDE

Les différentes méthodes énumérées précédemment ont été mobilisées sur le territoire comme présenté ci-dessous.



## 1.2. MÉTHODE D'ANALYSE DES DONNÉES HYDROLOGIQUES

### 1.2.1. L'ANALYSE FREQUENTIELLE

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements 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 événement 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).

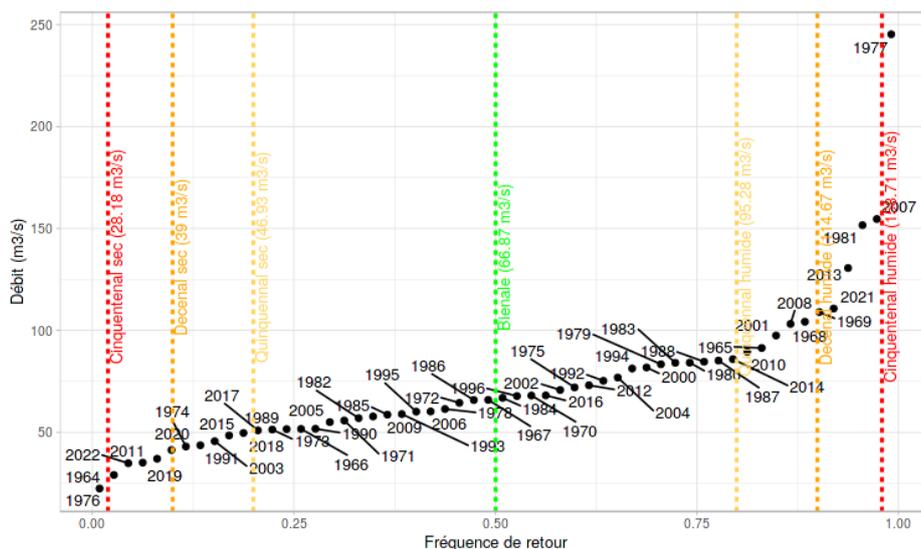


Figure 9 : Illustration de l'analyse fréquentielle des QMNA sur la Loire à Orléans

### 1.2.2. L'ANALYSE DES DEBITS 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.

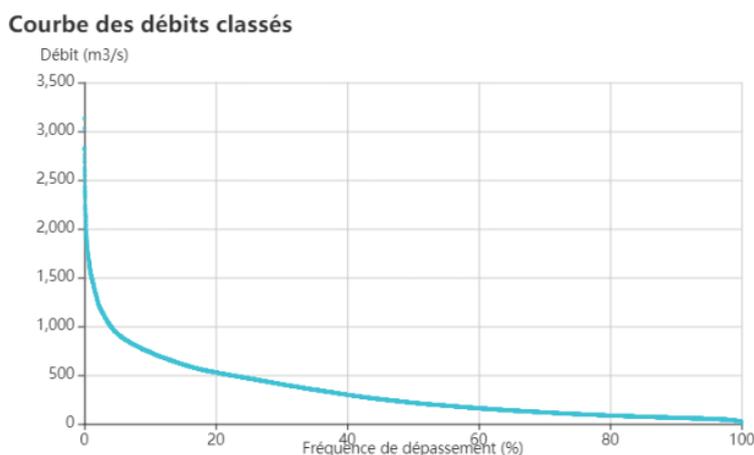


Figure 10 : Courbe des débits classés sur la Loire à Orléans (1964 – 2023)

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.

### 1.2.3. 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 autocorrélées, le test de Mann-Kendall modifié doit être appliqué.

Le test est associé au calcul de la **penne de Sen** (penne de droite de régression) qui est la médiane de toutes les pentes calculées entre chaque paire de point. Cette penne, 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 ( $m^3/s$ , mm, °C, ...) par unité de temps (an, décennie, ...) mais également en relatif (%).

#### 1.2.4. CARACTERISATION DE L'ETIAGE

La méthode de caractérisation des étiages 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.

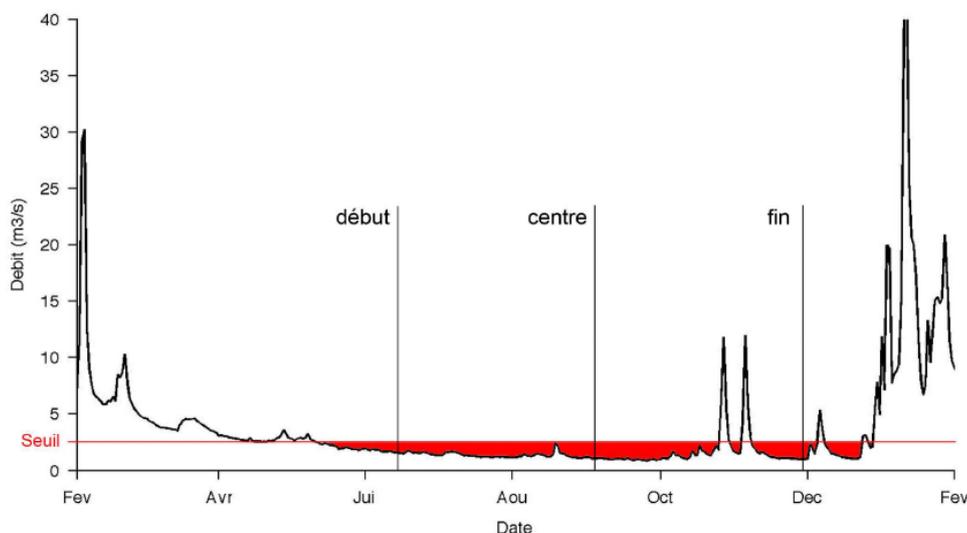


Figure 11 : Représentation graphique de l'étiage annuel



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

Tableau 1 : Indices d'analyse du régime d'étiage

Compartiment 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 annuelle (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.

## 1.3. MÉTHODE D'ANALYSE DES DONNÉES PIÉZOMÉTRIQUES

### 1.3.1. SELECTION DES CHRONIQUES

L'analyse statistique est effectuée sur les données validées et correctes des historiques de niveaux piézométriques disponibles. Seules les chroniques ayant au moins 121 mois de données et se terminant au plus tôt en 2021 sont utilisées. Les chroniques retenues doivent également disposer d'au moins 75% de la période couverte par des données sur tous les mois de l'année.

Un prétraitement des données a été réalisé en amont. Il consiste à retirer de manière automatique les données présentant des anomalies puis pour chaque piézomètre, à calculer le niveau médian et analyser les données manquantes.

### 1.3.2. TENDANCES

Pour le calcul des tendances des niveaux piézométriques, les valeurs manquantes ont été comblées par interpolations linéaires.

Comme pour les traitements statistiques des eaux superficielles, les tendances ont été déterminées à partir de la méthode de Mann Kendall. Une tendance est considérée comme significative si la plus-value de ce test est inférieure à 0,05. Si la pente est négative, la tendance du niveau est à la baisse et dans le cas contraire elle est à la hausse.

### 1.3.3. CORRELOGRAMME



Un corrélogramme caractérise le degré de corrélation qui existe entre deux points d'une série distants de N jours. Pour une chronique piézométrique, un autocorrélogramme peut être défini de la manière suivante : « Dans une chronique de mesures piézométriques journalières, il existe une corrélation entre les valeurs successives de la série jusqu'à une certaine « portée » temporelle, fonction de l'inertie de la nappe. Cette corrélation peut se mesurer à partir d'un coefficient d'autocorrélation qui représente la corrélation de la série avec elle-même mais décalée d'un certain intervalle de temps. Une corrélation est d'autant plus forte qu'elle est proche de 1. Le seuil de significativité est fixé à 0,7.

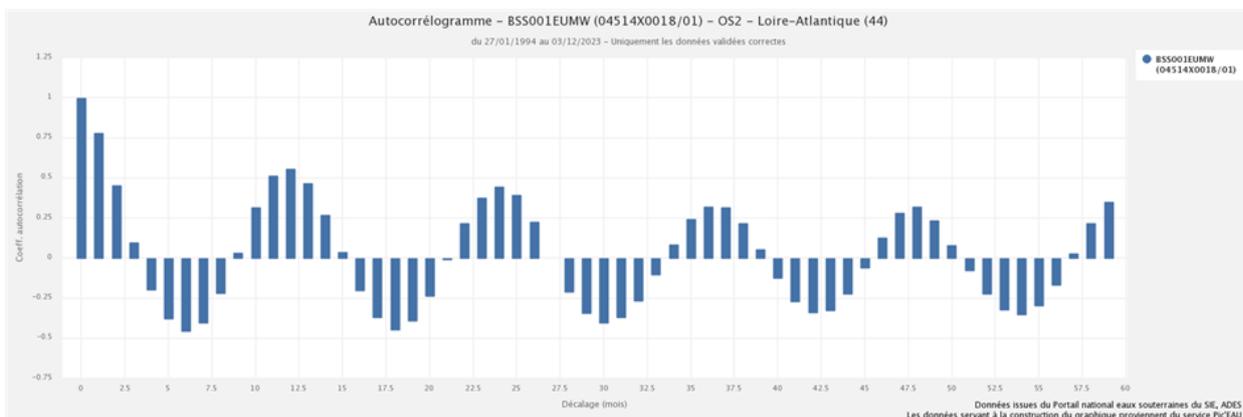


Figure 12 : Exemple de corrélogramme

### 1.3.4. PERIODOGRAMME

L'utilisation d'un périodogramme permet d'analyser les séries temporelles de niveaux piézométriques et d'étudier ses variations saisonnières.

Le principe de calcul d'un périodogramme repose sur la représentation du signal d'une série temporelle dans le domaine fréquentiel par application de la transformation de Fourier qui permet de décomposer une série temporelle en ses composantes fréquentielles.

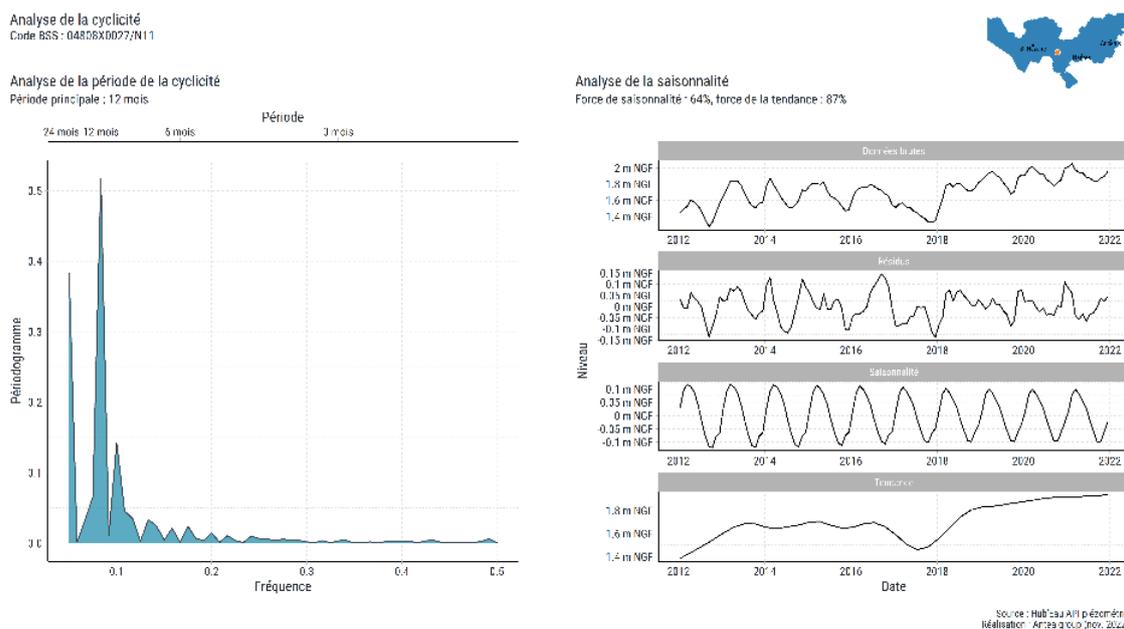


Figure 13 : Exemple de périodogramme

Plus spécifiquement, l'analyse du périodogramme en hydrogéologie fournit des informations sur les processus hydrodynamiques et les interactions entre les systèmes aquifères et les conditions environnementales qui contrôlent le bilan hydrique.

Par exemple, l'analyse du périodogramme permet de détecter la cyclicité de variations des niveaux piézométriques (saisonniers, annuelle, pluriannuelle) et leurs tendances d'évolutions qui peut être liée aux variations des précipitations et/ou des conditions de recharge de la nappe.

En définitive, l'utilisation du périodogramme permet de mieux comprendre les variations temporelles des paramètres hydrogéologiques, d'identifier les tendances et les cycles, et d'évaluer l'impact des facteurs externes sur les systèmes aquifères. Ces informations sont essentielles pour la gestion durable des ressources en eau souterraine et pour la prise de décisions en matière de gestion des aquifères.

### 1.3.5. INDICE PIEZOMETRIQUE STANDARDISE (IPS)

L'objectif de cet indicateur est d'obtenir, via la loi normale centrée réduite, une échelle de valeurs standardisée, comprise entre -3 (déficit de recharge de la nappe, niveaux très bas) et +3 (niveaux très hauts, à la suite de forte recharge). A partir des moyennes mensuelles, un index piézométrique est calculé de la façon suivante :

$$IP = \frac{H - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}}$$

- /// *H est le niveau piézométrique (ou la profondeur, en valeur négative par rapport au repère),*
- /// *Hmax est le niveau maximum de la chronique sur toute la période,*
- /// *Hmin est le niveau minimum.*

Cet indicateur permet de situer, à l'échelle du mois, le niveau piézométrique vis à vis de la normale du mois ciblé. L'IPS est défini selon 7 classes allant d'un niveau très bas (en rouge) à un niveau très haut (en bleu). Les périodes de retour ne doivent être utilisées que lorsque les conditions de leur calcul probabilistes sont remplies : chronique piézométrique stationnaire (pas de tendance), homogène (pas de rupture) et pas ou peu d'auto-corrélation.

Tableau 2 : Classes d'IPS

Min.	Max.	Qualification des niveaux	Période de retour
≥ 1.282	≤ 3.000	Niveaux très hauts	> 10 ans humide
≥ 0.842	< 1.282	Niveaux hauts	entre 5 ans humide et 10 ans humide
≥ 0.253	< 0.842	Niveaux modérément hauts	entre 2.5 ans humide et 5 ans humide
≥ -0.253	< 0.253	Niveaux autour de la moyenne	entre 2.5 ans humide et 2.5 ans sec
≥ -0.842	< -0.253	Niveaux modérément bas	entre 2.5 ans sec et 5 ans sec
≥ -1.282	< -0.842	Niveaux bas	entre 5 ans sec et 10 ans sec
≥ -3.000	< -1.282	Niveaux très bas	> 10 ans sec

### 1.3.6. SECHERESSE

L'analyse des sécheresses météorologique est menée à partir du calcul de l'Indice Piézométrique Standardisé (indicateur probabiliste et distribué suivant loi normale centrée réduite). Un épisode de sécheresse peut alors être caractérisé par la magnitude (Drought Magnitude (DM)) qui se définit comme la somme des valeurs du IPS sur la durée de l'épisode sec. (McKee et al., 1993).



$$DM = - \sum_{j=1}^m IPS_{ij}$$

- $j = 1$  est l'indice du premier mois de sécheresse (IPS devient négatif) et  $j = m$  l'indice du dernier mois de sécheresse (IPS redevient positif)
- L'indice  $i$  correspond à l'échelle de temps de calcul du IPS (3 mois, 6 mois, ...).

La magnitude est exprimée en mois et serait numériquement égale à la durée de la sécheresse si chacun des mois avait un IPS de -1.

La sécheresse est également définie par :

- Une durée : l'épisode sec commence lorsque le IPS devient négatif.
- Une intensité, valeur négative du « pic ». Différents seuils du IPS peuvent être définis pour qualifier sa sévérité ; par exemple la valeur de -1,28 correspond à un niveau de fréquence de retour "décennal sec", et la valeur de -1,64 à un niveau de fréquence de retour "vingtennal sec" (reporté en trait pointillé sur l'illustration ci-dessous).

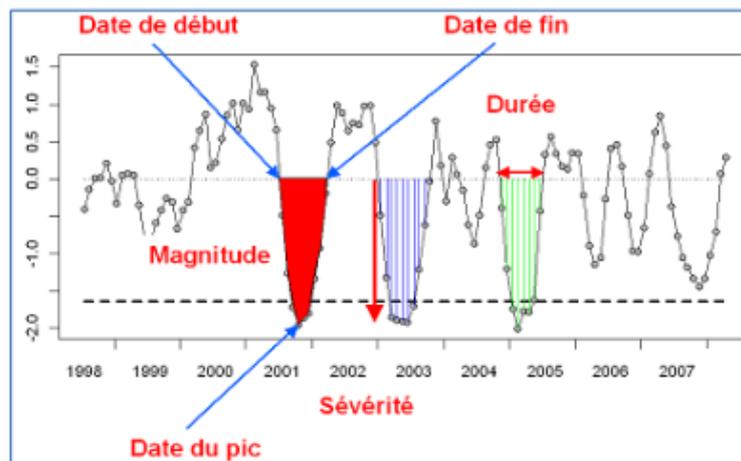


Figure 14 : Caractérisation d'un épisode de sécheresse par le IPS - Source : Rapport Climsec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Rapport final du projet (2011)



## 2. VOLET MILIEU



## 2.1. MÉTHODE D'ÉVALUATION DES DÉBITS BIOLOGIQUES

### 2.1.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES MODELES DE TYPE MICROHABITATS

La modélisation des habitats pour certaines espèces piscicoles est relativement bien développée en France, comme dans le reste du monde, notamment dans le domaine de la gestion des barrages en lien avec les débits minimums biologiques (DMB) et les débits réservés.

L'un des tout premiers modèles créés aux États-Unis est le « Instream Flow Incremental Methodology » (IFIM), d'après des travaux de Waters (1976), dont la partie liée à la caractérisation des habitats est l'interface « Physical HABitat SIMulation » (PHABSIM) (*Reiser, et coll., 1989*).

Historiquement, la méthodologie s'est développée en France vers la fin des années 1990 (Souchon, et coll., 1989) avec le développement du modèle EVHA (EVALuation de l'HABitat physique des poissons) par le CEMAGREF. Quelques années plus tard, l'institut de recherche a édité un nouveau modèle, ESTIMHAB (ESTIMation des HABitats), dit de « seconde génération », afin de simplifier les démarches d'acquisition de données et d'utilisation du modèle. Entre les deux systèmes, le modèle LAMMI développé par EDF semble être à mi-chemin avec une simplification des phases de terrain tout en conservant des données nécessaires à l'application de modèles hydraulique puis biologique solides.

Les 3 modèles de DMB (EVHA, ESTIMHAB et LAMMI), ainsi que la méthodologie PHABSIM ayant servi de base, fonctionnent sur le même principe. Leur but est de coupler des informations physiques, à la fois par des mesures de terrain et une modélisation hydraulique, à des informations biologiques données généralement par des courbes de préférence pour des espèces et des stades ciblés (*Ginot, et coll., 1998 ; U.S. Geological Survey, 2001 ; Lamouroux, 2008 ; Tissot, et coll., 2011*).

Ces auteurs expliquent que les variables d'habitat prises en compte pour la modélisation sont généralement les 3 composantes qui définissent les habitats en rivière, à savoir le substrat, la vitesse (parfois calculée à partir du débit) et la hauteur d'eau. L'information biologique est, quant à elle, donnée par les classiques « courbes de préférence » qui donnent l'affinité de chaque espèce à chacun des stades de développement vis-à-vis des 3 variables considérées.

Bien que ces outils aient été principalement développés en France, comme une aide à la décision sur les débits réservés (ou débit minimal biologique) en aval des barrages (*Souchon, et coll., 1989*), ils peuvent également être utilisés comme outils de recherche pour évaluer la sensibilité des cours d'eau aux variations de débit, et donc de l'habitat physique (*Pouilly, et coll., 1995*).

### 2.1.2. LA METHODE ESTIMHAB

#### Description de la méthode

Le CEMAGREF (ancien nom de l'IRSTEA) a proposé, en 2002, une méthodologie appelée ESTIMHAB : un modèle statistique, alternatif aux modèles dits 'conventionnels' (*Lamouroux, 2008*). Cette démarche tire son origine de deux types de travaux : des recherches en hydraulique statistique (alternative aux modèles 1D et 2D) et des études de cas conduites avec le protocole standard et le logiciel EVHA, par analyse des propriétés communes (*Souchon, et coll., 2003*). Une analyse de la sensibilité de l'application des modèles conventionnels a révélé que les résultats modélisés dépendent essentiellement des caractéristiques hydrauliques moyennes (*Lamouroux & Capra, 2002*).



Ainsi, les auteurs ont fait le pari de n'utiliser que quelques données de terrain facilement accessibles pour modéliser les habitats : la hauteur d'eau moyenne, la taille du substrat dominant, la largeur et le débit médian Q50. Ces informations permettent de calculer certains paramètres (nombre de Froude (FR), nombre de Reynolds (RE), rugosité relative et rapport largeur moyenne/hauteur moyenne aux différents débits), que les auteurs ont utilisés pour modéliser la courbe de SPU en fonction des débits simulés pour 6 espèces (truite (adulte et juvénile), le vairon, la loche, le chabot, le barbeau et le goujon), qu'ils ont ajustés par rapport aux courbes obtenues sur ces mêmes espèces et ces mêmes cours d'eau grâce au logiciel EVHA (Sabaton, 2003). Cela leur a permis de définir deux formules de caractérisation de valeur de l'habitat (VHA), en fonction de l'espèce, de la manière suivante :

Modèle 1 (truite fario –adulte & juvénile-, chabot, goujon, loche et vairon) :

$$VHA_{i,j} = A_i * [RE_{i,j}^c * \exp(-K * RE_{i,j})] + e_{i,j}$$

Modèle 2 (barbeau) :

$$VHA_{i,j} = A_i * [1 - C * \exp(-K * RE_{i,j})] + e_{i,j}$$

Avec :

- VHA<sub>i,j</sub> = valeur de l'habitat du secteur *i* au secteur *j* pour l'espèce donnée au stade de développement donné ;
- RE<sub>i,j</sub> = Reynolds du secteur *i* au secteur *j* ;
- FR<sub>i,50</sub> = nombre de Froude du secteur *i* au débit médian Q50 ;
- D/H<sub>i,50</sub> = largeur moyenne sur hauteur moyenne du secteur *i* au débit médian Q50 ;
- C et K : constantes indépendantes du cours d'eau, liées à l'espèce et au stade de développement étudiés.

A noter que les formules des valeurs A<sub>i</sub> sont définies pour chacune des espèces et stades étudiés, en fonction de Ln(FR), Ln(RE) et D/H.

Les résultats de cette méthodologie sont donc comparables à ceux du protocole EVHA, à savoir des courbes de valeur d'habitat (VHA) ou de surface pondérée utile (SPU) en fonction du débit (Souchon et coll., 2003), mais avec des demandes en données d'entrées moins contraignantes puisqu'il suffit de connaître le débit, la hauteur, la largeur et la taille du substrat sur les 10 à 12 transects étudiés, sans relevés topographiques de la section (Lamouroux, 2008). Le modèle a été validé pour les cours d'eau salmonicoles, dont le domaine de validité est similaire au logiciel EVHA, mais dont l'utilisation est limitée à 6 espèces (Sabaton, 2003). Cette méthode peut également être appliquée sur une guildes d'espèces : guildes « mouille », « radier », « berge » et « chenal » (Sabaton, 2003). Le principe est le même, avec des formules de A<sub>i</sub> et des valeurs de C et K calculées pour chacune des guildes (Sabaton, 2003).

Le protocole de terrain repose sur les mêmes principes que le protocole EVHA concernant la sectorisation du cours d'eau en tronçons morphologiquement homogènes (Lamouroux, 2008). Au sein de chaque tronçon, une station représentative du site, d'une longueur de 12 à 30 fois la largeur du cours d'eau à débit de pleins bords, est sélectionnée, soit de 2 à 5 séquences répétitives sur le cours d'eau. Sur le terrain, les relevés comprennent, sur des transects, les largeurs du lit mouillé, les hauteurs d'eau et la taille moyenne du substrat. Ce dernier n'est pas réparti en classes comme pour les autres modèles : seule la taille moyenne du substrat est relevée.

Le pas de mesure longitudinal et latéral est fonction de la taille du cours d'eau. Si le débit du cours d'eau le jour de l'intervention n'est pas connu, il est nécessaire de le mesurer. Ce même protocole doit être répété une deuxième fois à un débit suffisamment différent du précédent (écart minimum conseillé : Q<sub>2</sub> > 2\*Q<sub>1</sub>) (Souchon, et coll., 2003).



S'il n'existe pas de station de jaugeage à proximité, le débit moyen est mesuré sur la section la plus rectangulaire.

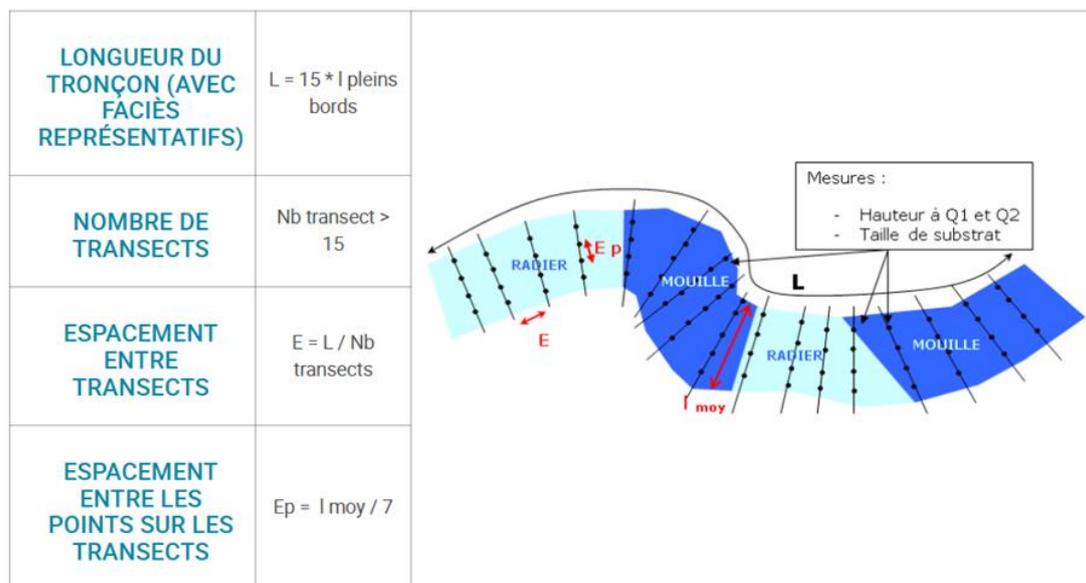


Figure 15 - Répartition des transects et des points de mesures du protocole ESTIMHAB

A noter qu'il est nécessaire de connaître le débit médian interannuel (ou Q50) de la station, calculé en situation naturelle ou reconstitué sur une chronique de temps la plus longue possible (au minimum 12 ans).

Les résultats générés par le modèle ne peuvent pas être cartographiés : seules les courbes de valeur d'habitat ou de surface pondérée utile en fonction du débit sont exploitables (Sabaton, 2003).

### Domaine de validité et préconisation liée à la méthode

Domaine	Points d'attention / préconisations
<b>Physique</b>	<p>Cours d'eau de climat tempéré à morphologie naturelle ou peu modifiée de pente &lt; 5 %</p> <p>Éviter les tronçons dont plus de 40 % de la surface est hydrauliquement influencée par des seuils, enrochements, épis ...</p> <p>Méthode délicate à utiliser sur des contextes morphologiques modifiés (secteur à hydrologie régulée, secteur hydraulique chenalisé et/ou mise en bief)</p>
<b>Biologique</b>	<p>Incertitudes liées au modèle biologique lorsque la profondeur moyenne est &gt; 2 m</p> <p>Méthode limitée vis-à-vis de certains stades de développement ou d'espèces, notamment ceux utilisant des habitats très particuliers et très spatialisés (reproduction, stades larvaires et jeunes alevins utilisant les zones de bordures).</p> <p>Les espèces adaptées au milieu lentique (rotengle, gardon, ...) ne constituent pas des cibles biologiques pertinentes pour la définition d'un débit minimal, leur comportement de recherche de nourriture n'étant absolument pas lié aux conditions hydrauliques du milieu à l'inverse des cyprinidés rhéophiles (BAF - Barbeau, SPI - Spirilin, BLN - Blageon, ...)</p>
<b>Interprétation des courbes</b>	<p>Interprétation préférentielle sur la partie de la courbe « bas à moyens débits » (Vitesse &lt; 1 m/s et H &lt; 1,5 m)</p> <p>Les valeurs de débits obtenues constituent seulement un support d'analyse</p>
<b>Terrain</b>	<u>Choix des débits Q1 et Q2 :</u>

Domaine	Points d'attention / préconisations																
	$Q2 > 2 * Q1$ Simulation comprise entre $Q1/10$ et $5 * Q2$ Estimation ou mesure précise dans une section adaptée précise de $Q1$ et $Q2$ (erreur < 10 %)	$Q1$ et $Q2 < Q$ pleins bords $Q1/10 < Q50 < 5 * Q2$															
	<u>Gamme de cours d'eau pour la simulation par espèces hors SAT (saumon) et OBR (ombre commun) (caractéristiques hydrologiques et hydrauliques) :</u>																
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Caractéristiques du cours d'eau</th> <th>Minimum</th> <th>Maximum</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Débit médian Q50 (m3/s)</td> <td>0,20</td> <td>13,10</td> </tr> <tr> <td>Largeur à Q50 (m)</td> <td>5,15</td> <td>39,05</td> </tr> <tr> <td>Hauteur à Q50 (m)</td> <td>0,18</td> <td>1,45</td> </tr> <tr> <td>Substrat D50 (m)</td> <td>0,02</td> <td>0,64</td> </tr> </tbody> </table>		Caractéristiques du cours d'eau	Minimum	Maximum	Débit médian Q50 (m3/s)	0,20	13,10	Largeur à Q50 (m)	5,15	39,05	Hauteur à Q50 (m)	0,18	1,45	Substrat D50 (m)	0,02	0,64
Caractéristiques du cours d'eau	Minimum	Maximum															
Débit médian Q50 (m3/s)	0,20	13,10															
Largeur à Q50 (m)	5,15	39,05															
Hauteur à Q50 (m)	0,18	1,45															
Substrat D50 (m)	0,02	0,64															
	<u>Gamme de cours d'eau pour la simulation par guildes et pour les espèces SAT (saumon) et OBR (ombre commun) (caractéristiques hydrologiques et hydrauliques) :</u>																
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Caractéristiques du cours d'eau</th> <th>Minimum</th> <th>Maximum</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Débit médian Q50 (m3/s)</td> <td>1</td> <td>152</td> </tr> <tr> <td>Largeur à Q50 (m)</td> <td>7</td> <td>139</td> </tr> <tr> <td>Hauteur à Q50 (m)</td> <td>0,25</td> <td>2,25</td> </tr> <tr> <td>Substrat D50 (m)</td> <td>0,01</td> <td>0,33</td> </tr> </tbody> </table>		Caractéristiques du cours d'eau	Minimum	Maximum	Débit médian Q50 (m3/s)	1	152	Largeur à Q50 (m)	7	139	Hauteur à Q50 (m)	0,25	2,25	Substrat D50 (m)	0,01	0,33
Caractéristiques du cours d'eau	Minimum	Maximum															
Débit médian Q50 (m3/s)	1	152															
Largeur à Q50 (m)	7	139															
Hauteur à Q50 (m)	0,25	2,25															
Substrat D50 (m)	0,01	0,33															

### 2.1.3. CHOIX DES STATIONS DE DEBIT BIOLOGIQUE

Conformément aux clauses administratives du marché, les 20 stations de débits biologiques ont été déterminées sur les entités cibles.

Les entités Brière-Brivet, Littoral Guérandais et Nazairien, Sud estuaire et côte de Jade, Sillon et marais du Nord Loire et la Loire et ses petits affluents n'ont pas été retenues comme entités cibles du fait :

- 🌿 Du manque de données liée à la caractérisation de l'hydrologie ;
- 🌿 De contexte particulier : zones de marais, forte présence de zones humides (boires...), influence de la marée... rendant la définition d'un débit biologique non pertinente ou ne permettant d'appliquer les méthodes d'estimation des débits biologiques.



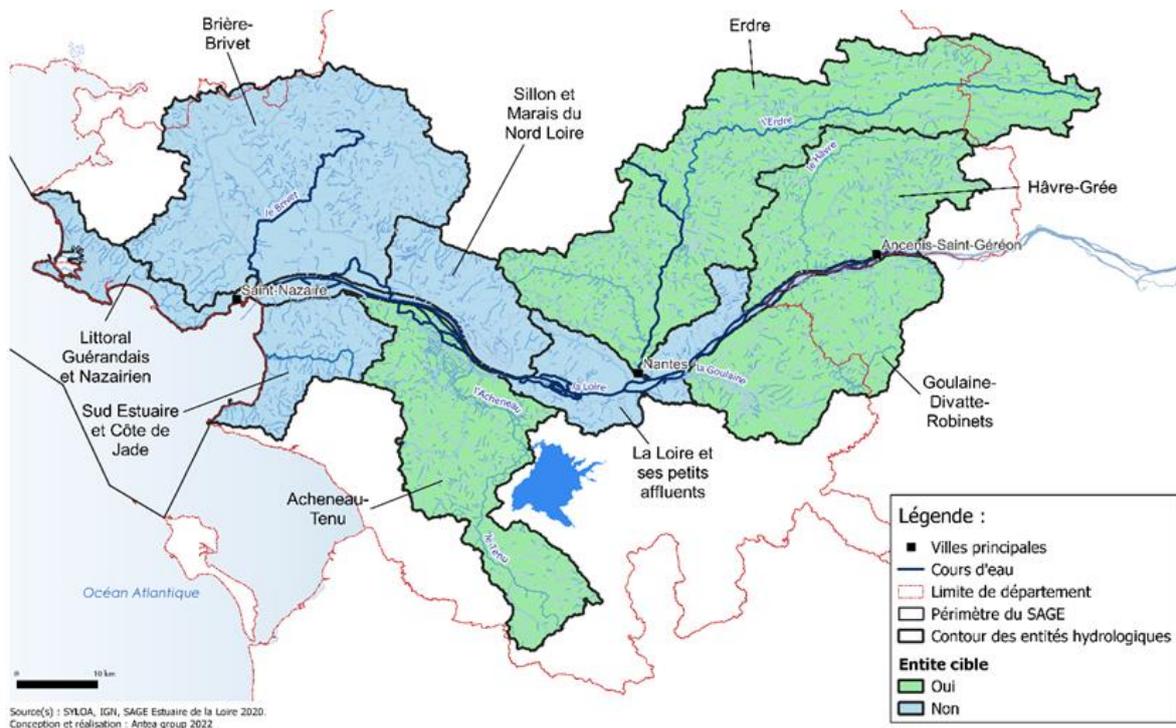


Figure 16 : Entités cibles

Le positionnement de chacune des stations est le fruit d'un travail itératif mené en collaboration avec les acteurs du territoire (techniciens de rivières, OFB, DDT(M), fédérations de pêche 44 et 49 et Agence de l'eau Loire Bretagne) dont les principales étapes sont rappelées ci-contre :

### ETAPE 1 : Prélocalisation

Sur la base des sous-bassins versants de référence définis dans le SAGE Estuaire de la Loire, les entités ont été redécoupées d'après des critères physiques et hydromorphologiques afin de proposer des sous-bassins versants homogènes.

Tableau 3 : Critères de découpage des bassins versant de gestion du SAGE

Compartiments	Critères
<b>Physique</b>	Ordination de Strahler Pente du cours d'eau Occupation du sol : Corine Land Cover de niveau 1 et zones de marais Géologie
<b>Hydromorphologie</b>	Modèle SYRAH et plus particulièrement les variables : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Continuité latérale</li> <li>▪ Structure et substrat du lit</li> <li>▪ Variation de la profondeur et de la largeur</li> <li>▪ Continuité proximité</li> <li>▪ Structure de la rive</li> </ul> Taux d'étagement

Une première pré-localisation en a alors été déduite et soumise aux acteurs concernés pour avis et validation lors d'un groupe technique spécifique (08/11/2022).



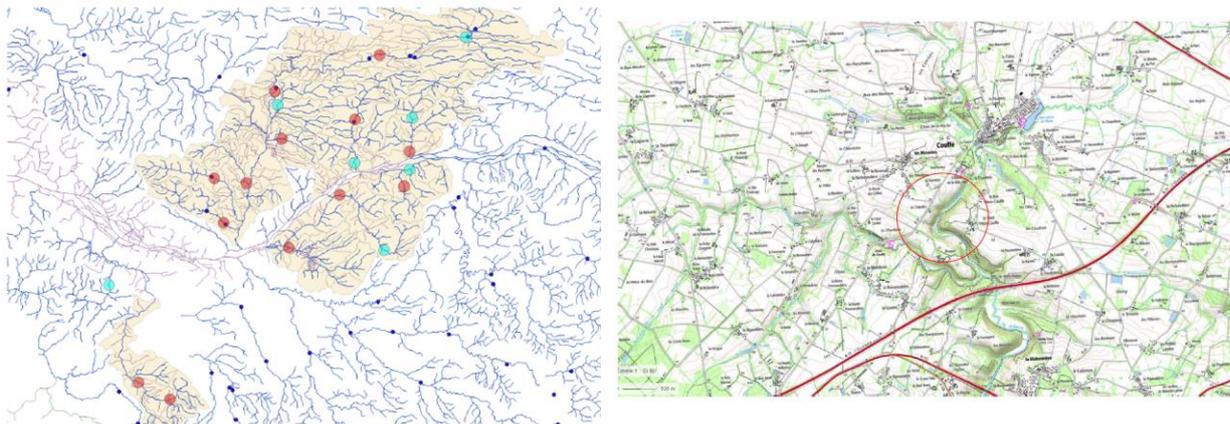


Figure 17 : Pré-localisation des 20 stations de débit biologique

### /// **ETAPE 2 : Repérage terrain et validation de la localisation précise**

Une fois la pré-localisation validée, un repérage terrain a été effectué afin de localiser précisément la station de mesure du débit biologique. Pour 3 stations, aucun site pertinent n'a pu être localisé pour les raisons évoquées ci-dessous.



## L'Erdre à Bonnœuvre :



### Raisons de l'échec de positionnement de la station :

- Influences d'ouvrages transversaux,
- Sur secteur partiellement influencé : absence de deux séquences « radiers-mouilles » / faciès trop profonds.
- Linéaire (trop) récemment restauré à Saint Mars-la-Jaille.



Seuil en enrochement influençant la ligne d'eau L'Erdre à Bonnœuvre (Ld : Fontaine Marie)

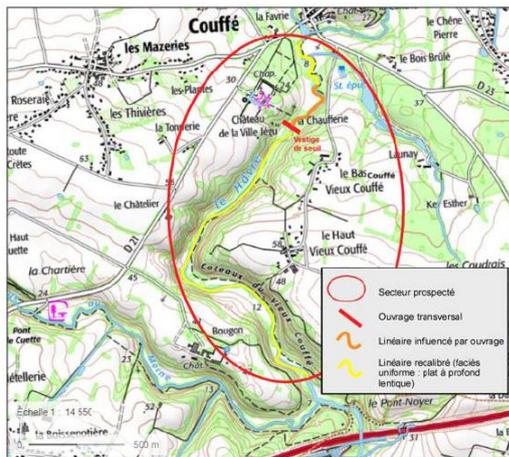


Ligne d'eau influencée : Unique faciès profond lentique L'Erdre à Bonnœuvre (LD : la Talonnière)



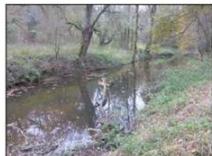
Vestige de seuil à Saint Mars-la-Jaille (entre les Id la Talonnière et La Petite Moulinière).

## Le Hâvre en aval de Couffé :



### Raisons de l'échec de positionnement de la station :

- Cours d'eau fortement recalibré (surlargeur) qui ne permet pas la formation d'une alternance « radier-mouille » : faciès homogène sur les ¾ du linéaire prospecté composé de plat à profond lentique,
- Faciès trop profonds.
- Influence des vestiges d'un seuil (+ o) au droit du château de la Ville Jégu.



Faciès uniforme (plat à profond lentique) en aval du château de la Ville Jégu

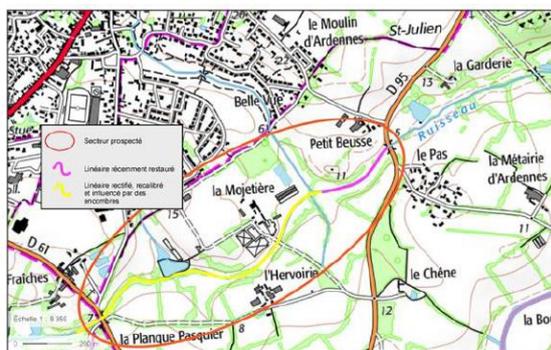


Faciès uniforme (plat à profond lentique) et excessivement profond en amont du château de la Ville Jégu



Faciès courant (radier) isolé / Absence de deux séquences « radier-mouille »

## Les Fraîches :



### Raisons de l'échec de positionnement de la station :

- Linéaire rectifié et recalibré perturbant le fonctionnement hydromorphologique naturel du cours d'eau : absence de deux séquences successives « radier-mouille »,
- Linéaire régulièrement influencé par des encombres,
- Restauration « trop » récente pour être exploitée en aval de la D95.



Cours d'eau rectifié et recalibré



Encombre influençant la ligne d'eau



Linéaire restauré en aval de la D95



La localisation précises des stations de débit biologique et l'abandon des 3 stations ont ensuite fait l'objet d'une validation en comité pilotage (25/11/2022).

17 stations ont donc été retenues pour détermination d'un débit biologique.

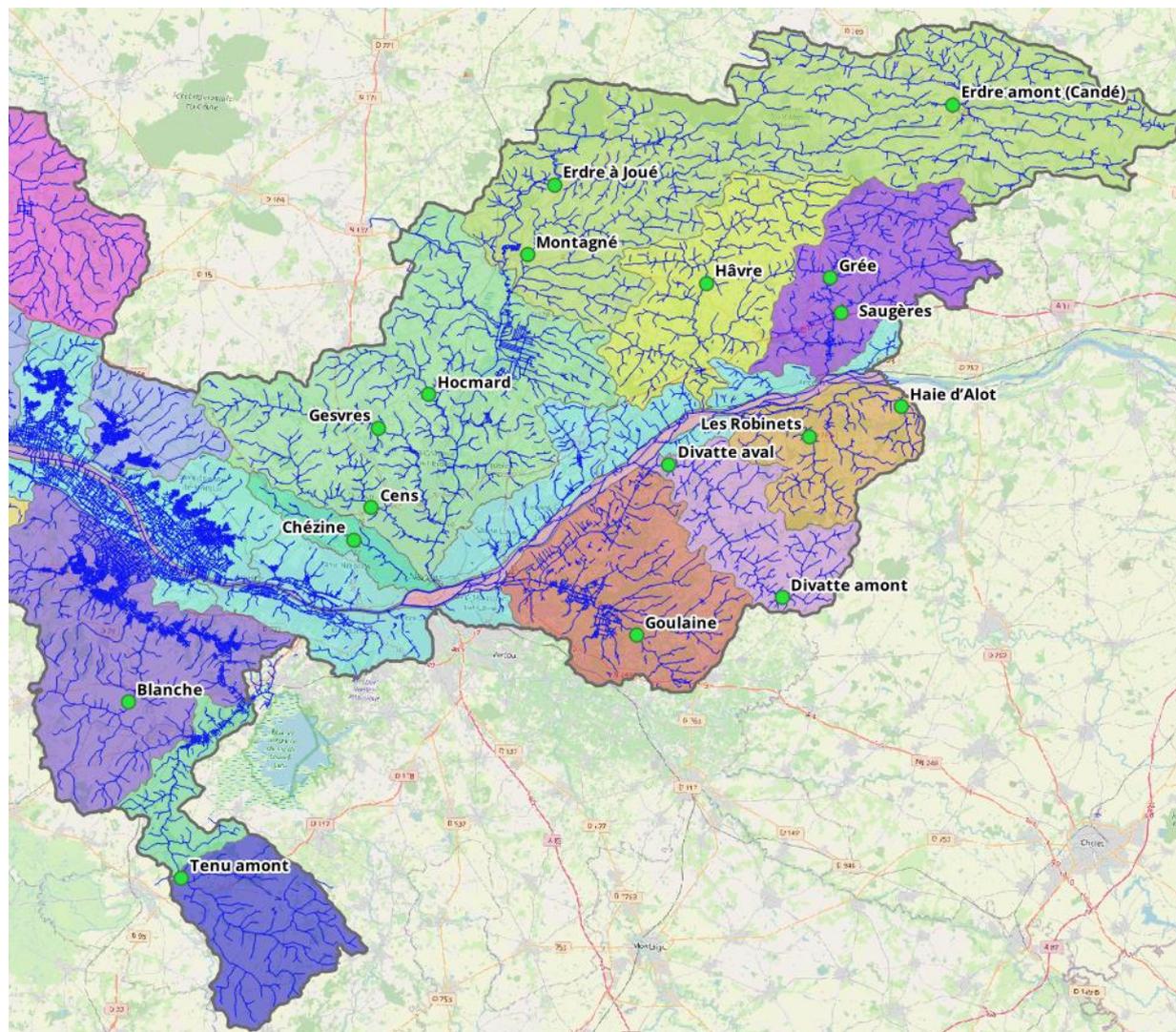


Figure 18 : Localisation des 17 stations de mesures du débit biologique

#### 2.1.4. CHOIX DES ESPECES CIBLES

Le choix des espèces cibles a été réalisé en concertation avec les acteurs du territoire sur la base des espèces actuellement présentes et notamment les espèces les plus sensibles. Pour ce faire, les données des pêches électriques réalisées sur les cours d'eau concernés ont été collectés dans les banques nationales de données OSUR et ASPE et étudiées statistiquement à l'aide d'une Analyse Factorielle des Correspondances sur laquelle a été projetée la répartition théorique des espèces piscicoles et les niveaux typologiques.



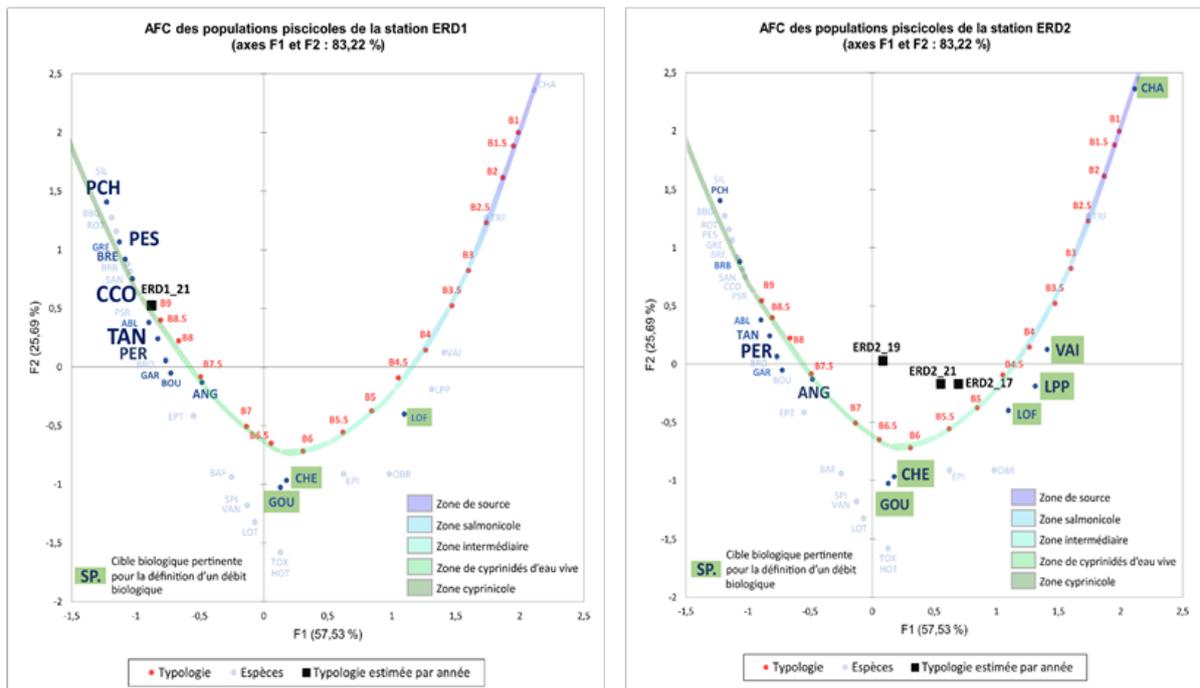


Figure 19 : étude des populations piscicoles dans le cadre du choix des espèces cibles

Le changement climatique n'a pas été retenu comme argument pour choisir une espèce non présente ou moins sensible, celui-ci ne devant être utilisé que dans un cadre prospectif d'après le guide relatif aux études HMUC établi par l'Agence de l'eau Loire Bretagne et l'OFB.

De même, certaines spécificités locales ont été prises en compte dans la sélection des espèces cibles et notamment :

- L'évolution amont / aval de certains contextes piscicoles : cas de l'Erdre où le secteur aval est plutôt en contexte cyprinicole ;
- Le positionnement de certains cours d'eau en contexte piscicole intermédiaire malgré la présence d'espèces repère d'un contexte salmonicole du fait de l'implantation impossible de la truite fario (débit trop faible) : cas du Montagné, affluent de l'Erdre

Les espèces et guildes cibles retenues pour chacune des stations sont les suivantes :

Tableau 4 : Espèces cibles retenues dans le cadre de la détermination des débits biologiques

Station	Espèces cibles	Guildes cibles	Commentaire
Hâvre	Loche, Goujon, Barbeau	Mouille, Rive	
Blanche	Loche	Mouille, Rive	
Cens	Truite (adulte et juvénile), Chabot, Loche, Vairon	-	
Chézine	Loche, Goujon, Barbeau, Vairon	Radier	Cours d'eau de qualité médiocre. Le débit permet le maintien des populations rhéophiles.
Divatte amont	Loche, Goujon, Barbeau, Vairon	Rive, radier	Présence de zones de refuge sur la partie amont du bassin mais secteur fortement contraint par des étiages sévères.
Divatte aval	Loche, Goujon, Barbeau, Vairon, Chabot	Rive, radier	Le barbeau est conservé même s'il est absent des inventaires car il est représentatif de la problématique des



Station	Espèces cibles	Guildes cibles	Commentaire
			espèces rhéophiles retrouvées dans les inventaires.
<b>Erdre amont (Candé)</b>	Loche, Goujon, Barbeau, Vairon, Chabot	Rive, radier	La loche et le vairon sont conservées car présents sur l'amont du bassin versant.
<b>Erdre à Joué</b>	Loche, Barbeau, Vairon, Chabot	Rive, radier	
<b>Gesvres</b>	Truite (adulte et juvénile), Loche, Vairon	-	
<b>Goulaine</b>	Loche, Goujon, Vairon	Mouille, rive	Les affluents sur l'amont du bassin sont plutôt en contexte piscicole intermédiaire ce qui justifie l'intégration de la loche aux espèces cibles.
<b>Grée</b>	Loche, Goujon, Barbeau, Vairon	Rive, radier	
<b>Haie d'Alot</b>	Loche, Goujon, Barbeau, Vairon	Mouille, rive	Contexte piscicole particulier : milieu plutôt préservé d'un point de vue habitat mais le débit est insuffisant.
<b>Hocmard</b>	Loche, Goujon, Barbeau, Vairon	Rive, radier	Contexte piscicole intermédiaire voire salmonicole dégradé. Présence de lamproie de Planer sur un affluent ne connaissant pas de problématique d'assèchement : le Rupt. Absence de travaux sur ce cours d'eau dans le Contrat territorial eau.
<b>Montagné</b>	Loche, Goujon, Vairon	Rive	
<b>Les Robinets</b>	Loche, Goujon, Barbeau, Vairon	Rive, radier	Contexte piscicole cyprinicole voire intermédiaire sur la partie en Maine-et-Loire.
<b>Saugères</b>	Loche, Goujon, Barbeau, Vairon	Rive, radier	Contexte piscicole cyprinicole voire intermédiaire.
<b>Tenu amont</b>	Loche, Goujon, Barbeau, Vairon	Rive, radier	

### 2.1.5. CAMPAGNES DE TERRAIN

Les dates de réalisation des campagnes de terrain sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5 : Dates de réalisation des campagnes de terrain

Station	Date de réalisation de la campagne		Station	Date de réalisation de la campagne	
	Q1	Q2		Q1	Q2
<b>Havre</b>	31/05/2023	07/02/2023	Goulaine	22/02/2023	28/03/2023
<b>Blanche</b>	06/06/2023	17/04/2023	Grée	30/05/2023	10/02/2023
<b>Cens</b>	06/06/2023	10/05/2023	Haie d'Alot	08/02/2023	28/03/2023
<b>Chézine</b>	31/05/2023	10/05/2023	Hocmard	22/02/2023	17/04/2023
<b>Divatte amont</b>	28/02/2023	29/03/2023	Montagné	31/05/2023	10/05/2023
<b>Divatte aval</b>	23/02/2023	28/03/2023	Les Robinets	08/02/2023	28/03/2023



<b>Erdre amont (à Candé)</b>	05/06/2023	14/02/2023	Saugère	31/05/2023	07/02/2023
<b>Erdre (à Joué-sur-Erdre)</b>	05/06/2023	13/02/2023	Tenu Amont	06/06/2023	11/05/2023
<b>Gesvres</b>	06/06/2023	14/02/2023			

### 2.1.6. DETERMINATION DES BORNES THEORIQUES DES DEBITS BIOLOGIQUES

La définition des bornes de débit biologiques s'appuie sur un processus en 3 étapes :

- 🔸 **Étape A** : Réalisation des courbes habitats et des courbes de SPU à partir du fichier officiel IRSTEA ESTIM'HAB. Le format original a été conservé afin de pouvoir transférer ces données « normalisées » aux services instructeurs pour bancarisation.
- 🔸 **Étape B** : Extension des données du modèle sur 101 données afin de préciser de façon beaucoup plus fine les relations Q/SPU. L'écart entre deux débits est déterminé alors par la formule  $((Q2*5)-(Q1/10))/100$ . Sur la base de ces données, les équations reliant les débits Q aux SPU pour chaque espèce / guildes sont alors récupérées du fichier officiel IRSTEA ESTIM'HAB. Elles permettent ainsi un recalcul immédiat de toutes les valeurs de SPU en fonction d'une quelconque valeur de débit dans l'intervalle de validité du modèle (Q1/10 et Q2\*5).
- 🔸 **Étape C** : Détermination des points de rupture de pente à l'aide de tests statistiques. Deux points de débits biologiques (DB) sont retenus :

  - Point DB1 (borne basse) : point de rupture de la courbe située avant la valeur maximale de SPU. Ce point correspond mathématiquement à la limite de la zone de décroissance rapide et régulière.
  - Point DB2 (borne haute) : point de rupture situé entre le point DB1 et la valeur maximale de SPU. Ce point permet ainsi d'obtenir un débit de perte de SPU raisonnable au sein de la zone de décroissance régulière.



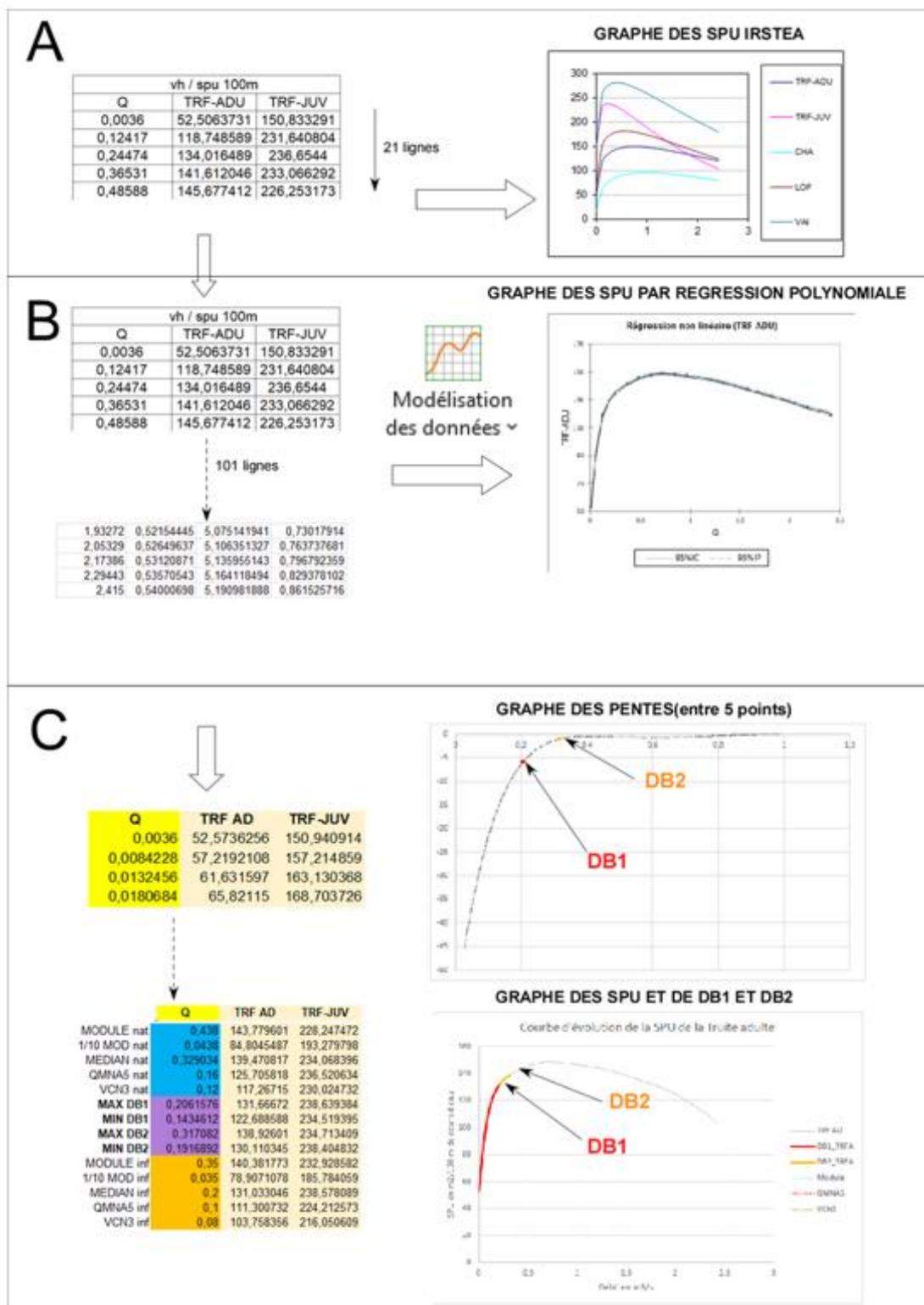


Figure 20 : synoptique de définition des bornes de débit biologique

Les variations de pente sont très différentes pour chaque espèce, mais aussi, pour une même espèce, entre les stations. Les vitesses d'accélération des pertes de SPU varient en fonction de chaque station (morphologie et hydrologie) et sont propres à chaque espèce, selon leurs préférences écologiques vis-à-vis des hauteurs d'eau et des vitesses de courant.

Il n'est donc pas recommandé d'imposer un « seuil » d'accroissement homogène pour toutes les espèces, ni pour toutes les stations, mais bien d'apprécier les courbes une par une et au cas par cas. Ainsi, si la détermination du débit biologique 1 (DB1) est réalisée de manière



purement statistique, la détermination du débit biologique 2 (DB2) est le fruit du croisement entre statistique et expertise hydrobiologique.

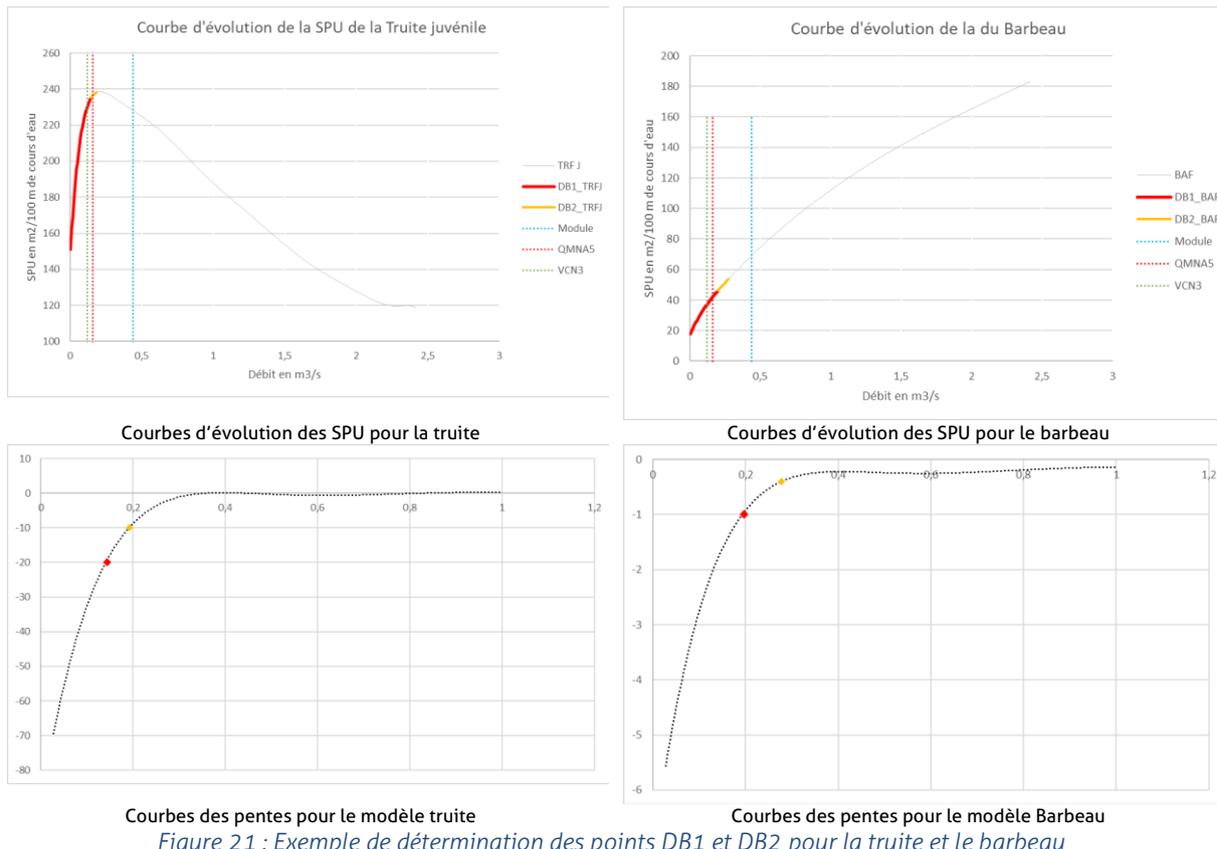
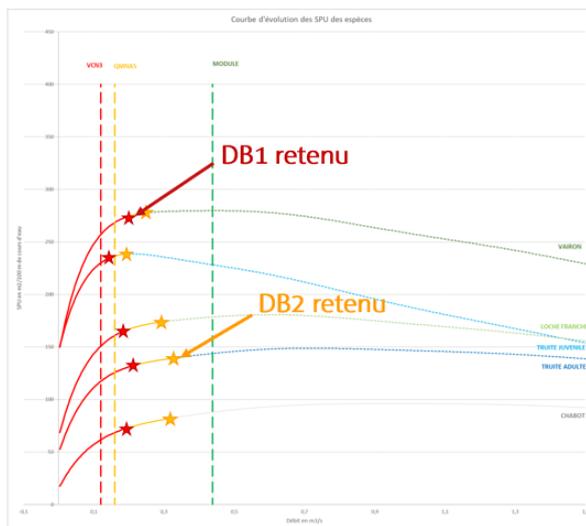


Figure 21 : Exemple de détermination des points DB1 et DB2 pour la truite et le barbeau

Pour chaque station, les DB1 et DB2 théoriques retenus sont les suivants :

- ✔ DB1 retenu : DB1 le plus important de l'ensemble des espèces cibles ;
- ✔ DB2 retenu : DB2 le plus important de l'ensemble des espèces cibles.

L'ensemble de ces éléments ont fait l'objet d'une validation lors du groupe technique spécifique débit biologique du 23/11/2023.



Une espèce différente peut être à l'origine de la définition du DB1 et du DB2.



# 3. VOLET USAGE



## 3.1. ALIMENTATION EN EAU POTABLE

### 3.1.1. DONNEES MOBILISEES ET CONSOLIDATION DES VOLUMES DE PRELEVEMENTS

Les volumes prélevés pour l'alimentation en eau potable (AEP) ont été déterminés à partir de relevés compteurs ou volumétriques fournis par les différents producteurs d'eau du territoire et complétées par les données redevance de l'Agence de l'eau Loire Bretagne. Ces données ont été fournies à différents pas de temps : journalier, mensuel, annuel, sous différents formats et sur des emprises temporelles différentes. Le détail et la source des données mobilisées sont synthétisés dans le tableau en page suivante.

Dans un premier temps, la complétude des chroniques transmises a été étudiée. Plusieurs anomalies ont ainsi été identifiées et soumises aux structures compétentes en la matière afin de convenir des méthodes correctives ou estimatives à employer.

Ainsi, concernant :

- Les points de prélèvements gérés par Atlantic'eau de Bovieux, Freigné, les Gâtineaux, l'île Delage, le Blonnetais et Saint-Sulpice-des-Landes (Feugas), un coefficient correcteur de 1,05 a été appliqué sur le volume fourni, celui-ci correspondant non pas au volume prélevé mais au volume produit.
- Les points de prélèvements gérés par Saint-Nazaire Agglo-CARENE, un coefficient correcteur de 1,03 a été appliqué sur le volume fourni, celui-ci correspondant non pas au volume prélevé mais au volume produit.

L'attribution à une entité et une sous-entité de référence a été réalisée par croisement géographique et /ou pour les entités hydrogéologiques, par caractérisation de l'aquifère prélevé.

### 3.1.2. DESCENTE D'ECHELLE DES VOLUMES DE PRELEVEMENTS AU PAS DE TEMPS MENSUEL

En vue du désinfluençement des régimes hydrologiques, les données ont été reventilées à l'échelle mensuelle selon les principes suivants :

- Point de prélèvement de Freigné : ventilation du volume annuel au prorata de la répartition mensuelle moyenne observée sur la période 1994 à 1997 et 1999 ;
- Point de prélèvement des Chaponneaux et points de prélèvement : ventilation du volume annuel de prélèvement au prorata de la répartition mensuelle moyenne des volumes de distribution sur la période 2016 à 2021 ;
- Point de prélèvement de Bovieux : ventilation du volume annuel au prorata de la répartition mensuelle moyenne des volumes observés sur la période 2015 et 2019 à 2021. L'année 2017 a été écartée comme référence car présentant une typologie particulière ;
- Point de prélèvement de Blonnetais : ventilation du volume annuel au prorata de la répartition mensuelle moyenne des volumes observés sur la période 2015 à 2017 ;
- Point de prélèvement de Mauves / La Roche : ventilation du volume annuel au prorata de la répartition mensuelle moyenne des volumes observés sur la période 2016 à 2020 ;
- Point de prélèvement du Champ captant du Cul du Moulin : ventilation du volume annuel au prorata de la répartition mensuelle moyenne des volumes observés sur la période 2015 à 2020 ;



- 🌿 Points de prélèvement de Trigodet : ventilation du volume annuel au prorata de la répartition mensuelle moyenne des volumes observés sur la période 2015 à 2017 et 2020 à 2021 ;
- 🌿 Points de prélèvement des Gâtineaux, de l'île Delage et Saint-Sulpice-des-Landes (Les Feugas) : ventilation du volume annuel au prorata de la répartition mensuelle moyenne des volumes observés sur la période 2015 à 2021 ;
- 🌿 Points de prélèvement de la Janvraie et du Plessis-Pas-Brunet : ventilation du volume annuel au prorata de la répartition mensuelle moyenne des volumes observés sur 2021 ;
- 🌿 Point de prélèvement du Maupas : ventilation du volume annuel au prorata de la répartition mensuelle moyenne des volumes observés sur les autres points de prélèvements AEP du territoire d'étude ;



Tableau 6 : Source et pas de temps des données AEP collectées

Point de prélèvement AEP	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<b>Basse Goulaine (Ile Loridaeu)</b>	Prod. Mens.										
<b>Champ captant du Cul du Moulin</b>	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Jour.
<b>Forage des Thuyas à VRITZ</b>	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. An.
<b>Les Chaponneaux</b>	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. An.
<b>La Chaussée Breton</b>	-	-	-	-	-	-	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.
<b>Le Bohlet</b>	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.
<b>Le Châtelier</b>	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.
<b>Les Gâtes</b>	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.
<b>Tête à la Vache</b>	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.
<b>Les Marais</b>	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.
<b>Pont du Marais</b>	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.
<b>Mauves / La Roche</b>	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.
<b>Erdre</b>	-	-	-	-	-	-	-	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.
<b>Blonnetais</b>	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. An.
<b>Bovieux</b>	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. An.	Prod. Jour.	Prod. Jour.
<b>Freigné (P1+F1 La Beltière)</b>	Prod. Mens.										



Point de prélèvement AEP	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Ile Delage	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.
La Janvraie MSM	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. An.	Prod. An. Jour.						
Les Gâtineaux	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.
Plessis Pas Brunet	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. Jour.	Prod. Jour. An.
Saint Sulpice (Les Feugas)	-	-	-	Prod. An.	Prod. An.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Jour.
Trigodet	AELB An.	AELB An.	AELB An.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. Mens.	Prod. An.	Prod. An.	Prod. Jour.
Le Maupas	-	-	-	Prod. An.							
Sandum	Prod. Mens.	-	-								

**Source :**

AELB = Agence de l'eau Loire Bretagne

Prod. = Producteur d'eau potable

**Pas de temps :**

An. = Annuel

Mens. = mensuel

Jour. = journalier



### 3.1.3. GROS CONSOMMATEURS

Les données relatives aux gros consommateurs sur le réseau d'eau potable ont été communiquées par les producteurs / distributeurs AEP du périmètre d'étude. Selon les structures, un historique plus ou moins important a été transmis sous différents formats dont certains difficilement exploitables.

Le détail est présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 7 : Disponibilité des données abonnés « Gros consommateur »

Structure	Format	Emprise temporelle	Indicateur
Nantes métropole	Tableur numérique	2019 à 2021	Volume annuel par abonné « gros consommateur » (> 10 000 m <sup>3</sup> /an)
Atlantic'eau	Tableur numérique	2021	Volume annuel par abonné « gros consommateur » (> 10 000 m <sup>3</sup> /an)
Mauges Communauté	Tableur numérique	2018 à 2021	Volume annuel moyen par abonné « gros consommateur » (> 10 000 m <sup>3</sup> /an)
Saint-Nazaire Agglo-CARENE	Tableur numérique	2016 à 2021	Volume annuel par abonné « gros consommateur » (> 6 000 m <sup>3</sup> /an)
Syndicat d'eau de l'Anjou	Mail	-	Libellé des abonnés « gros consommateur » (> 10 000 m <sup>3</sup> /an)
CAP Atlantique La Baule-Guérande Agglo	Papier	2011 à 2021	Volume annuel par abonné « gros consommateur » (> 6 000 m <sup>3</sup> /an)

Compte tenu de l'hétérogénéité que revêt la dénomination « Gros consommateur » (seuils de définition différents), seuls les abonnés consommant plus 10 000 m<sup>3</sup>/an ont été retenus dans le cadre de cette étude.

## 3.2. ASSAINISSEMENT COLLECTIF

### 3.2.1. DONNEES MOBILISEES ET CONSOLIDATION

Plusieurs sources de données ont été mobilisées afin de pouvoir estimer les volumes rejetés par les ouvrages d'épuration collectifs du bassin versant :

- ✎ L'autosurveillance journalière des volumes sortant des ouvrages d'assainissement collectifs, compilée par l'Agence de l'eau Loire Bretagne ;
- ✎ L'autosurveillance journalière des volumes sortants ou entrants des ouvrages d'assainissement collectifs, disponible auprès des structures locales en charge de la compétence ;
- ✎ Des informations de volume sortants ou entrants disponibles, auprès des DDT(M) du territoire d'étude ;
- ✎ Les caractéristiques techniques des ouvrages d'assainissement disponibles sur le portail national relatif à l'assainissement collectif : <https://www.assainissement.developpement-durable.gouv.fr/PortailAC/>

A noter que :



- Seules les stations d'épuration dont le rejet est compris dans le périmètre d'étude ont été étudiées ;
- Seules les données d'autosurveillance des points réglementaires de type A5 (toute sortie) ont été mobilisées pour les flux rejetés ;
- En ce qui concerne les données des EPCI et DDT(M) : pour les ouvrages d'assainissement collectif qui ne disposaient que d'un suivi en entrée, il a été considéré que le flux de sortie équivalait au flux d'entrée après concertation avec les structures gestionnaires.

Le choix de la source de données mobilisée pour chaque année, a été réalisée selon le logigramme suivant :

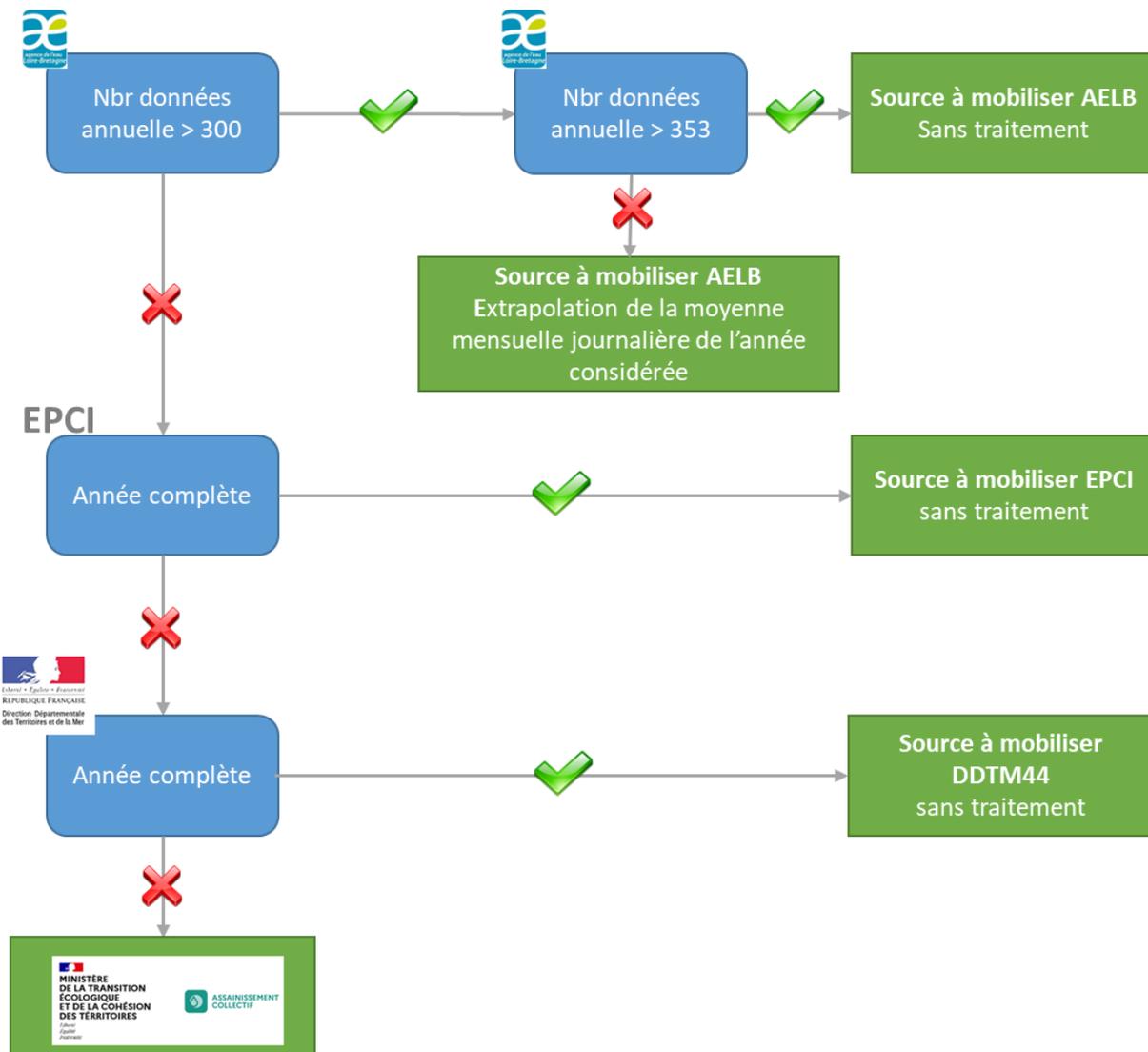


Figure 22 : Détermination de la source de données à mobiliser pour calculer le flux rejeté pour chaque ouvrage d'assainissement collectif et pour chaque année

Un travail de consolidation de la localisation du rejet a également été réalisé, notamment sur la masse d'eau de rejet. Ainsi, le code masse d'eau renseigné dans les données du portail national relatif à l'assainissement collectif a été comparé à celui retrouvé par croisement géographique.

22 ouvrages d'assainissement collectif ont été identifiés comme présentant une éventuelle anomalie. Après expertise, la masse d'eau de rejet a été corrigée ou confirmée. Le détail des corrections apportées est présenté dans le tableau suivant :



Tableau 8 : ouvrages d'assainissement collectif présentant une potentielle anomalie d'attribution de la masse d'eau

Cd STEU	Cd ME ERU	Cd ME SIG	Cd ME validée	Entité validée	Sous-entité validée
0444090S0002	FRGR0556	FRGR2079	FRGR2079	Acheneau-Tenu	Tenu amont
0444186S0001	FRGR0556	FRGR2098	FRGR0556	Acheneau-Tenu	Acheneau - Tenu aval
0444220S0001	FRGR2160	FRGT28	FRGR2160	Acheneau-Tenu	Acheneau - Tenu aval
0444030S0002	FRGR1610	FRGR0557	FRGR0557	Brière-Brivet	Marais de la Brière
0444050S0003	FRGR1563	FRGR0557	FRGR0557	Brière-Brivet	Marais de la Brière
0444053S0002	FRGR1563	FRGR0557	FRGR0557	Brière-Brivet	Brivet amont
0444098S0003	FRGR1610	FRGR0557	FRGR0557	Brière-Brivet	Brivet amont
0444189S0002	FRGR1563	FRGR0557	FRGR0557	Brière-Brivet	Marais de la Brière
0444026S0012	FRGR0539a	FRGR1551	FRGR1551	Erdre	Erdre aval
0444201S0001		FRGR0539B	FRGR0539B	Erdre	Erdre aval
0444203S0002	FRGR0541	FRGR1605	FRGR1605	Erdre	Marais du Nord Loire
0444003S0002	FRGR1609	FRGT28	FRGT28	La Loire et ses petits affluents	Loire
0444115S0001	FRGR0537	FRGT28	FRGT28	Hâvre-Grée	Loire
0444023S0004	FRGR1015	FRGR1562	FRGR1562	Hors BV	Brivet amont
0444175S0003	FRGR1557	FRGR1610	FRGR1610	Hors BV	Marais de la Brière
0444009S0001	FRGT28	FRGR2172	FRGT28	La Loire et ses petits affluents	Loire
0444029S0002	FRGT28	FRGR2243	FRGT28	La Loire et ses petits affluents	Loire
0444169S0002	FRGR1606	FRGR2243	FRGT28	La Loire et ses petits affluents	Loire
0449244S0004	FRGR0007f	FRGR1609	FRGR0007f	La Loire et ses petits affluents	Loire
0444069S0002	FRGC46	FRGC45	FRGC45	Littoral	Littoral
0444184S0010	FRGC46	FRGT28	FRGT28	Littoral	Loire
0444046S0001	FRGR1604	FRGT28	FRGT28	Sud Estuaire et Côte de Jade	Boivre

### 3.2.2. ESTIMATION DES VOLUMES REJETES PAR LES OUVRAGES D'ASSAINISSEMENT COLLECTIF

Les données d'autosurveillance ont été fournies à l'échelle journalière ou mensuelle. En conséquence, elles ont été utilisées directement pour estimer les restitutions.

L'estimation des flux rejetés à partir de l'agglomération d'assainissement a, quant à elle, été réalisée selon l'algorithme suivant :





La valeur de l'Équivalent Habitant (EH) en m<sup>3</sup>/abonné a été modulée à partir des informations fournies par les structures distributrices.

Les valeurs suivantes ont été retenues :

Tableau 9 : Valeur de l'équivalent habitant selon le secteur de distribution (abonné et habitant) utilisé pour l'estimation des flux d'assainissement collectif

Structure	Consommation m <sup>3</sup> /abonné/an	Ratio abonné/hab	Consommation m <sup>3</sup> /hab/an
Atlantic'eau	86	2,18	39,4
Syndicat d'eau de l'Anjou	104	2,08	50
CAP Atlantique La Baule-Guérande Agglo NORD	71,25	1,71	41,7
CAP Atlantique La Baule-Guérande Agglo CENTRE	62,95	1,4	45
CAP Atlantique La Baule-Guérande Agglo SUD	72,65	1,6	45,4
Saint-Nazaire Agglo-CARENE	81,77	1,83	44,7
Nantes Métropole	145	3	48,3
Mauges Communauté	90,5	1,84	49,2
Eau du Morbihan	74	1,68	44

### 3.3. ASSAINISSEMENT NON COLLECTIF (ANC)

Les données liées à l'Assainissement Non Collectif ont été demandées et collectées directement auprès des SPANC implantés sur le territoire d'étude. La figure ci-dessous précise la disponibilité de l'information qui a pu être collectée par commune.



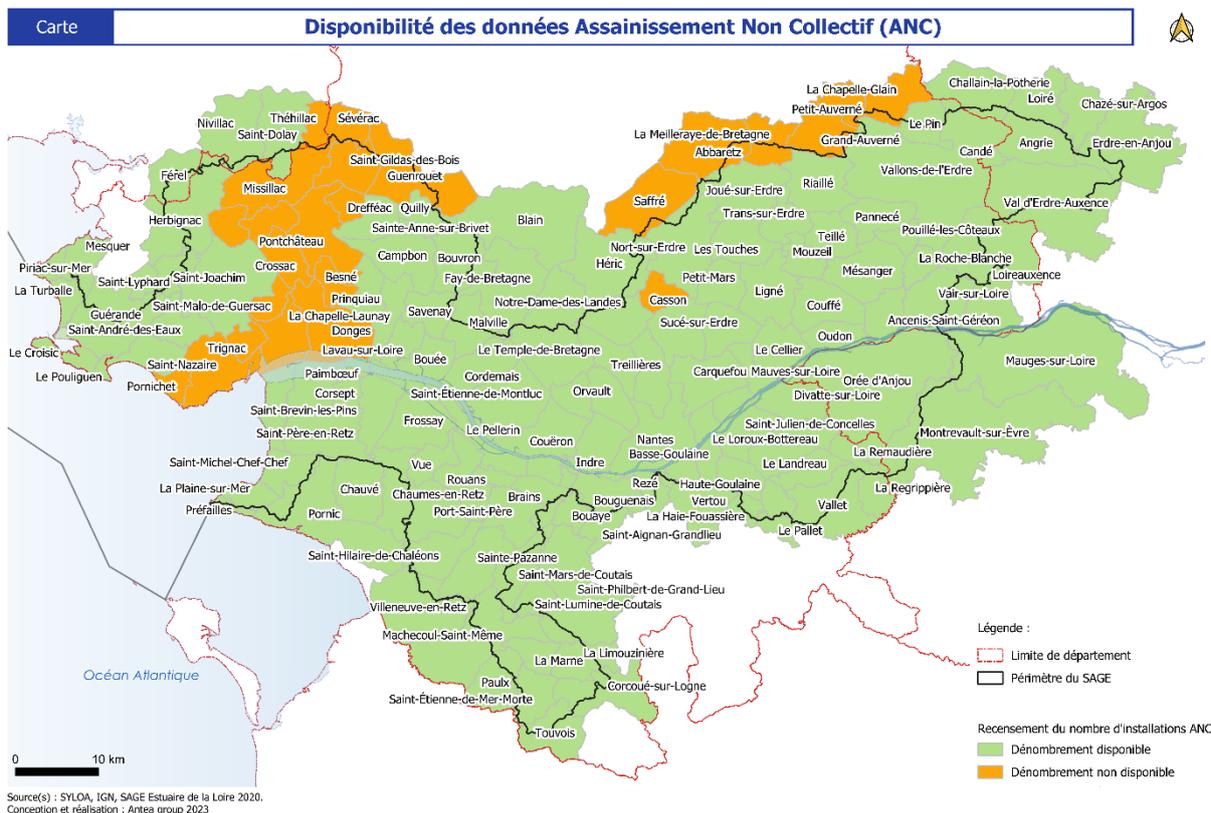


Figure 23 : Disponibilités des données relatives à l'Assainissement Non Collectif (ANC)

Pour les communes dont le nombre d'installation d'Assainissement Non Collectif n'a pas été fourni une extrapolation a été réalisée à partir des données disponibles :

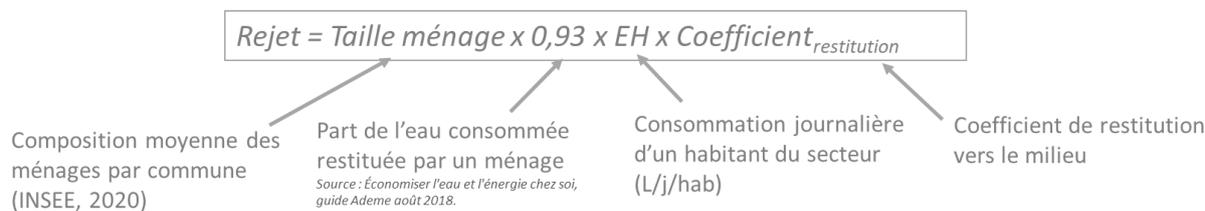
- Dans un premier temps, chaque commune a été classée selon sa population. Ainsi, des tranches de 1000 habitants ont été réalisées. La commune de Nantes n'a pas été retenue dans le calcul du fait de son caractère spécifique (population > 300 000 habitants).
- La médiane du nombre d'installations ANC des communes la composant a été calculée par tranche de population.
- La médiane de la tranche de population dont fait partie la commune sans information est reportée sur celle-ci.

Tableau 10 : Valeurs de référence des volumétries d'installation ANC par tranche de population des communes

Tranche de population (Nbr d'habitants)	Nb d'installations ANC minimum / commune	Nb d'installations ANC maximum / commune	Nb d'installations ANC moyen / commune	Nb d'installations ANC médian / commune
<1000	148	241	195	193
1000-2000	28	599	261	237
2000-3000	35	2575	553	530
3000-4000	77	1093	508	511
4000-5000	28	1385	627	647
5000-6000	171	714	422	501
6000-7000	58	8717	1745	1020
7000-8000	226	2513	1033	838
8000-9000	194	926	574	620
9000-10000	222	1497	909	708
10000-15000	202	653	473	563
15000-20000	184	2729	1006	649,5

>20000	41	789	408	465,5
--------	----	-----	-----	-------

L'estimation des flux rejetés pour les ouvrages d'assainissement non collectif a été réalisée selon l'algorithme suivant en considérant qu'une installation correspondait à un ménage :



La taille des ménages à l'échelle communale a été collectée depuis le site officiel des statistiques locales de l'INSEE.

Cet indicateur est visualisable directement à l'adresse suivante :

[https://statistiques-locales.insee.fr/?view=map1&indics=bdcom.taille\\_menage&serie=2020&lang=fr](https://statistiques-locales.insee.fr/?view=map1&indics=bdcom.taille_menage&serie=2020&lang=fr)

De façon similaire à ce qui a été réalisé pour les flux rejetés par les ouvrages d'assainissement collectif, la valeur de l'Équivalent Habitant (EH) en m<sup>3</sup>/hab/an a été modulée à partir des informations fournies par les structures distributrices.

Tableau 11 : Valeur de l'équivalent habitant selon le secteur de distribution (abonné et habitant) utilisé pour l'estimation des flux d'assainissement non collectif

Structure	Consommation m <sup>3</sup> /abonné/an	Ratio abonné/hab	Consommation m <sup>3</sup> /hab/an
Atlantique'eau	86	2,18	39,4
Syndicat d'eau de l'Anjou	104	2,08	50
CAP Atlantique La Baule-Guérande Agglo NORD	71,25	1,71	41,7
CAP Atlantique La Baule-Guérande Agglo CENTRE	62,95	1,4	45
CAP Atlantique La Baule-Guérande Agglo SUD	72,65	1,6	45,4
Saint-Nazaire Agglo-CARENE	81,77	1,83	44,7
Nantes Métropole	145	3	48,3
Mauges Communauté	90,5	1,84	49,2
Eau du Morbihan	74	1,68	44

Le coefficient de restitution du flux rejeté par une installation ANC a été établi en concertation avec les acteurs du territoire compétents en la matière.

Ainsi, il a été décidé que :

- 🌿 Seuls 30% des rejets superficiels arrivaient au cours d'eau en période hivernale. En effet, ce type de rejet passe généralement par un système de fossés avant d'arriver au cours d'eau, ce qui favorise en période estivale, l'évaporation ou l'infiltration dans le sol.
- 🌿 Les rejets de type infiltration ne participaient pas à la recharge de la nappe souterraine mais plutôt de la Zone Non saturée (ZNS).

Enfin, compte tenu du manque de connaissance concernant le type de rejet (superficiel et/ou infiltration), une répartition 90/10 a été actée là où l'information n'a pu être transmise lors du COTECH du 20/02/2024. Ce ratio se base sur les retours des différents SPANC.



## 3.4. AGRICULTURE - IRRIGATION

### 3.4.1. CONSTITUTION D'UNE COUCHE POINTS DE PRELEVEMENTS IRRIGATION HARMONISEE

La méthodologie suivante a été suivie afin de constituer une couche unique de points de prélèvements irrigation sur le périmètre d'étude.

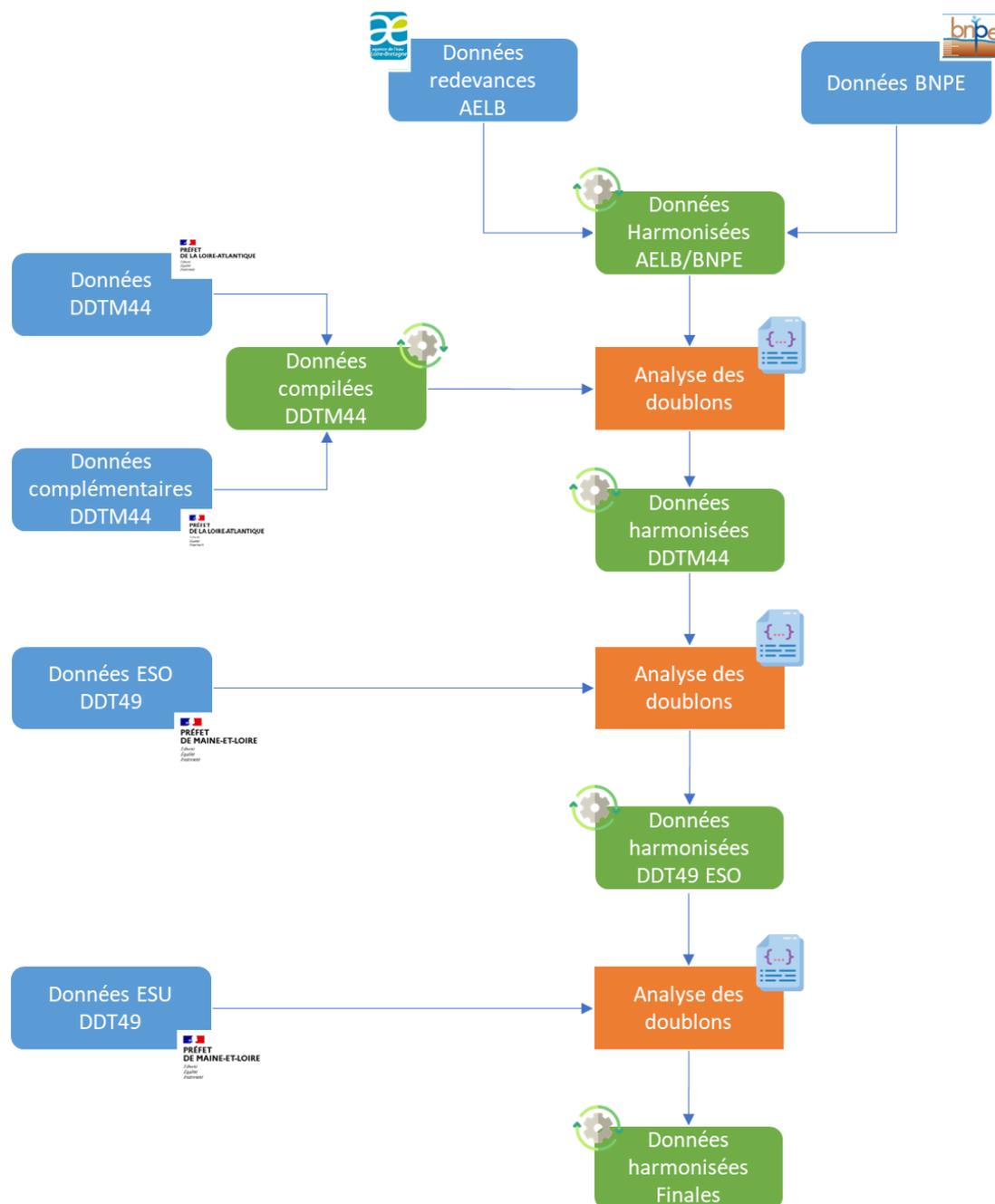


Figure 24 : Synoptique de rapprochement des différentes sources de données

Dans un premier temps, les données redevances anonymisées disponibles auprès de l'agence de l'eau Loire Bretagne ont été croisées avec les données exportées à l'échelle départementale de la Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE) (3 sources de données, soit une par département). Seuls les points compris dans le périmètre

d'étude sur la base des coordonnées (X/Y) et dont l'usage de référence fourni est valorisé en tant que « IRRIGATION » ont été conservés.

Tableau 12 : Volumétrie de points de prélèvements irrigation BNE et Agence de l'eau sur le périmètre d'étude

Source	Volumétrie
	307 points
	298 points

Les données de l'agence de l'eau servant à alimenter la BNPE, il semblait logique que l'ensemble des points devaient se retrouver dans la BNPE. Après croisement des deux sources de données, il est constaté que :

- 17 points du fichier Agence de l'eau ne disposent pas de code BNPE et en conséquence ne sont pas retrouvés dans cette source de données ;
- 8 points du fichier BNPE ne figurent pas dans le fichier Agence de l'eau.

Après expertise, il s'avère que sur les 17 points du fichier Agence de l'eau non retrouvés :

- 14 disposent de volume de prélèvement uniquement sur la chronique 1998 à 2007, période pour laquelle la BNPE n'est pas renseignée.
- 3 ont pu être rattachés par association du code alternatif au lieu du code BNPE. A noter que ces 3 points figurent dans la liste des 8 points BNPE non retrouvés dans le fichier Agence de l'eau.

N° ouvrage AELB	Code BNPE	Libellé point	Commune	X	Y
<b>155831</b>	OPR0000608929	LE LANDREAU	LANDREAU	371622	6685675
<b>155848</b>	OPR0000608930	LA GIRAUDIERE	BASSE-GOULAIN	362972	6686075
<b>156566</b>	OPR0000608977	LA GUILLUNIERE	CARQUEFOU	364673	6699320

En ce qui concerne les 5 points restants BNPE, 4 d'entre eux ne présentent des volumes prélevés qu'en 2021 ce qui explique leur absence dans le fichier Agence de l'eau dont la chronique s'arrête en 2020.

*NB : Pour la suite des traitements, l'ensemble de ces points ont été retrouvés après croisement avec les données DDT(M).*

Finalement, seul, le point de Croix Rouge (OPR0000085128) disposant de volumes de prélèvement de 2008 à 2020 a été ajouté aux données Agence de l'eau.

*Après croisement entre ces 2 sources données, la volumétrie des points de prélèvements irrigation sur le territoire s'élève à 308.*



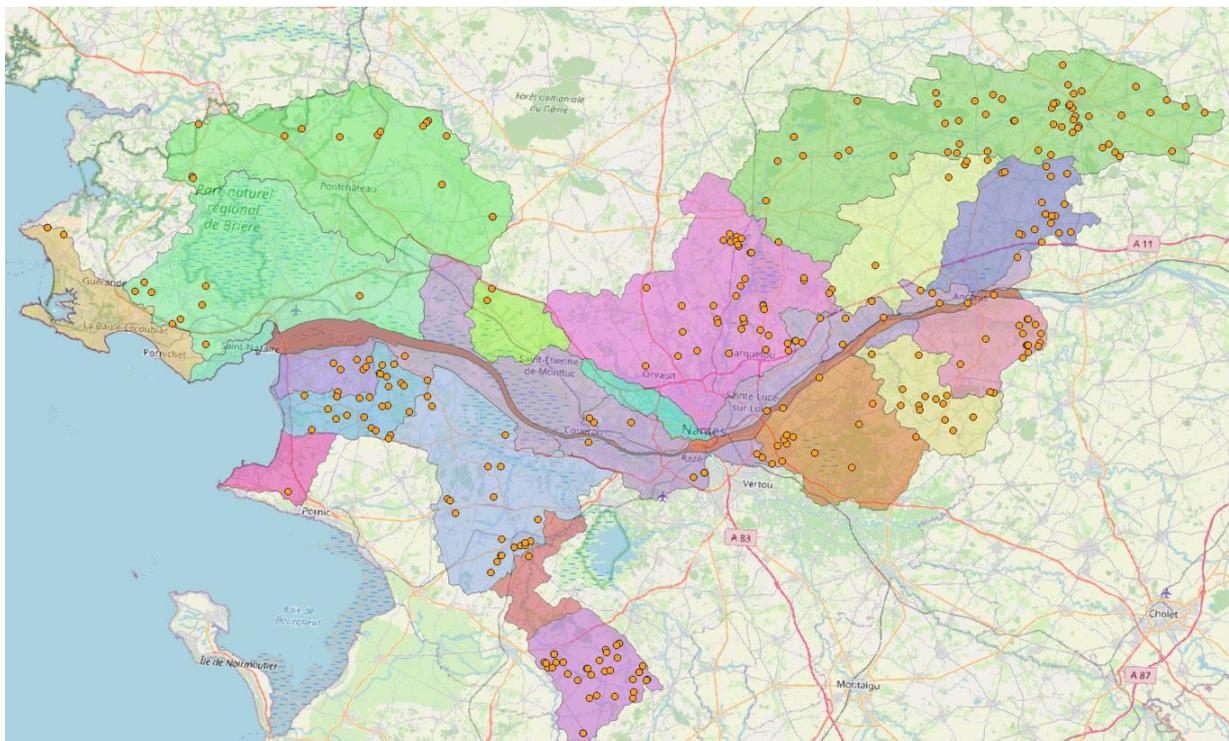


Figure 25 : Points de prélèvements irrigation issus du croisement entre les données agence de l'eau Loire Bretagne et la Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE)

Cette donnée harmonisée a ensuite été recroisée avec les données fournies par les Directions Départementales des Territoires (et de la Mer) (DDT(M)). 4 couches SIG différentes ont été fournies par les DDTM44 et DDT49.

- ▤ Une couche SIG concernant les prélèvements tout usage confondu et connus de la DDTM44 sur le périmètre d'étude (698 points)
- ▤ Une couche SIG complémentaire des prélèvements tout usage confondu et connus de la DDTM44 sur la commune de Loireauxence (73 points)
- ▤ Une couche SIG concernant les prélèvements souterrains tout usage confondu et connus de la DDT49 (46 points)
- ▤ Une couche SIG concernant les prélèvements superficiels et plans d'eau tout usage confondu et connus de la DDT49 (147 points)

Aucun point de prélèvement irrigation n'est connu sur la partie du territoire d'étude dépendant de la DDTM56.

Après expertise, le croisement des sources de données s'est fait en plusieurs étapes. Dans un premier temps, compte tenu de leur formalisme similaire, les différentes couches SIG de données émanant de la DDTM44 ont été fusionnées en une seule et unique source de donnée. Un filtre a ensuite été appliqué sur l'usage des points de prélèvements. Ainsi, seuls les points dont l'usage est caractérisé en tant que « irrigation », « abreuvement » ou qui n'est pas connu ont été conservés soit 546 points.



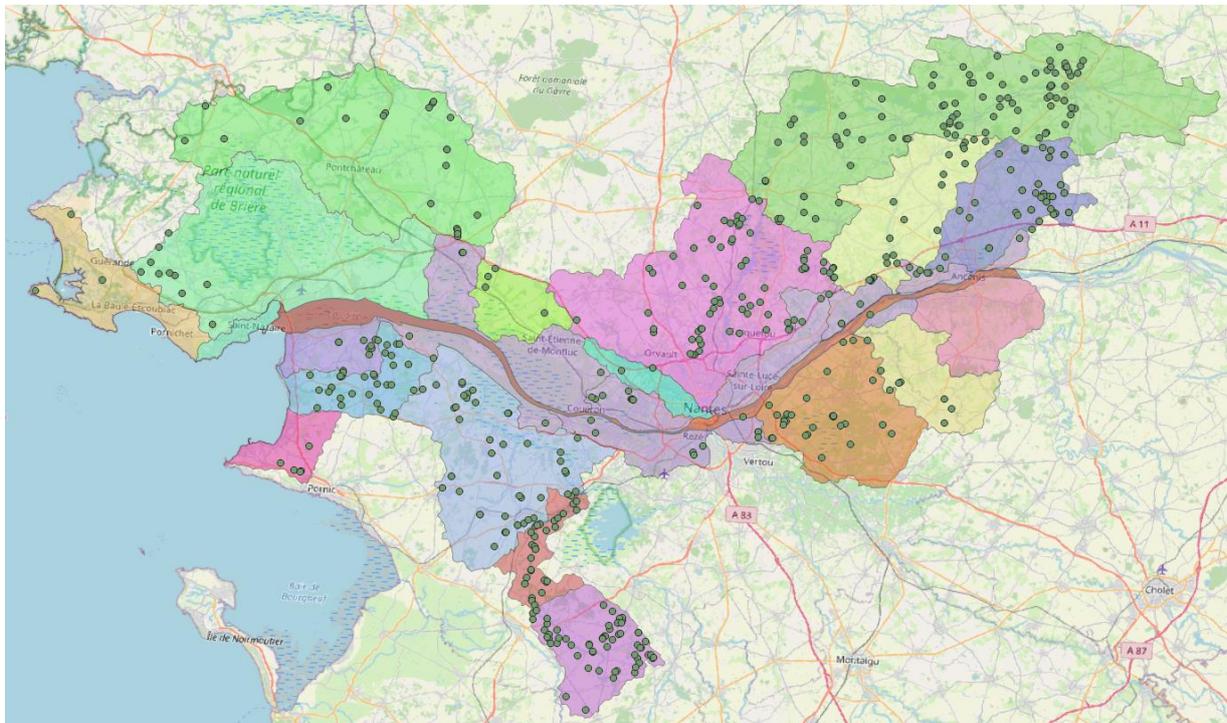


Figure 26 : Points de prélèvements connus de la DDTM44 et dont l'usage est caractérisé en tant que « Irrigation », « abreuvement » ou n'est pas connu

Dans un second temps, cette couche de données harmonisées a été confrontée aux 308 points de prélèvements irrigation issus du croisement des données de l'Agence de l'eau Loire Bretagne et de la BNPE ([AELB/BNPE]).

En l'absence d'identifiant unique et de coordonnées géographiques similaires entre les 2 sources de données ; modalités qui auraient permis un rapprochement simple ; les potentiels doublons ont été identifiés sur une base géographique. Ainsi, un tampon circulaire de rayon 500m a été tracé autour des 308 points [AELB/BNPE] afin d'identifier les points DDTM44 susceptibles d'être identiques. Pour chaque cas, une expertise manuelle a alors été réalisée sur la base des informations attributaires suivantes : lieu-dit, nom du point et ressource captée afin d'identifier les doublons réels.

Dans le cas où un même point de prélèvement était identifié dans les 2 sources de données, un identifiant unique et commun a été attribué afin de pouvoir rattacher les informations attributaires.

197 points de prélèvements communs ont été identifiés parmi lesquels figurent les 4 points BNPE non retrouvés dans les données AELB dont seul le volume 2021 était disponible.



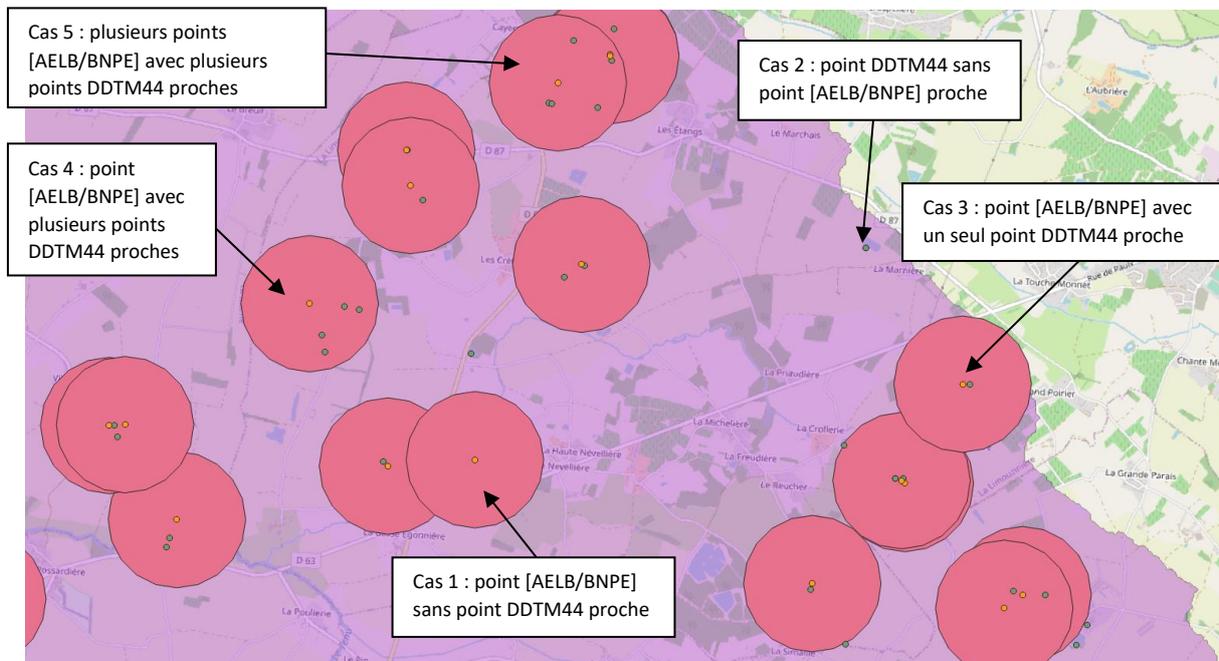


Figure 27 : Exemple d'identification de potentiels doublons entre les données [AELB/BNPE] et les données DDTM44

**NB** : un 6ème cas, non représenté sur la figure ci-dessus est possible à savoir : un point DDTM44 avec plusieurs points [AELB/BNPE] proches.

De même, certains points [AELB/BNPE] peuvent correspondre à plusieurs points DDTM44 (cas d'un compteur agence de l'eau commun à 2 forages par exemple).

Un travail identique a ensuite été réalisé successivement avec la couche SIG des prélèvements en eau souterraines puis avec celle des prélèvements superficiels de la DDT49. Seuls les points dont l'usage est caractérisé en tant que « irrigation », « abreuvement » ou qui n'est pas connu ont été conservés soit 120 points.

38 points de prélèvements communs ont ainsi été identifiés dont 8 points déjà connus de la DDT49.

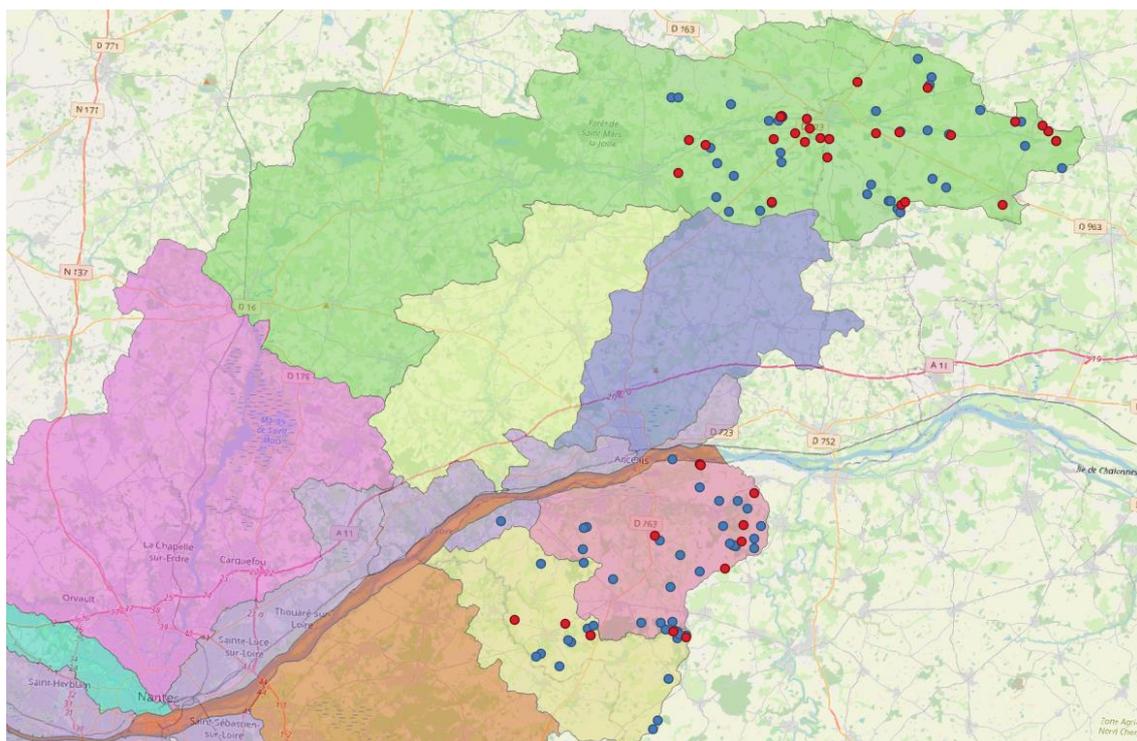
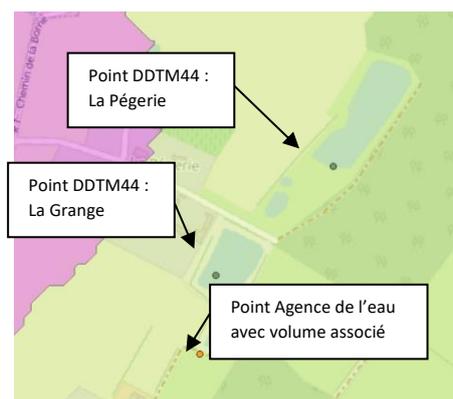


Figure 28 : Points de prélèvements connus de la DDT49 et dont l'usage est caractérisé à « Irrigation », « abreuvement » ou n'est pas connu

Compte tenu du fait que les prélèvements liés à l'abreuvement du bétail font l'objet d'une caractérisation à part entière (cf. partie abreuvement du cheptel) et afin d'éviter un double compte des volumes, il a été décidé de ne pas conserver les points de prélèvements dont l'usage était uniquement lié à l'abreuvement.

Par conséquent, 695 points uniques de prélèvements irrigation ont été dénombrés sur le périmètre du SAGE Estuaire de la Loire. Parmi ce pool de points, certains disposent d'une donnée de volumes comptabilisée de façon agrégée c'est-à-dire regroupant plusieurs points de prélèvements.

A titre d'exemple, le point de prélèvement d'identifiant BNPE OPR0000066688 dit « LA GRANGE+LA PEGERIE » qui dispose d'une chronique de volume de 1998 à 2020 dans le fichier Agence de l'eau correspond à deux points connus de la DDTM44 : le point de la Pégerie et le point de la Grange.



Un pré-traitement a donc été réalisé afin d'éviter tout double compte de volumes réduisant la volumétrie à **683 points**.

### 3.4.2. ATTRIBUTION DES VOLUMES DE PRELEVEMENTS

Sur les 683 points recensés, tous ne disposent pas de chroniques de volumes de prélèvement annuel. Ainsi, seulement 43% (294 points) disposent de volumes comptabilisés.

Sur les 389 points restants, 160 (soit un peu moins d'un quart) disposent d'une information concernant le volume de prélèvement autorisé et 47 un débit nominal autorisé. Pour 97 prélèvements effectués via un plan d'eau, le volume du plan d'eau est précisé. Enfin, pour 13% des points de prélèvements, aucune information de volume n'est disponible.

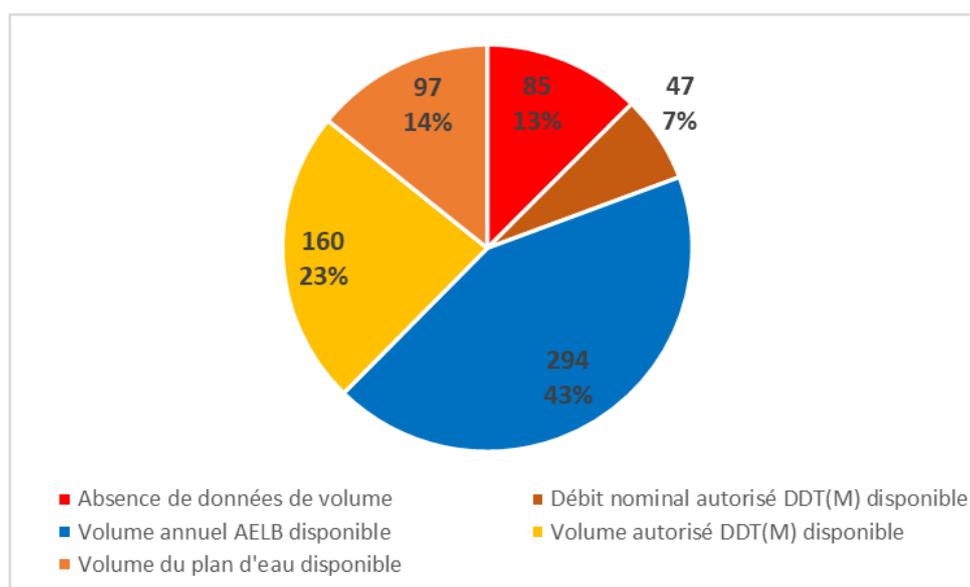


Figure 29 : Volumétrie des points de prélèvements irrigation par typologie de disponibilité de l'information de volume



Après concertation avec les acteurs du territoire, les hypothèses suivantes ont été validées lors du comité de pilotage du 29 mai 2024, afin d'estimer un volume prélevé pour chacune de ces catégories :

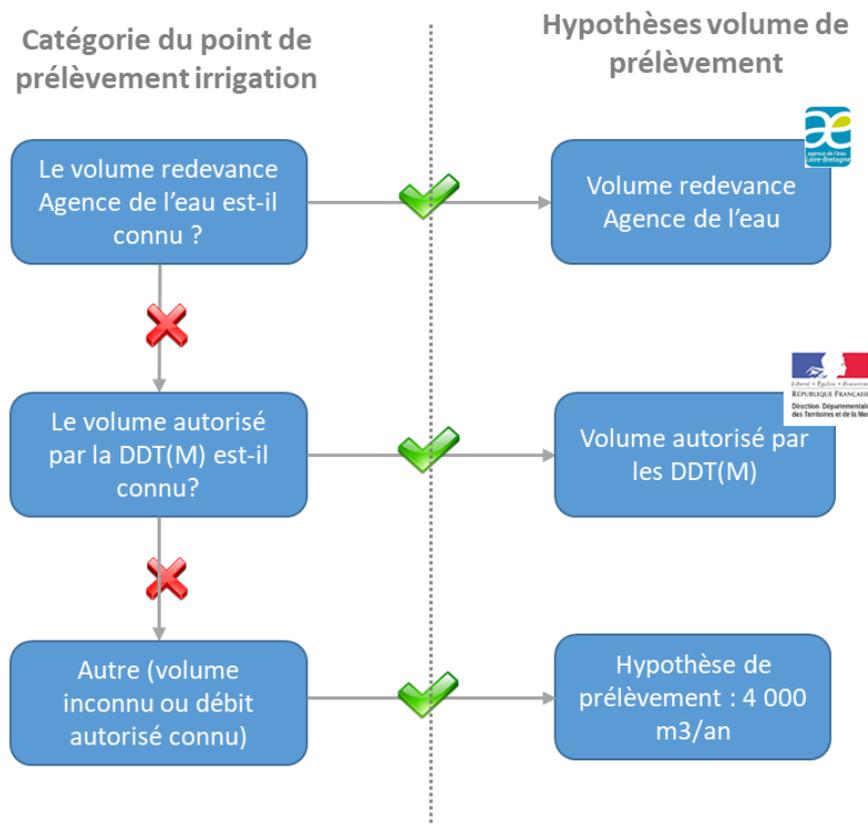


Figure 30 : Synoptique d'attribution du volume de prélèvement pour les points irrigation

### 3.4.3. ESTIMATION DES VOLUMES NON DECLARES

Dans le cadre de l'étude, ont été définis comme prélèvements agricoles non déclarés les prélèvements agricoles en dessous des seuils de déclaration administrative et les prélèvements agricoles illégaux pouvant exister.

Le volume représenté par les prélèvements agricoles non déclarés a été estimé à partir d'une étude menée sur le bassin versant voisin de Grand Lieu. Sur ce bassin, un recensement exhaustif des prélèvements agricoles et de leurs volumes associés a été réalisé par les associations d'irrigants ce qui a permis de déterminer précisément la proportion de volume non déclaré soit 4,1% du volume déclaré.

Compte tenu des similitudes existants entre les 2 territoires, il a été validé par le comité de pilotage l'utilisation de ce pourcentage.

### 3.4.4. REPARTITION MENSUELLE DES VOLUMES ANNUELS DE PRELEVEMENT

La répartition mensuelle du volume annuel prélevé à des fins d'irrigation a été définie en concertation avec les acteurs du territoire et notamment la Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de la Loire et la Fédération des maraîchers nantais.

Dans un premier temps, une distinction a été réalisée entre les points à vocation principalement maraîchère et ceux destinés aux autres cultures. Ce travail a été réalisé par la

Fédération des maraîchers nantais sur la base des 682 points de prélèvements irrigation recensés sur le périmètre d'étude.

Pour ces points de prélèvements, la répartition mensuelle suivante a été appliquée.

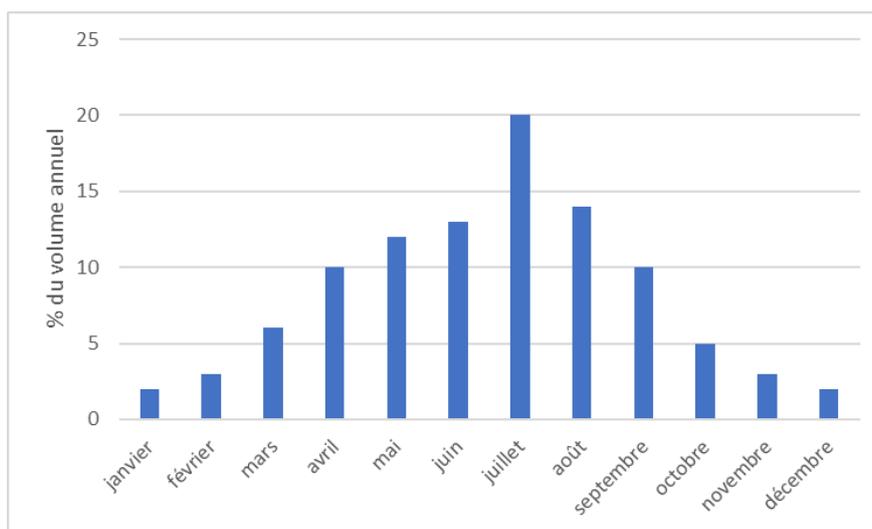


Figure 31 : Répartition mensuelle du volume annuel prélevé pour les points irrigation à vocation principale maraîchère

Pour les points de prélèvement irrigation des autres cultures, le volume annuel prélevé pour l'irrigation a été réparti à l'échelle mensuelle selon le type d'année : humide, classique, sèche. La période d'irrigation s'étend globalement d'avril à septembre avec un resserrement sur la période juillet-août pour les années humides et mai-août pour les années sèches.

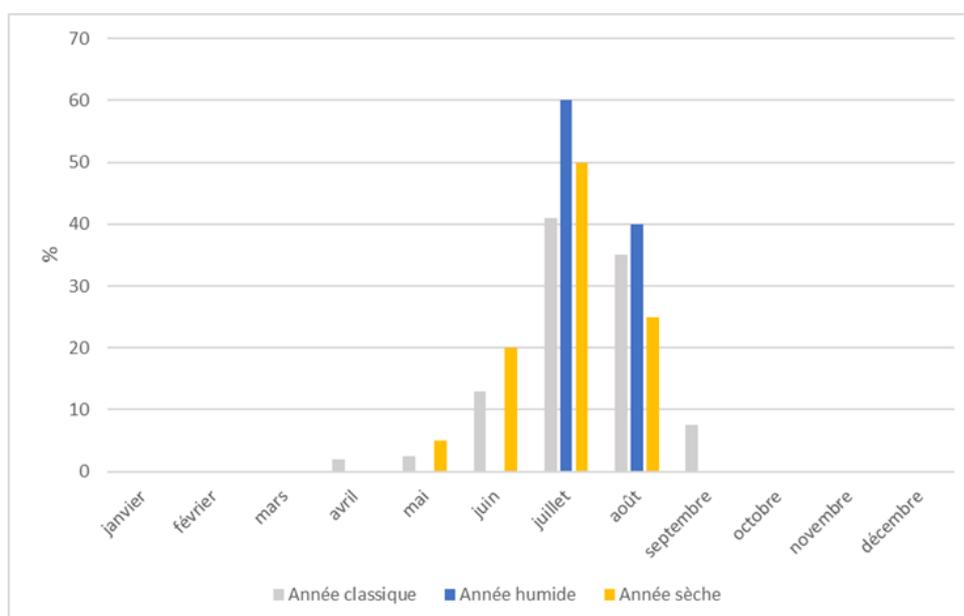


Figure 32 : Répartition mensuelle du volume d'irrigation pour des cultures classiques (maïs fourrage, grains, semences et autres cultures)

La caractérisation des années s'est basée sur l'étude des IPS (Indice des pluies standardisé) calculés à partir des stations météorologiques implantées sur le territoire. La matrice suivante fournit la typologie relative à chacune des années.

Tableau 13 : caractérisation des années selon l'indice standardisé des pluies



Année	Typologie	Année	Typologie	Année	Typologie	Année	Typologie
1985	Sèche	1994	Humide	2003	Normale	2012	Normale
1986	Normale	1995	Normale	2004	Normale	2013	Normale
1987	Normale	1996	Normale	2005	Sèche	2014	Humide
1988	Normale	1997	Normale	2006	Normale	2015	Normale
1989	Normale	1998	Normale	2007	Normale	2016	Normale
1990	Sèche	1999	Humide	2008	Normale	2017	Sèche
1991	Normale	2000	Humide	2009	Normale	2018	Normale
1992	Normale	2001	Normale	2010	Normale	2019	Normale
1993	Normale	2002	Humide	2011	Sèche	2020	Sèche

Certains points de prélèvement « irrigation » sont réalisés en plan d'eau dont le remplissage s'effectue en hiver. Ainsi, si l'irrigation des cultures à partir de ces points a bien lieu sur la période estivale classique, les prélèvements dans le milieu sont eux décalés sur la période hivernale.

Pour ces points, le volume annuel prélevé a été reporté comme suit :

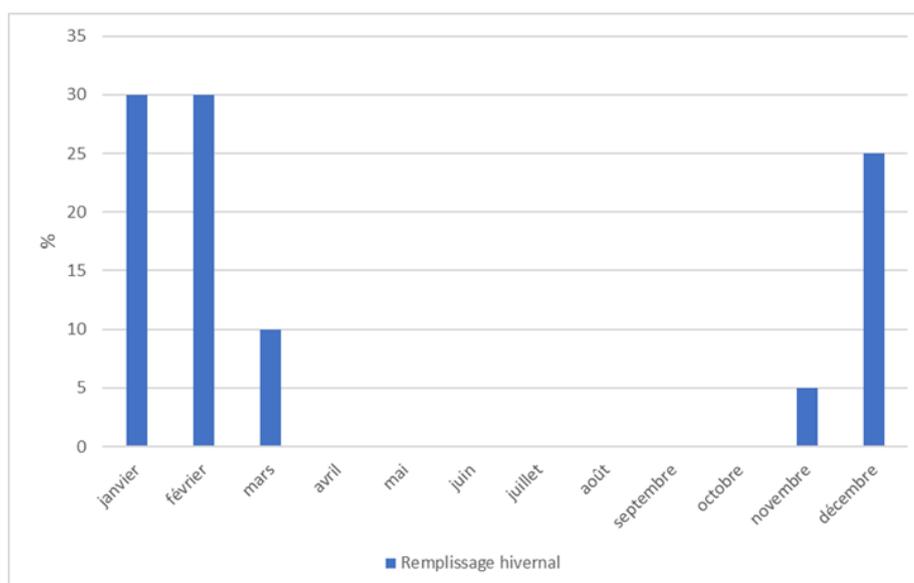


Figure 33 : Répartition mensuelle du volume pour le remplissage hivernal des retenues destinées à l'irrigation

## 3.5. AGRICULTURE – ABREUVEMENT DES CHEPTELS

### 3.5.1. DONNEES MOBILISEES ET CONSOLIDATION

Les volumes d'eau mobilisés pour l'abreuvement des cheptels ont été estimés à partir des données suivantes :

Organisme source	Description	Chronique disponible	Limites
agreste  La statistique, l'évaluation et la prospective du ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire	Base de données nationale d'identification (BDNI)	2020	Ne concerne que les cheptels bovins, ovins et caprins
agreste  La statistique, l'évaluation et la prospective du ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire	Recensement agricole (RA)	2010-2020	Restitution au siège de l'exploitation

Organisme source	Description	Chronique disponible	Limites
			Secret statistique sous certaines conditions Information précise disponible uniquement à l'échelle des EPCI

Les données de la BDNI ont été fournies à l'échelle de 43 entités s'approchant des masses d'eau, échelle qui recoupe partiellement l'unité de travail de l'étude.

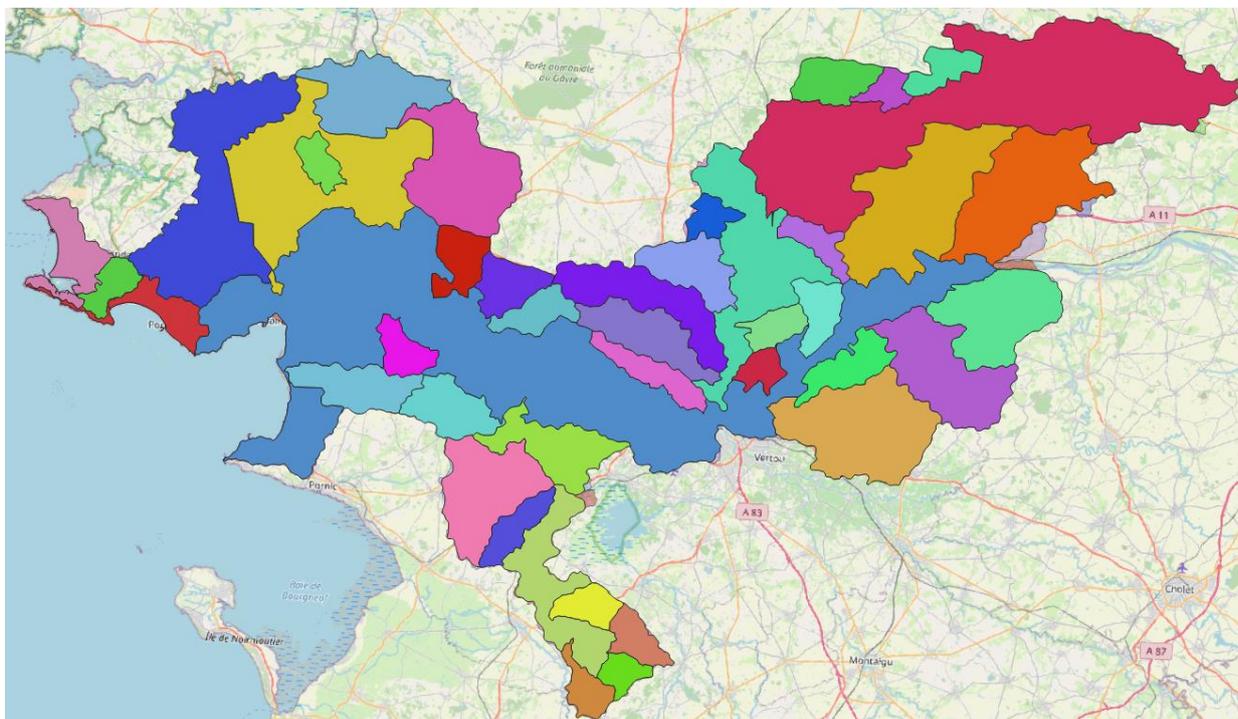


Figure 34 : Entités de restitution des résultats de la BDNI

Un prétraitement a donc été nécessaire afin de redécouper les entités de restitution de la BDNI avec les sous-entités définies dans le cadre de la présente étude.

Ainsi, si la plupart des entités BDNI s'incluaient entièrement ou partiellement dans une seule et unique sous-entité de l'étude, les entités suivantes ont dû faire l'objet d'un découpage multi sous-entités :

- ▤ La Grande Doue et ses affluents depuis sa source jusqu'à sa confluence avec le Brivet (3 sous-entités concernées) ;
- ▤ La Loire (25 sous-entités concernées) ;
- ▤ Le Brivet depuis Drefféac jusqu'à sa confluence avec la Loire (4 sous-entités concernées) ;
- ▤ Le Tenu depuis Saint-Étienne-de-Mer-Morte jusqu'au lac de Grand Lieu (3 sous-entités concernées).

In fine, 74 couples « entités BDNI / sous-entités de l'étude » ont été identifiés. Les effectifs des cheptels ont ensuite été redistribués au prorata de la surface de l'entité BDNI dans les sous-entités de l'étude concernées. Les coefficients de répartition sont présentés dans le tableau ci-dessous.



Tableau 14 : Coefficients de répartition entre sous-entité et entité BDNl

Libellé entités BDNl	Libellé sous-entité	Coefficient de répartition
Baie de vilaine (large)	Littoral Guérandais	1,00
Étang de la Poitevinière	Erdre amont	1,00
Étang de la Provostiere	Erdre amont	1,00
Étang de Vioreau	Erdre amont	1,00
La Berganderie et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec le Tenu	Tenu amont	1,00
La Blanche et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec l'Acheneau	Acheneau - Tenu aval	1,00
La Boire de la roche et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec la Goulaine	Goulaine	1,00
La Boire de mauves et ses affluents depuis la source jusqu'à l'estuaire de la Loire	Petits affluents de la Loire	1,00
La Chezine depuis la source jusqu'à l'estuaire de la Loire	Chézine	1,00
La Coulee du chaud et ses affluents depuis la source jusqu'à l'estuaire de la Loire	Marais du Nord Loire	1,00
La Déchausserie et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec l'Erdre	Erdre aval	1,00
La Divatte et ses affluents depuis la source jusqu'à l'estuaire de la Loire	Divatte	1,00
La Goulaine et ses affluents depuis la source jusqu'à l'estuaire de la Loire	Goulaine	1,00
La Grande Doue et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec le Brivet	Brivet amont	0,40
La Grande Doue et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec le Brivet	Littoral Guérandais	0,00
La Grande Doue et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec le Brivet	Marais de la Brière	0,60
La Loire	Acheneau - Tenu aval	0,05
La Loire	Boivre	0,01
La Loire	Brivet amont	0,00
La Loire	Chézine	0,00
La Loire	Cours d'eau côtiers Sud Estuaire	0,06
La Loire	Divatte	0,00
La Loire	Erdre aval	0,00
La Loire	Goulaine	0,01
La Loire	Grée	0,00
La Loire	Hâvre	0,00



Libellé entités BDNI	Libellé sous-entité	Coefficient de répartition
La Loire	Littoral Guérandais	0,00
La Loire	Littoral Nazairien	0,02
La Loire	Loire	0,12
La Loire	Marais de la Brière	0,22
La Loire	Marais du Nord Loire	0,00
La Loire	Petits affluents de la Loire	0,01
La Loire	Petits affluents de la Loire	0,12
La Loire	Petits affluents de la Loire	0,03
La Loire	Petits affluents de la Loire	0,09
La Loire	Petits affluents de la Loire	0,05
La Loire	Petits affluents de la Loire	0,03
La Loire	Petits affluents de la Loire	0,02
La Loire	Petits affluents de la Loire	0,06
La Loire	Robinets	0,00
La Loire	Sud Estuaire	0,07
La Roche et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec le Tenu	Tenu amont	1,00
L'Acheneau depuis le lac de grand lieu jusqu'à l'estuaire de la Loire	Acheneau - Tenu aval	1,00
L'Ancien cours de l'Acheneau et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec l'Acheneau	Acheneau - Tenu aval	1,00
L'Aubiniere et ses affluents depuis la source jusqu'à l'estuaire de la Loire	Petits affluents de la Loire	1,00
L'Aumondiere et ses affluents depuis la source jusqu'à l'estuaire de la Loire	Boivre	1,00
Le Boivre et ses affluents depuis la source jusqu'à l'estuaire de la Sèvre niortaise	Boivre	1,00
Le Brivet depuis Drefféac jusqu'à sa confluence avec la Loire	Brivet amont	0,56
Le Brivet depuis Drefféac jusqu'à sa confluence avec la Loire	Littoral Nazairien	0,00
Le Brivet depuis Drefféac jusqu'à sa confluence avec la Loire	Loire	0,00
Le Brivet depuis Drefféac jusqu'à sa confluence avec la Loire	Marais de la Brière	0,44
Le Brivet et ses affluents depuis la source jusqu'à Drefféac	Brivet amont	1,00
Le Cens et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec l'Erdre	Erdre aval	1,00



Libellé entités BDNI	Libellé sous-entité	Coefficient de répartition
Le Gesvres et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec l'Erdre	Erdre aval	1,00
Le Grée et ses affluents depuis la source jusqu'à l'estuaire de la Loire	Grée	1,00
Le havre et ses affluents depuis la source jusqu'à l'estuaire de la Loire	Hâvre	1,00
Le Hocmard et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec l'Erdre	Erdre aval	1,00
Le Moulin a foulon et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec le Brivet	Brivet amont	1,00
Le ruisseau de batz-sur-mer et ses affluents depuis la source jusqu'à la mer	Littoral Guérandais	1,00
Le ruisseau de casson et ses affluents depuis la source jusqu'au canal de Nantes a Brest	Erdre aval	1,00
Le ruisseau de Pontchâteau et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec le Brivet	Brivet amont	1,00
Le syl et ses affluents depuis la source jusqu'à l'estuaire de la Loire	Petits affluents de la Loire	1,00
Le Tenu depuis Saint-Étienne-De-Mer-Morte jusqu'au lac de grand lieu	Acheneau - Tenu aval	0,02
Le Tenu depuis Saint-Étienne-De-Mer-Morte jusqu'au lac de grand lieu	Tenu amont	0,37
Le Tenu depuis Saint-Étienne-De-Mer-Morte jusqu'au lac de grand lieu	Tenu médian	0,61
Le Tenu et ses affluents depuis la source jusqu'à Saint-Étienne-De-Mer-Morte	Tenu amont	1,00
L'Erdre depuis le plan d'eau de l'Erdre jusqu'à l'estuaire de la Loire	Erdre aval	1,00
L'Erdre et ses affluents depuis la source jusqu'au plan d'eau de l'Erdre	Erdre amont	1,00
Les Fontenelles et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec le Tenu	Tenu amont	1,00
Les fraiches et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec le Tenu	Acheneau - Tenu aval	1,00
Les robinets et ses affluents depuis la source jusqu'à l'estuaire de la Loire	Robinets	1,00
l'étang Hervé et ses affluents depuis la source jusqu'à sa confluence avec l'Erdre	Erdre aval	1,00
L'étier de Cordemais et ses affluents depuis la source jusqu'à l'estuaire de la Loire	Marais du Nord Loire	1,00
Loire (large)	Littoral Guérandais	1,00



Comme il a été noté précédemment, les données issues de la BDNI n'ont pu être fournies que sur l'année 2020. Or, afin de renaturaliser les débits sur le périmètre d'étude sur la période 2010-2020, il est nécessaire d'évaluer le cheptel sur cette période. A cette fin, les données des deux derniers millésimes du recensement agricole (2010 et 2020) ont été mobilisées.

Le recensement agricole (RA) est restitué à différentes échelles géographiques allant de la commune jusqu'au territoire national dans son entièreté. Cependant, selon l'échelle de restitution, les données sont plus ou moins agrégées selon les thématiques. A titre d'exemple, les cheptels sont exprimés :

- ✎ A l'échelle de la commune, en unité de gros bétail, tous aliments avec seulement une distinction entre herbivores (bovins, caprins, ovins, équins) et granivores (porcins, volailles, lapins) ;
- ✎ A l'échelle intercommunale (EPCI-FP), en nombre d'UGB et nombre de têtes selon une catégorisation plus fine (bovins, vache allaitantes, vaches laitières, porcins, équins...).

Si la donnée à l'échelle des EPCI-FP est donc plus pertinente pour l'estimation des consommations en eau par les cheptels, leur emprise géographique reste trop large pour les répartir à l'échelle des sous-entités hydrologiques. En conséquence, la méthodologie suivante, combinant données à l'échelle communale et données à l'échelle de l'EPCI-FP a été déployée.

Dans un premier temps, les données communales du RA 2020 ont été utilisées afin de déterminer le poids de chaque commune au sein de chaque EPCI. Ainsi, chaque commune s'est vu attribuer 2 coefficients de répartition, un pour les herbivores et un pour les granivores, basés sur la proportion d'UGBA de chaque type au sein de l'EPCI-FP.

*NB : le nombre total d'UGBA herbivores et granivores de l'EPCI-FP correspond à la somme des valeurs communales le composant.*

Ces coefficients ont ensuite été appliqués pour chaque type de cheptel, issus des données du recensement agricole à l'échelle des EPCI. La correspondance suivante a été utilisée :

*Tableau 15 : Association du type de coefficient de répartition communale aux types de cheptel issus des données à l'échelle des EPCI*

Type de cheptel	Coefficient de répartition utilisé
Lapines mères	Granivores
Total volailles	Granivores
Poules pondeuses d'œufs de consommation	Granivores
Poulets de chair et coqs	Granivores
Total porcins	Granivores
Truies mères	Granivores
Total ovins	Herbivores
Brebis mères allaitantes	Herbivores
Brebis mères laitières	Herbivores
Total caprins	Herbivores
Chèvres	Herbivores
Total équins	Herbivores

<b>Juments lourdes</b>	Herbivores
<b>Juments selle</b>	Herbivores
<b>Total bovins</b>	Herbivores
<b>Vaches allaitantes</b>	Herbivores
<b>Vaches laitières</b>	Herbivores

*NB : la variable « apiculture » (nombre de ruches) n'a pas été retenue.*

Une fois les données de cheptel à l'EPCI-FP réparties à l'échelle communale, ces dernières ont été réattribuées aux sous-entités hydrologiques au prorata de la surface de chaque commune.

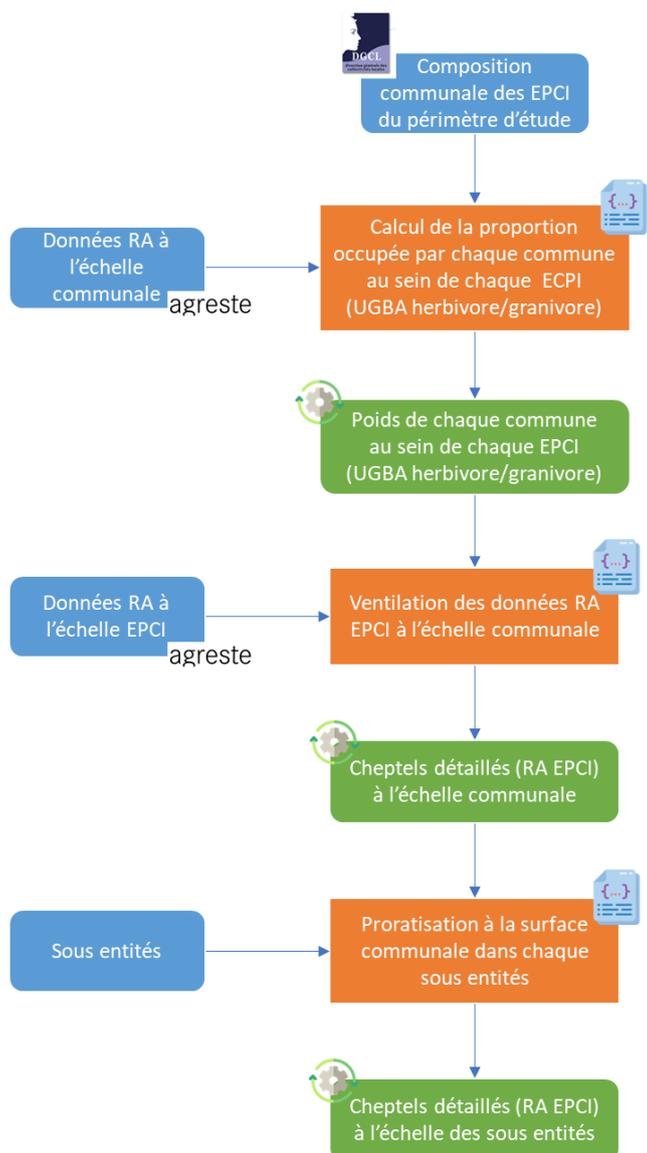


Figure 35 : Schéma de principe de l'attribution des données du recensement agricole à l'échelle des sous entités

L'évolution des cheptels entre les millésimes 2010 et 2020 a été réalisée par régression linéaire pour chaque cheptel et sous-type identifié.

Afin de pouvoir raccrocher ces informations à celles extraites de la BDNI, les sous-types identifiés pour les cheptels ovins et caprins n'ont pas été pris en compte, seul l'effectif total a été considéré.

### 3.5.2. CONSOMMATION DES CHEPTELS

La consommation en eau des cheptels a été évaluée à partir de différents éléments :

- ▬ **La consommation journalière en eau pour chaque cheptel.** Les valeurs retenues sont issues d'un travail bibliographique de la Chambre d'agriculture de Loire Atlantique et du document « étude sur la gestion quantitative de la ressource en eau en Bretagne : analyse de la pression prélèvement – définition des volumes disponibles » (*DREAL Bretagne, 2021*). Ces valeurs englobant les autres postes de consommation (nettoyage, fuite, bloc de traite...).
- ▬ **Le temps de présence à l'année** afin de prendre en compte, les conduites en bande pour certains cheptels et notamment les volailles ou les porcins.

Tableau 16 : Valeurs de références pour la consommation des cheptels

Attribut	Consommation l/j	Temps présence année	Type	Source
<b>Bovins autres</b>	69	365	Herbivore	DREAL Bretagne (moyenne des références hors Vache laitières et Vaches allaitantes)
<b>Brebis mères allaitantes</b>	8	365	Herbivore	Chambre d'agriculture de Loire Atlantique
<b>Brebis mères laitières</b>	20	365	Herbivore	Chambre d'agriculture de Loire Atlantique
<b>Agnelles de renouvellement</b>	3	365	Herbivore	Chambre d'agriculture de Loire Atlantique
<b>Agneaux à l'engraissement</b>	2	365	Herbivore	Chambre d'agriculture de Loire Atlantique
<b>Chèvre en lactation ou animal de plus de 1 an</b>	12	365	Herbivore	Chambre d'agriculture de Loire Atlantique
<b>Chevrette ou animal de moins de 1 an</b>	4	365	Herbivore	Chambre d'agriculture de Loire Atlantique
<b>Caprins autres</b>	4,7	365	Herbivore	DREAL Bretagne (moyenne des références)
<b>Chèvres</b>	13	365	Herbivore	Chambre d'agriculture de Loire Atlantique (moyenne des références)
<b>Équins autres</b>	27,6	365	Herbivore	DREAL Bretagne (moyenne des références)
<b>Juments lourdes</b>	35	365	Herbivore	DREAL Bretagne
<b>Juments selle</b>	55	365	Herbivore	Chambre d'agriculture de Loire Atlantique (Cheval au travail moyen/jument)
<b>Lapines mères</b>	0,986	365	Autres animaux	Chambre d'agriculture de Loire Atlantique (moyenne référence)
<b>Ovins autres</b>	4	365	Herbivore	DREAL Bretagne (moyenne des références hors brebis laitière)
<b>Porcins autres</b>	22,5	161	Autres animaux	Chambre d'agriculture de Loire Atlantique (moyenne des références)
<b>Poules pondeuses d'œufs de consommation</b>	0,24	365	Autres animaux	DREAL Bretagne (moyenne des références)
<b>Poulets de chair et coqs</b>	0,165	70	Autres animaux	Chambre d'agriculture de Loire Atlantique
<b>Truies mères</b>	30	365	Autres animaux	Chambre d'agriculture de Loire Atlantique

Attribut	Consommation L/j	Temps présence année	Type	Source
Vaches allaitantes	65	365	Herbivore	Chambre d'agriculture de Loire Atlantique
Vaches laitières	88	365	Herbivore	Chambre d'agriculture de Loire Atlantique
Volailles autres	0,42	163	Autres animaux	DREAL Bretagne (moyenne des références)
Caprins (global)	7,1	365	Herbivore	Moyenne pondérée des consommations basée sur les effectifs détaillés de la BDNI 2020
Ovins (global)	5,4	365	Herbivore	Moyenne pondérée des consommations basée sur les effectifs détaillés de la BDNI 2020

- ▬ **La ventilation annuelle de la consommation.** La consommation en eau des animaux n'est pas constante tout au long de l'année et dépend en partie des conditions météorologiques mais également du régime alimentaire de chaque catégorie d'animaux.

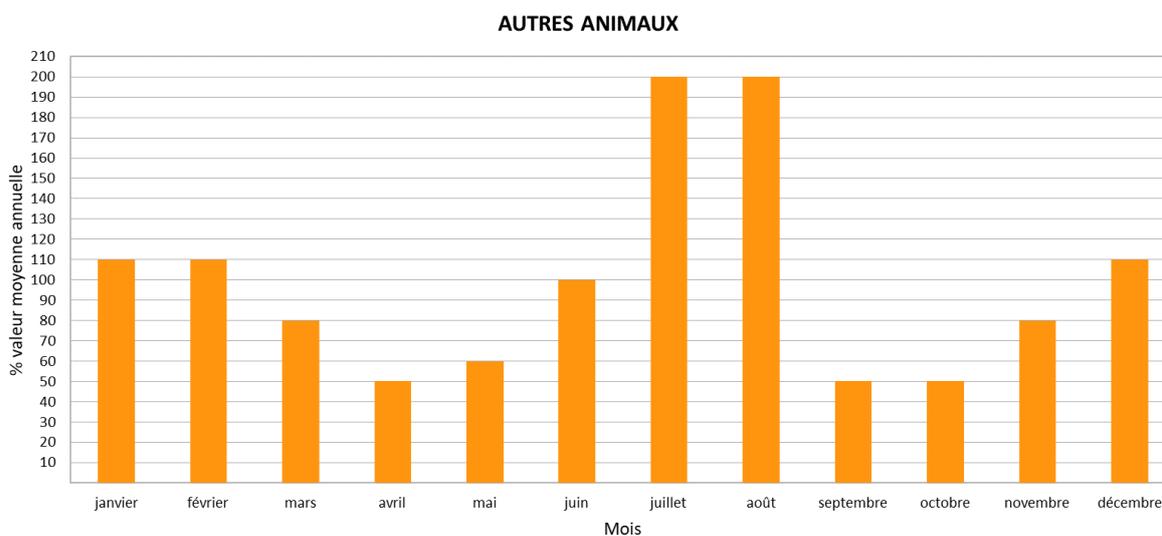
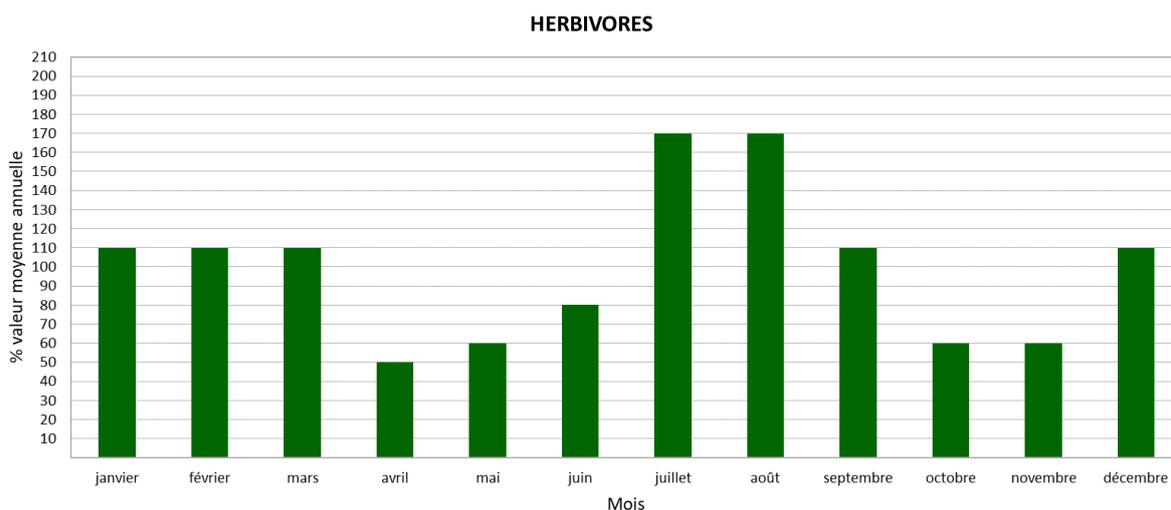


Figure 36 : Ventilation mensuelle des besoins en eau d'abreuvement

**La ressource mobilisée.** Les éleveurs peuvent mobiliser plusieurs ressources différentes pour répondre à leurs besoins : le réseau public d'eau potable, des forages privés, puits, des prélèvements diffus en bordure de cours d'eau...

En l'absence de données précises sur les ressources mobilisées, une répartition entre milieu et réseau AEP par type de cheptel a été défini par le Comité technique de l'étude. Il a également été décidé que 80% des volumes prélevés dans le milieu incombait aux ressources en eau souterraine.

Attribut	Proportion Abreuvement dans le milieu (%)	Attribut	Proportion Abreuvement dans le milieu (%)
Bovins autres	20	Lapines mères	80
Brebis mères allaitantes	100	Ovins autres	100
Brebis mères laitières	100	Porcins autres	80
Agnelles de renouvellement	100	Poules pondeuses d'œufs de consommation	80
Agneaux à l'engraissement	100	Poulets de chair et coqs	80
Chèvre en lactation ou animal de plus de 1 an	100	Truies mères	80
Chevrette ou animal de moins de 1 an	100	Vaches allaitantes	100
Caprins autres	100	Vaches laitières	80
Chèvres	100	Volailles autres	80
Équins autres	80	Caprins (global)	100
Juments lourdes	80	Ovins (global)	100
Juments selle	80		

## 3.6. INDUSTRIES & AUTRES ACTIVITÉS ÉCONOMIQUES

### 3.6.1. PRÉLÈVEMENTS EN EAU

Les prélèvements des activités économiques effectués directement dans le milieu ont été traités à partir du croisement des sources de données suivantes :

Organisme source	Description	Chronique disponible	Limites
	Redevances prélèvements	1998 - 2020	Limiter aux prélèvements : >10 000m <sup>3</sup> ou >7000 m <sup>3</sup> en zone 7B-3
 	Registre des rejets et transferts de polluants (IREP)	2003-2020	Limiter aux principales installations industrielles

<b>ASSOCIATION DES INDUSTRIELS DE LOIRE ESTUAIRE (AILE)</b>	Données AILE	2010-2020	Limiter aux industriels adhérents de l'AILE
---	--------------	-----------	---

Les volumes prélevés par les activités économiques sont disponibles à un pas de temps annuel. Après expertise, les acteurs mobilisés sur cette thématique n'ont pu statuer sur une répartition plus fine, chaque activité économique ou site industriel étant un cas particulier. La répartition à l'échelle mensuelle a donc été réalisée au prorata du nombre de mois de l'année (volume mensuel = volume annuel / 12).

### 3.6.2. RESTITUTIONS

Les rejets industriels effectués directement dans le milieu ont été traités à partir du croisement des sources de données suivantes :

Organisme source	Description	Chronique disponible	Limites
	Registre des rejets et transferts de polluants (IREP)	2019-2020	Limiter aux principales installations industrielles Données de volume disponible uniquement depuis 2019
<b>ASSOCIATION DES INDUSTRIELS DE LOIRE ESTUAIRE (AILE)</b>	Données AILE	2010-2020	Limiter aux industriels adhérents de l'AILE

De façon similaire aux prélèvements, le passage des volumes rejetés par les activités économiques d'un pas de temps annuel à un pas de temps mensuel a été effectué au prorata du nombre de mois de l'année (volume mensuel = volume annuel / 12).

Pour les industriels dont les seules données disponibles sont celles issues du Registre des rejets et transferts de polluants (IREP), la moyenne des volumes de la période 2015-2019 a été reportée sur la période 2010-2018 hormis pour l'usine de Cordemais où la moyenne 2017-2018 a été utilisée (révision décennale en 2015-2016 et effet Covid en 2019-2020). L'année 2020 a été écartée de l'extrapolation car jugée non représentative vu le contexte sanitaire (impact COVID 2019 sur les activités).

## 3.7. PRÉLÈVEMENTS INDUITS PAR L'ÉVAPORATION DES PLANS D'EAU

### 3.7.1. CONSTITUTION D'UNE COUCHE PLAN D'EAU HARMONISÉE

La couche de plans d'eau harmonisés du bassin versant a été réalisée à partir des sources de données suivantes :

Organisme source	Libellé	Description
	plans_deau_BZH_PDL_20200423.shp	Entités issues de la couche surface_hydrographique de la BD Topo hydrographie téléchargée depuis IGN pro en décembre 2019. N'ont été conservées que les entités de nature : inconnue, plan d'eau, mare, lac, retenue, retenue barrage, réservoir bassin, réservoir bassin d'orage et réservoir bassin piscicole.

Organisme source	Libellé	Description
 <b>PRÉFET DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE</b> <i>Liberté Égalité Fraternité</i>	r_plan_eau_s_r52.shp	Plans d'eau issus de la base de données DREAL

Plusieurs étapes consécutives ont été nécessaires afin d'aboutir à celle-ci :

Dans un premier temps, afin de pouvoir procéder aux différents croisements, les 2 sources de données ont fait l'objet d'une réparation des géométries, ont été redécoupées à l'échelle géographique de travail. Les volumétries sont présentées dans le tableau suivant.

*A noter que les volumétries se rapportent non pas au nombre de plans d'eau mais bien au nombre de polygones géographiques des couches SIG (un plan d'eau pouvant être composé de plusieurs polygones).*

Organisme source	Libellé	Volumétrie initiale	Volumétrie étude
 <b>OFB</b> <small>OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ</small>	plans_deau_BZH_PDL_20200423.shp	184 686	16 018
 <b>PRÉFET DE LA RÉGION PAYS DE LA LOIRE</b> <i>Liberté Égalité Fraternité</i>	r_plan_eau_s_r52.shp	127 246	16 745

Une vérification des doublons a ensuite été réalisée pour chacune des 2 couches SIG afin de supprimer d'éventuels polygones se superposant géographiquement de façon parfaite. Dans le cas où des informations attributaires différentes existaient entre ces polygones, celles-ci ont été conservées.

Les 2 couches SIG nettoyées ont été croisées afin d'identifier les potentiels polygones en doublon. 1 482 polygones ont ainsi été identifiés comme connus uniquement de la DREAL Pays de la Loire, il s'agit principalement de la zone des marais salants de Guérande. In fine, 17 500 polygones uniques ont été identifiés sur le territoire d'étude.

L'appartenance aux entités et sous-entités de chaque plan d'eau a été attribuée par localisation géographique. Dans le cas où un plan d'eau se retrouvait sur plusieurs entités ou sous-entités celui-ci a été découpé afin de considérer la proportion dans chacune d'elles. Les informations attributaires ont été conservées hormis la surface qui a été recalculée.

Tableau 17 : volumétrie des plans d'eau selon l'échelle géographique sélectionnée

Couche SIG	Volumétrie
<b>Échelle bassin</b>	17 500 polygones
<b>Échelle entités hydrographiques</b>	17 518 polygones
<b>Échelle sous entités hydrographiques</b>	17 847 polygones

### 3.7.2. ATTRIBUTION DU CARACTERE CONNECTE AUX PLANS D'EAU

*À noter que la méthodologie déployée ici permet de donner une indication sur la potentielle connexion / déconnexion des plans d'eau.*

*Le caractère connecté / déconnecté définitif des plans d'eau ne pourra être statué, en Loire-Atlantique notamment, qu'après application du « protocole pour évaluer la connexion ou la*

déconnexion d'un plan d'eau à la nappe d'accompagnement d'un cours d'eau » demandée dans le cadre de l'arrêté cadre sécheresse départemental.

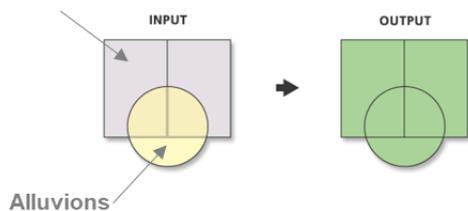
La probabilité de connexion des plans d'eau a été établie à partir des données suivantes :

Organisme source	Description	Format	Volumétrie (objets)
 SYLOA syndicat Loire aval	Cartographie harmonisée des plans d'eau	SIG	17 500
 République Française Direction Départementale des Territoires et de la Mer	Cartographie harmonisée des cours d'eau issus des cartes de cours d'eau des DDT(M)44, 49 et 56	SIG	27 977
	Zones alluvionnaires extraites de la carte géologique harmonisée au 1/50 000 <sup>ème</sup> du BRGM (correspondant aux entités BDLisaV2 de niveau 3)	SIG	609
 SYLOA syndicat Loire aval	Zones humides	SIG	125 973
 IGN	Raster RGE Alti® 5 mètres	SIG	-

La méthodologie suivante a été déployée :

#### Etape 1 : Agréger des alluvions et des zones humides

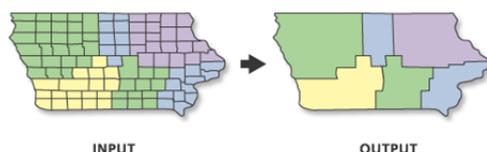
Zones humides



>> Calcul d'une union géométrique.

Toutes les entités et les attributs sont inscrits dans la classe d'entités en sortie (140 882 objets).

#### Etape 2 : Fusionner la couche résultant de l'agrégation



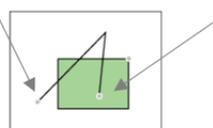
>> Agrégation des entités.

Les géométries de la couche sont fusionnées sans distinction de champs afin d'obtenir une couche uniforme en sortie sans multi-partie (16 166 objets).

#### Etape 3 : Découper les cours d'eau par la couche fusionnée

Cours d'eau

LINE AND POLYGON INPUTS

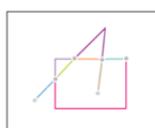


Fusion des alluvions et zones humides

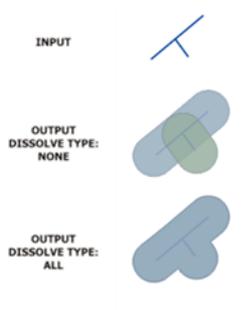
>> Découpage des cours d'eau par la couche fusionnée des zones humides et des alluvions.

Cette étape permet de préparer les cours d'eau à la phase suivante (147 738 objets).

OUTPUT



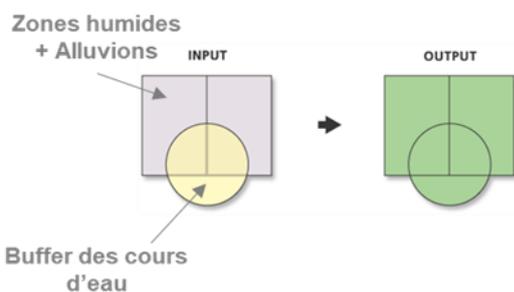
#### Etape 4 : Buffériser les cours d'eau sur 100 m



>> Crée une zone tampon à une distance de 100 m des cours d'eau en entrée.

1 objet

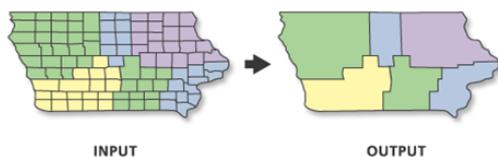
#### Etape 5 : Agréger les buffers des cours d'eau et la fusion des alluvions et zones humides



>> Calcul d'une union géométrique.

Toutes les entités et les attributs sont inscrits dans la classe d'entités en sortie (19 432 objets).

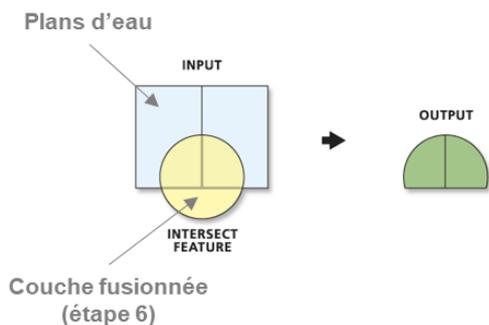
#### Etape 6 : Fusionner la couche résultant de l'agrégation



>> Agrégation des entités.

Les géométries de la couche sont fusionnées sans distinction de champs afin d'obtenir une couche uniforme en sortie sans multi-partie (7 255 objets).

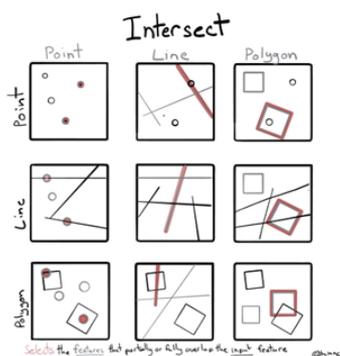
#### Etape 7 : Intersection des plans d'eau avec la couche précédemment fusionnée



>> Calcule une intersection géométrique des entités en entrée.

Les entités ou les portions des entités superposées dans toutes les couches ou classes d'entités sont enregistrées dans la classe d'entités en sortie (12 163 objets).

## Etape 8 : 1<sup>ers</sup> résultats



>> Récupération de l'information dans la couche des plans d'eau générale par jointure spatiale

17 587 objets

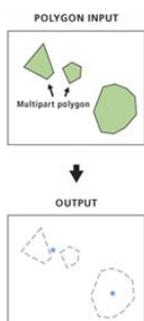
>> Nouvel attribut : ccl\_connex

- Connecté : le plan d'eau est connecté
- Déconnecté : le plan d'eau est déconnecté

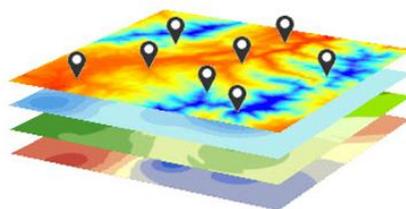
Un test a été réalisé afin d'approcher le caractère « perché » des plans d'eau c'est-à-dire permettant d'identifier les plans d'eau des zones de forte probabilité de connexion et dont la différence altimétrique entre le cours d'eau et le plan d'eau serait supérieure à un seuil de profondeur moyenne de 2m. En d'autres termes, tout plan d'eau dont la différence altimétrique avec le cours d'eau est supérieure à 2m est qualifié de « perché » et en conséquence considéré comme déconnecté.

Ce travail a été réalisé en 2 temps :

### Etape 1 : Vérification des altitudes des plans d'eau

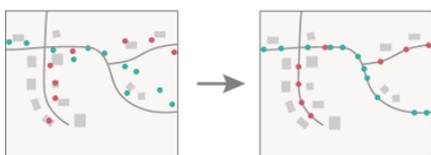


>> Conversion des plans d'eau (polygone) en point



>> Extraction des valeurs du MNT aux points des plans d'eau

### Etape 2 : Altitude du cours d'eau le plus proche



>> Accrochage du point sur le cours d'eau le plus proche

>> Nouvelle extraction de la valeur du MNT vers les points accrochés

>> Comparaison des 2 altitudes

Après expertise, il a été décidé de ne pas retenir ce critère dans la détermination de la probabilité de connexion des plans d'eau, celui-ci présentant de trop fortes incertitudes. L'emploi d'un Modèle Numérique de terrain (MNT) plus fin pourrait potentiellement réduire ces incertitudes.

### 3.7.3. IDENTIFICATION DES PLANS D'EAU DE MARAIS

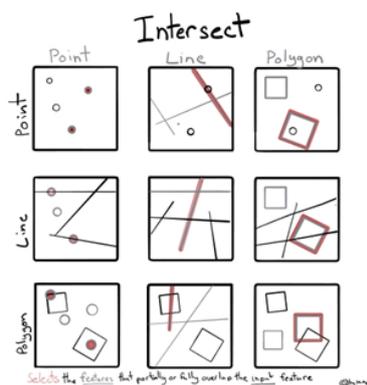
L'attribut « plan d'eau de marais » a été défini par croisement géographique entre la couche harmonisée des plans d'eau construite dans le cadre de la présente étude et la couche SIG des marais réalisés par le SYLOA.

Organisme source	Description	Format	Volumétrie (objets)
 SYLOA syndicat Loire aval	Cartographie harmonisée des plans d'eau	SIG	17 500
 SYLOA syndicat Loire aval	Zones de marais	SIG	180

A noter qu'après expertise, la couche SIG des marais a été au préalable consolidé à partir de données complémentaires. Ainsi les pré-traitements suivants ont été réalisés :

- Suppression du lit mineur de la Loire à partir de la cartographie du lit mineur de la Loire utilisée au SYLOA issue d'un croisement entre les données BD Topo Hydro, Litto 3D et une vérification visuelle sur orthophotographies ;
- Suppression du lit mineur de l'Erdre de Sucé-sur-Erdre jusqu'à sa confluence avec la Loire ;
- Suppression des plans d'eau de Vioreau, de la Provostière et de la Poitevinière identifié comme marais ;
- Complétude de la couche à partir des zonages environnementaux faisant référence à des zones de marais (Natura 2000, ZNIEFF 1&2 et réservoir biologique). Cette distinction a été réalisée à partir du libellé des zones.

L'attribution du caractère plan d'eau de marais a ensuite été réalisé comme suit :

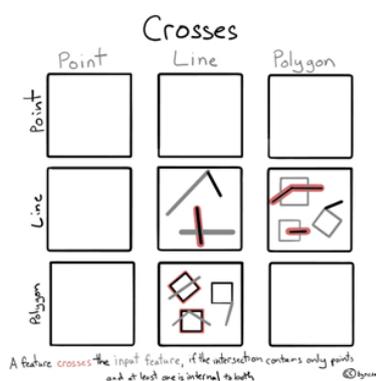


>> Récupération de l'information dans la couche des plans d'eau générale par jointure spatiale (*intersecte*)

4 218 objets plans d'eau intersectés

>> Nouvel attribut : marais

- Oui : le plan d'eau est connecté à un marais
- Non : le plan d'eau est déconnecté



>> Récupération de l'information dans la couche des plans d'eau générale par jointure spatiale (*traversé par un contour*)

220 objets plans d'eau traversés par un marais

>> Ajustement de l'attribut : marais

- Oui : le plan d'eau est connecté à un marais si sa surface superposant le marais est > 50%
- Non : le plan d'eau est déconnecté si sa surface superposant le marais est < 50%

### 3.7.4. ASSOCIATION D'UN POSTE METEO FRANCE DE REFERENCE AUX PLANS D'EAU

Un plan d'eau peut être considéré comme une surface d'eau libre, il n'y a donc pas lieu de prendre en compte les interactions existantes avec l'eau disponible dans les sols et notamment dans la Zone Non saturée (ZNS). En conséquence, l'évapotranspiration réelle (ETR) peut donc être assimilée à l'évapotranspiration potentielle (ETP) et son évaluation basée sur les données de postes Météo France.

Une sélection des postes Météo France disposant de données d'ETP sur la période 2010-2020 a été réalisée. Les postes suivants ont été retenus :

Tableau 18 : Postes Météo France retenus pour le calcul de l'évaporation des plans d'eau

N° poste Météo France	Libellé poste Météo France
49008001	Angrie
44110002	Nort-sur-Erdre
44117002	Le Pallet (Le Pallet SAPC)
44181001	Machecoul Saint Môme (St Môme le tenu)
44020001	Bouguenais (Nantes-Bouguenais)
44103001	Montoir-de-bretagne (Saint Nazaire Montoir)

*Les postes Météo France du Pallet (Le Pallet SAPC) et de Bouguenais (Nantes-Bouguenais) sont en dehors du périmètre d'étude mais ont été retenus afin d'avoir une spatialisation plus fine de l'ETP du bassin versant.*

Chaque plan d'eau a été associé à un de ces postes météorologiques de référence à partir de la méthode géostatistique des polygones de Thiessen. Cette méthode permet d'estimer des valeurs pondérées en prenant en considération chaque station météorologique du bassin versant jugée pertinente. Elle affecte alors à chacune de ces stations une zone d'influence.

La figure ci-dessous représente le découpage du bassin :

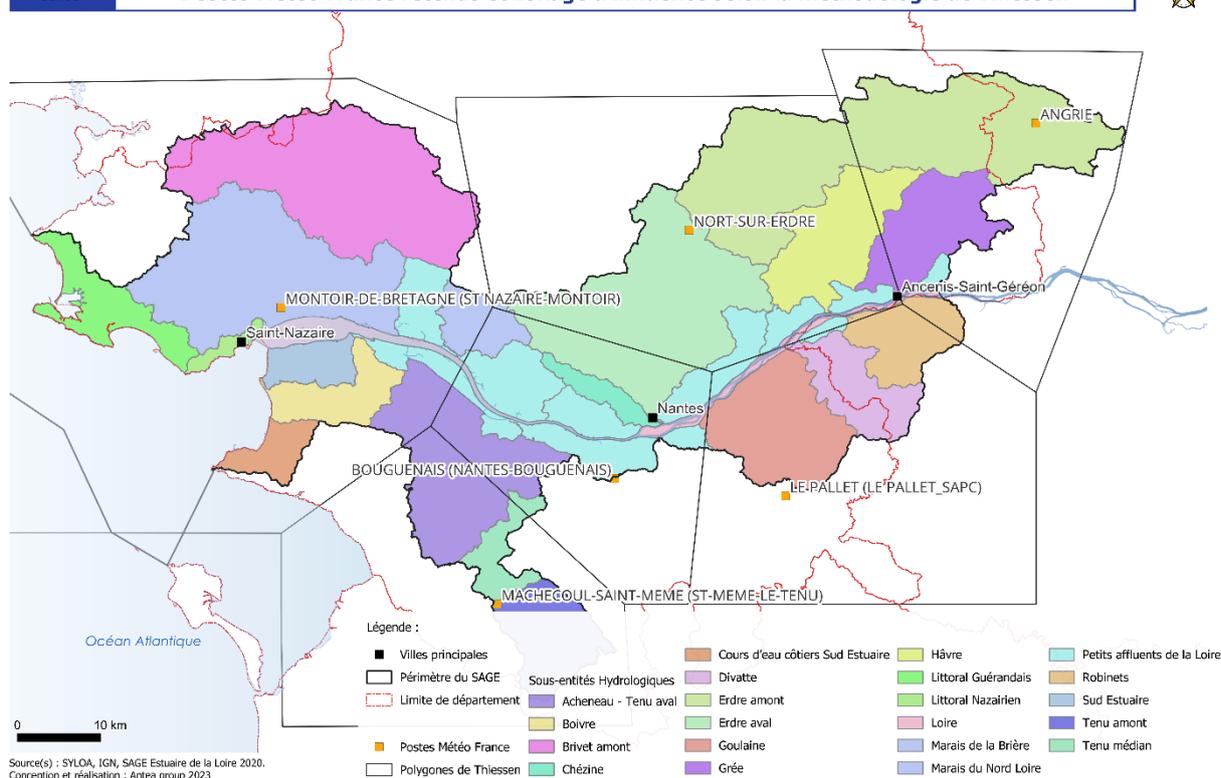


Figure 37 : Découpage du bassin versant selon la méthode des polygones de Thiessen appliquée aux stations météorologiques avec ETP

### 3.7.5. CALCUL DES PRELEVEMENTS INDUITS PAR L'EVAPORATION

De façon générale, les plans d'eau présentent des impacts sur la ressource en eau et les milieux aquatiques. Ainsi, lorsqu'ils sont reliés à un cours d'eau, de multiples effets sont constatés (hors dérivation) sur la continuité physique et thermique du cours d'eau, sur la qualité des eaux restituées (température, oxygène...), via l'évaporation de l'eau stockée ou encore par les retards à l'écoulement. Pour ceux en apparence non reliés au cours d'eau mais se situant dans la nappe d'accompagnement, des transferts existent entre le cours d'eau et le plan d'eau et s'accroissent en période de basses eaux, affaiblissant ainsi le débit du cours d'eau.

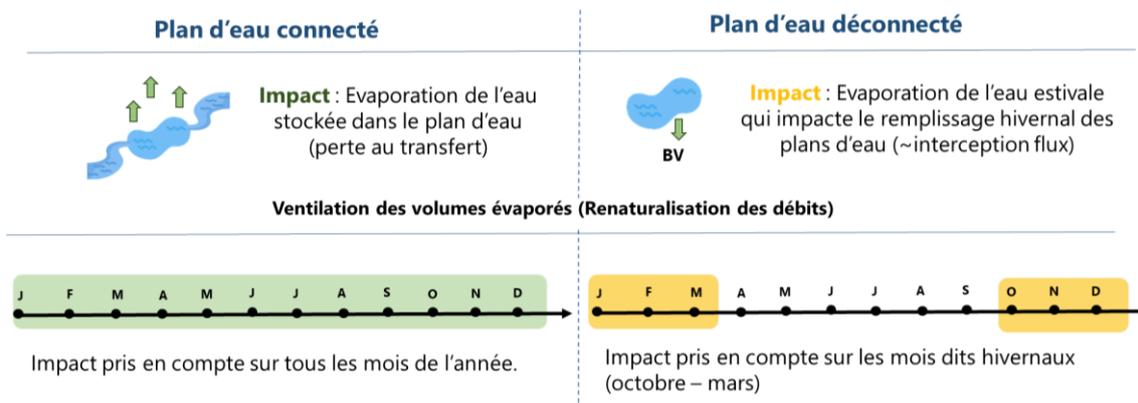
Pour les plans d'eau qui ne sont pas reliés aux cours d'eau (directement ou par nappe d'accompagnement), leur alimentation se fait principalement par la captation des eaux de ruissellement qui va soustraire une part de l'eau pouvant alimenter le cours d'eau et va retarder la reprise des écoulements, notamment en fin de période d'étiage. (*DREAL Pays de la Loire*)

Ainsi, d'un point de vue quantitatif, pour les plans d'eau reliés directement ou indirectement aux cours d'eau / à la nappe d'accompagnement dit « connectés », tout prélèvement (y compris le volume induit par l'évaporation) dans le plan d'eau est immédiatement compensé par un apport du milieu et notamment du cours d'eau et/ou sa nappe d'accompagnement.

Dans ce cas, seule l'évaporation doit alors être considérée pour évaluer les prélèvements diffus induits. De plus, les pertes par évaporation de ces plans d'eau impactent les écoulements sur l'ensemble de l'année puisque, comme il a été rappelé précédemment, celles-ci sont compensées immédiatement par le milieu.

Pour les plans d'eau non reliés directement ou indirectement aux cours d'eau/ à la nappe d'accompagnement dits « déconnectés », les prélèvements (y compris le volume induit par l'évaporation) ne sont pas immédiatement compensés faute d'alimentation par le cours d'eau mais reportés en période hivernale lors de leur remplissage par captation des eaux de ruissellement, ou par éventuellement des pompages (en cours d'eau ou nappe).

Dans ce cas, les précipitations doivent rentrer comme paramètre modulateur de l'évaporation car considérées comme la principale source d'alimentation de ces plans d'eau. Le volume prélevé au milieu naturel (eaux de ruissellement ou pompage) pour compenser les pertes par évaporation est alors décalé dans le temps et intervient lors du remplissage des plans d'eau.



Les prélèvements diffus induits par l'évaporation de chaque plan d'eau correspondent alors :

▬ Pour les plans d'eau connectés :

$$\begin{array}{c}
 \text{Prélèvement diffus d'un plan d'eau} \\
 \text{=} \\
 \text{Surface du plan d'eau} \\
 \text{X} \\
 \text{ETP de la station Météo France de référence du plan d'eau}
 \end{array}$$

▬ Pour les plans d'eau déconnectés :

$$\begin{array}{c}
 \text{Prélèvement diffus d'un plan d'eau} \\
 \text{=} \\
 \text{Surface du plan d'eau} \\
 \text{X} \\
 \left( \text{ETP de la station Météo France de référence du plan d'eau} - \text{Précipitations de la station Météo France de référence du plan d'eau} \right)
 \end{array}$$

A noter que cette méthode permet d'obtenir une estimation des prélèvements diffus induits par l'évaporation de plans d'eau et n'intègre pas certains paramètres (volume d'eau stocké initial, temps de séjour, pertes par infiltration, mode de gestion du plan d'eau, etc ...) indisponibles à l'échelle de travail et qui permettraient de préciser le calcul.

## 3.8. AUTRES PRÉLÈVEMENTS

### 3.8.1. ALIMENTATION DU CANAL DE NANTES A BREST

Les données relatives à l'alimentation du canal de Nantes à Brest ont été recherchées auprès de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne et du Conseil départemental de Loire-Atlantique. Seules des données de 2017 à 2020 ont pu être collectées. Les volumes prélevés de 2010 à 2016 ont été estimés à partir de la moyenne interannuelle de la chronique 2017-2020.

Ces données n'étant disponible qu'à un pas de temps annuel, leur répartition mensuelle a été réalisée à partir des modalités de gestion du réservoir de Vioreau.

Tableau 19 : Modalités de répartition mensuelle du prélèvement annuel de l'alimentation du canal de Nantes à Brest

Mois	Modalité de gestion	Répartition du prélèvement annuel
Janvier	Entre 27,3 et 30,8m NGF	0
Février		0
Mars	Entre 27,3 et 31,3m NGF	0
Avril	Vidange progressive pour alimentation du canal entre 27,3 et 31,3m NGF	0,02
Mai		0,06
Juin		0,2
Juillet		0,25
Août		0,3
Septembre		0,15
Octobre		0,02
Novembre	Entre 27,3 et 30,8m NGF	0
Décembre		0

### 3.8.2. ALIMENTATION DU MARAIS BRETON

Les données de prélèvement à la station de la Pommeraie ont été transmises directement par le Syndicat Grand Lieu Estuaire. Les données ont été fournies directement au pas de temps mensuel pour la chronique 2012 – 2020.

Pour les années 2010 et 2011, où seul un volume annuel a été transmis, la répartition mensuelle a été réalisée à partir de la répartition moyenne observée sur la chronique 2012-2020.

Tableau 20 : Modalités de répartition mensuelle du prélèvement annuel pour l'alimentation du marais Breton

Mois	Répartition mensuelle moyenne 2012-2020
Janvier	0,00
Février	0,00
Mars	0,00
Avril	0,01
Mai	0,04
Juin	0,21
Juillet	0,26
Août	0,32
Septembre	0,15
Octobre	0,01
Novembre	0,00
Décembre	0,00



## 4. VOLET CLIMAT





## 4.1. CARACTÉRISATION DU CLIMAT PASSÉ

### 4.1.1. LES DONNEES DU DIGITALIS SILVAE

Les données du **Système d'Informations Localisées sur la Végétation, les Arbres et leur Environnement (SILVAE)** sont mises à disposition par le consortium scientifique composé de l'Université de Lorraine, AgroParisTech, l'INARE et du laboratoire SILVA. Un accès à des informations géoréférencées concernant les espèces végétales, essentiellement forestières, et les principaux facteurs déterminant leur écologie.

Les informations mises à disposition appartiennent à trois catégories :

- 🌱 Des études ayant trait à un territoire défini répertoriées par le Centre de documentation forestière AgroParisTech de Nancy ;
- 🌱 Des relevés phytoécologiques de terrain géolocalisés issus de la base de données EcoPlant du laboratoire SILVA ;
- 🌱 Des couches de données utilisables sous Système d'Informations Géographiques (SIG) extraites de la base de données Digitalis du laboratoire SILVA.

Plus particulièrement, le DIGITALIS SILVAE propose des données sur le climat représentant les normales climatiques 1961 - 1990 (moyenne sur 30 ans) pour 4 paramètres climatiques:

- 🌱 La température moyenne (annuelle, estivale et hivernale) ;
- 🌱 Les précipitations moyennes (annuelle, estivale) ;
- 🌱 Le rayonnement solaire (annuel, estival) ;
- 🌱 L'évapotranspiration potentielle moyenne (annuelle, estivale)

Ces indicateurs présentent l'avantage d'être spatialisées à l'échelle de mailles de 1km de côté et ce à partir de données issues de postes Météo France.

Ces données sont exploitées pour étudier la variabilité moyenne des principaux paramètres climatiques à l'échelle du périmètre de l'étude.

### 4.1.2. LES DONNEES METEO FRANCE

Plusieurs types de données climatiques peuvent être mobilisées pour décrire le climat passé.

### Maille SAFRAN

- Donnée spatialisée et modélisée de 1958 à 2020 ;
- Valeurs journalières de 24 paramètres disponibles pour chaque maille.

#### Quelle utilisation ?

- Caractériser le climat et spatialiser les données ;
- Caler des modèles hydro-climatiques ;
- Avoir accès à certains paramètres intéressants : humidité des sols, pluie efficace, ETR, ....

### Chroniques mesurées à la station

- Données ponctuelles, mesurées sur une station Météo-France
- Valeurs journalières ou mensuelles pour les précipitations et les températures.

#### Quelle utilisation ?

- Disposer de données mesurées au pas de temps journalier et calculer des indicateurs journaliers ;
- Renseigner localement sur le climat

### Longues séries homogénéisées

- Séries longues et corrigées : données la plus robuste ;
- Pas de temps mensuel uniquement, fin des chroniques parfois un peu ancienne (+ de 10 ans).

#### Quelle utilisation ?

- Caractériser les tendances d'évolution les plus robustes ;
- Renseigner localement sur le climat

Dans le cadre de cette étude, la donnée spatialisée SAFRAN n'a pu être utilisée.

## Les chroniques mesurées à la station

Les chroniques journalières de pluviométrie, température et ETP sur les postes Météo France figurants dans le tableau suivant ont été mobilisés dans le cadre de cette étude. Leur choix réside sur des critères spatiaux et de disponibilité des données. Dans un objectif de cohérence et afin de respecter la durée minimale d'analyse préconisée (30 ans), celle-ci a été réalisée sur la période 1985-2016.

Tableau 21 : Postes Météo France disposant mobilisée dans le cadre de l'étude

Code station	Libellé station
44020001	Nantes-Bouguenais
44103001	Montoir-de-Bretagne
44110002	Nort-sur-Erdre
44069002	Guérande

## Les longues séries homogénéisées (LSH)

Les Longues Séries Homogénéisées (LSH) sont des données mesurées au droit de poste Météo France et qui ont fait l'objet d'une correction statistique pouvant répondre à plusieurs objectifs :

- ⇒ Combler les manques de données ;
- ⇒ Étendre la chronique sur une période plus longue ;
- ⇒ Améliorer la représentativité d'un poste météorologique sur un secteur donné adapté à la variabilité du paramètre analysé.



Les chroniques associées au Longues Séries Homogénéisées sont disponibles au pas de temps mensuel. Ces données sont recommandées par Météo France pour identifier les tendances d'évolution et les ruptures de tendances sur une période longue. Dans le cadre de l'étude, les LSH suivantes ont été étudiées :

Tableau 22 : Postes Météo France du territoire disposant de longues séries homogénéisées

Code station	Libellé station	Pluviométrie	Température	ETP
44020001	Nantes-Bouguenais	1950-2019	1950-2019	1950-2021
44103001	Montoir-de-Bretagne	1950-2019	-	-
44110002	Nort-sur-Erdre	1950-2019	1950-2019	-
44069002	Guérande	-	1950-2019	-

## 4.2. CARACTÉRISATION DU CLIMAT FUTUR

La caractérisation du climat futur a été réalisée sur la base des simulations disponibles sur les portails du DRIAS :

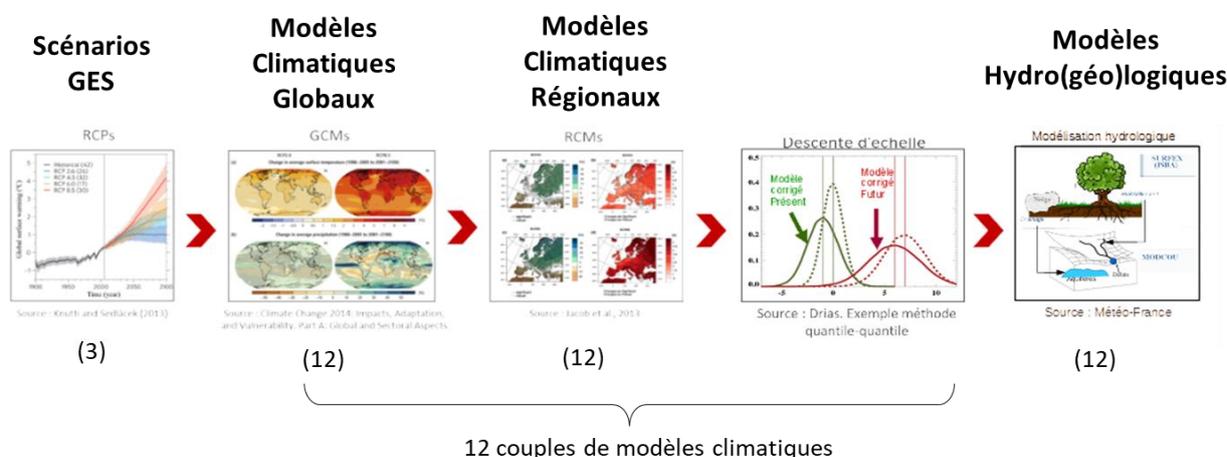
- **DRIAS Climat** (<https://www.drias-climat.fr/>) : Les simulations climatiques (24 paramètres climatiques) ;
- **DRIAS Eau** (<https://www.drias-eau.fr/>) : Les simulations hydrologiques qui correspondent à date (premier semestre 2023) aux simulations SIM2.

Les simulations climatiques et hydrologiques sont produites par une chaîne de modélisations complexe dans laquelle le premier élément de forçage est la quantité de gaz à effet de serre émis (scénarios d'émissions ou RCP pour « Representative Concentration Pathway »).

Les paramètres simulés sont disponibles à différents pas de temps (journalier, saisonnier, annuel) de 2006 à 2100 avec une période historique 1975- 2005.

### 4.2.1. LA CHAÎNE DE MODELISATION HYDROCLIMATIQUE

La chaîne de simulations hydro-climatiques permettant d'obtenir les résultats disponibles sur le portail du DRIAS est représentée ci-dessous :



Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP) sont utilisés comme paramètres de forçage de modèles climatiques globaux (ou GCM pour « Global Circulation Model »)



Les GCM sont des modèles qui représentent les processus climatiques à large échelle, sur des périmètres de 100 à 300 kilomètres de côté. Les fluctuations du climat sur des échelles fines, échelle adaptée aux objectifs d'une étude HMUC, ne sont pas simulées pour ce type de modèle.

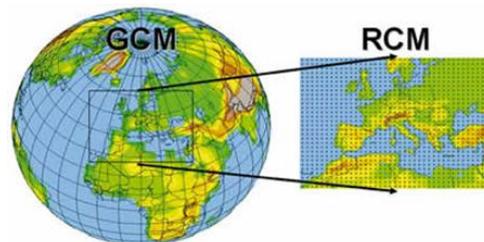


Figure 38 : Illustration du changement d'échelle entre GCM et RCM

**Dans le cadre du DRIAS 2020, 12 modèles climatiques globaux** différents sont retenus pour représenter des futurs possibles différents et intégrer les incertitudes inhérentes aux modélisations.

Pour cela, les sorties de ces modèles globaux sont utilisées en forçage de modèles climatiques régionaux (ou RCM pour « *Regional Circulation Model* ») qui vont se focaliser sur des échelles plus réduites (mailles inférieures à 10 km de côté). **Dans le cadre du DRIAS 2020, 12 modèles climatiques régionaux** différents sont retenus pour simuler les paramètres climatiques à une échelle fine.

A partir des sorties de ces modèles régionaux (paramètres climatiques spatialisés), des méthodes de correction statistique (descente d'échelle) peuvent être mises en place afin de corriger les simulations (historiques) à partir d'observations réelles.

En ce qui concerne les projections climatiques, 11 couples de modèles globaux/régionaux ont été utilisés dans le cadre de l'étude ; un des couples de modèles, trop pluvieux, a été écarté conformément aux préconisations Météo France. Ces couples de modèles ont permis de disposer au pas de temps journalier et spatialisées à l'échelle des mailles 8x8 km (identiques aux mailles SAFRAN), de chroniques pour les paramètres de précipitations, de températures et d'ETP « FAO ».

Les différentes projections des modèles ont été mobilisées en ciblant les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Le scénario RCP 2.6 a été écarté car considéré comme devenant peu probable compte tenu des tendances actuelles d'émissions de GES.

Pour la production de certains indicateurs globaux présentés dans cette étude, les résultats ont été moyennés à l'échelle du bassin versant de l'estuaire de la Loire.

#### 4.2.2. LA CHAÎNE DE MODELISATION EXPLORÉ 2 – SIM2

La chaîne de modélisation SIM pour Safran Isba Modcou développée par Météo France simule sur le territoire métropolitain les flux d'énergie et d'eau à la surface, ainsi que l'évolution du débit des rivières et des principales nappes.

Comme illustré sur la figure ci-contre, la chaîne est composée de 3 modèles interdépendants :

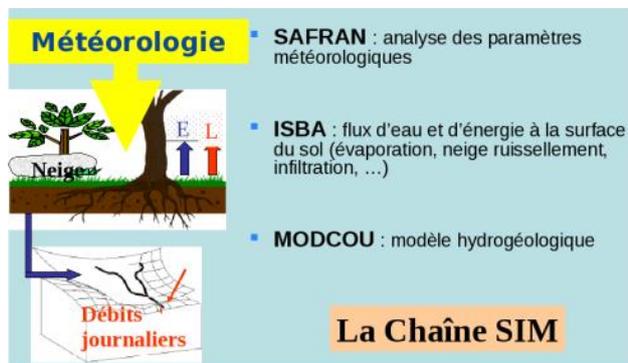


Figure 39 : Schéma de la chaîne SIM (Source : Météo France)

- SAFRAN est un modèle d'analyse à méso-échelle de variables atmosphériques près de la surface. Il utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire les paramètres horaires nécessaires au fonctionnement d'ISBA au pas de temps horaire. Ces paramètres (température,



humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident), sont analysés par pas de 300m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (mailles de 8 x 8 km).

- ▤ **ISBA** (Interaction sol-biosphère-atmosphère) simule les échanges d'eau et d'énergie entre le sol et l'atmosphère. La version utilisée dans la chaîne SIM utilise 3 couches de sol (surface, zone racinaire, zone profonde), et deux températures (température de surface globale du continuum sol-végétation et température profonde). ISBA simule l'ensemble des flux d'eau avec l'atmosphère (interception, évaporation, transpiration) et avec le sol (ruissellement des précipitations et drainage dans le sol). Son pas de temps est de 5 minutes.
- ▤ **MODCOU**, est un modèle hydrologique distribué. Il utilise en entrée, le ruissellement et drainage d'ISBA pour calculer l'évolution des nappes (actuellement seules les nappes de la Seine et du Rhône sont représentées) et le débit des rivières (900 points simulés actuellement). Sa maille de calcul varie de 64 à 1 km en fonction de la limite des bassins versants et du réseau hydrographique. Son pas de temps est de trois heures.

Seule une station SIM2 est présente sur le périmètre du SAGE de l'estuaire de la Loire, et il s'agit d'une station virtuelle à Nantes.



**SAGE** ESTUAIRE  
DE LA LOIRE  
AGIR ENSEMBLE POUR L'EAU

