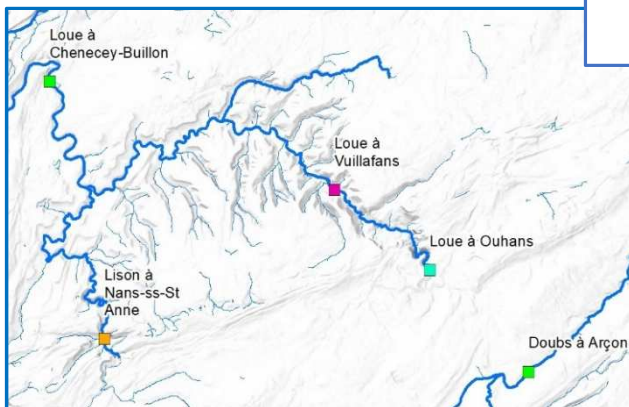
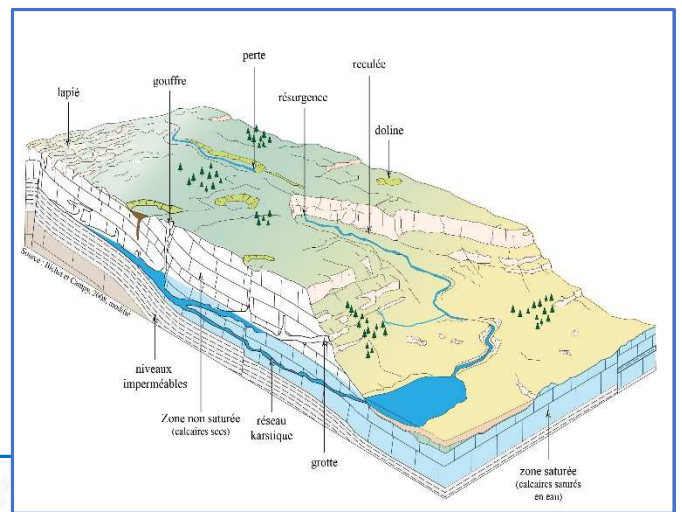


# Réseau Quarstic

## QUALité des eaux et Réseau de Surveillance des rIvières Comtoises

### Bilan du suivi des nitrates sur le bassin de la Loue sur 5 cycles hydrologiques (2016/2021)



#### Partenaires techniques et financiers



## Table des matières

1	Qu'est-ce que le réseau QUARSTIC ? .....	3
1.1	Contexte et pilotage des suivis .....	3
1.2	Les objectifs du réseau Quarstic .....	4
1.3	Le suivi : instrumentation, prélèvements et analyses .....	5
1.4	Le traitement des données .....	7
1.4.1	Les flux.....	7
1.4.2	Les descripteurs statistiques utilisés.....	9
2	Les nitrates et l'eutrophisation des cours d'eau .....	9
3	Résultats 2016-2021.....	12
3.1	Une forte variabilité des concentrations et des flux .....	12
3.1.1	Dans le temps .....	12
3.1.2	Dans l'espace.....	16
3.2	Concentrations et seuils .....	17
3.2.1	Un contraste marqué entre les stations de suivi .....	17
3.2.2	Des concentrations supérieures aux seuils naturels.....	21
4	Conclusions et perspectives .....	24
5	Bibliographie.....	26

## Table des illustrations

<i>Figure 1 : Chronologie des démarches entreprises sur le bassin de la Loue .....</i>	<i>3</i>
<i>Figure 2 : Schéma synoptique du réseau Quarstic et acteurs impliqués .....</i>	<i>3</i>
<i>Figure 3 : Evolution des stations du réseau Quarstic, situation 2022 .....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 4 : Évolution de la méthode de calcul des flux ramenés à une unité de surface.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 5 : Schéma des sources d'apport d'azote dans les eaux souterraines et les cours d'eau.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 6 : Chronique des débits et concentrations en nitrates sur la Loue à Chenecey-Buillon depuis 2002.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 7 : Distribution des concentrations en nitrates à Arçon en fonction des mois. ....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 8 : Représentation schématique des processus de transfert de nutriments lors des crues de reprise .....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 9 : Flux annuels de N-NO<sub>3</sub> des sous-bassins de la Loue .....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 10 : Relation entre la proportion de sous bassin occupé par des surfaces agricoles et les flux annuels (adapté de Charlier et al., 2020).....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 11 : Distribution des concentrations en nitrates sur les 5 stations suivies.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 12 : Moyenne annuelle des concentrations en nitrates sur les 5 stations Quarstic.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 13 : Percentile 90 des concentrations en nitrates sur les 5 stations Quarstic.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 14 : Répartition des mesures de nitrates sur les stations selon les classes d'Etat DCE de l'arrêté du 25 janvier 2010 modifié .....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 15 : Répartition des mesures de nitrates sur les stations en regard des concentrations maximales admissibles proposés par Badot et Degiorgi (2022).....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 16 : Descripteurs synthétiques des résultats annuels pour chaque station : moyenne et percentile 90 ....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 1 : Instrumentation des stations du réseau Quarstic en 2022 .....</i>	<i>7</i>
<i>Tableau 2 : Concentrations maximales admissibles proposées par Degiorgi et Badot (2022) .....</i>	<i>22</i>

# 1 Qu'est-ce que le réseau QUARSTIC ?

## 1.1 Contexte et pilotage des suivis

Certains des grands hydrosystèmes karstiques du **massif du Jura**, tels que la Loue, le Doubs Franco-Suisse, le Dessoubre, la Bienne, la Haute rivière d'Ain, connaissent des **dysfonctionnements écologiques majeurs** qui se traduisent, depuis 2010, par des épisodes de **mortalités piscicoles** de grandes ampleurs. Exemple fort de ce constat régional, le **bassin versant de la Loue** sur lequel se sont concentrées de nombreuses initiatives (Figure 1).

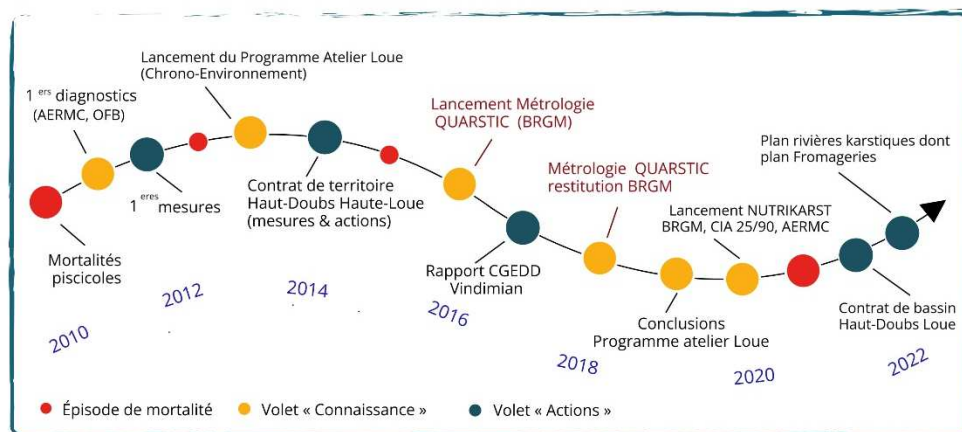


Figure 1 : Chronologie des démarches entreprises sur le bassin de la Loue

Certaines d'entre elles visent à mieux connaître le milieu afin de cibler les opérations de gestion, c'est le cas du programme « **Qualité des eaux et Réseau de Surveillance des rivières Comtoises** » porté par le Département du Doubs en partenariat avec l'EPAGE Haut-Doubs Haute-Loue. Après une mise en œuvre par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (2015-2018), le pilotage du réseau QUARSTIC est désormais assuré par ces deux structures, avec un appui technique du Pôle Karst de l'EPTB Saône & Doubs (Figure 2).

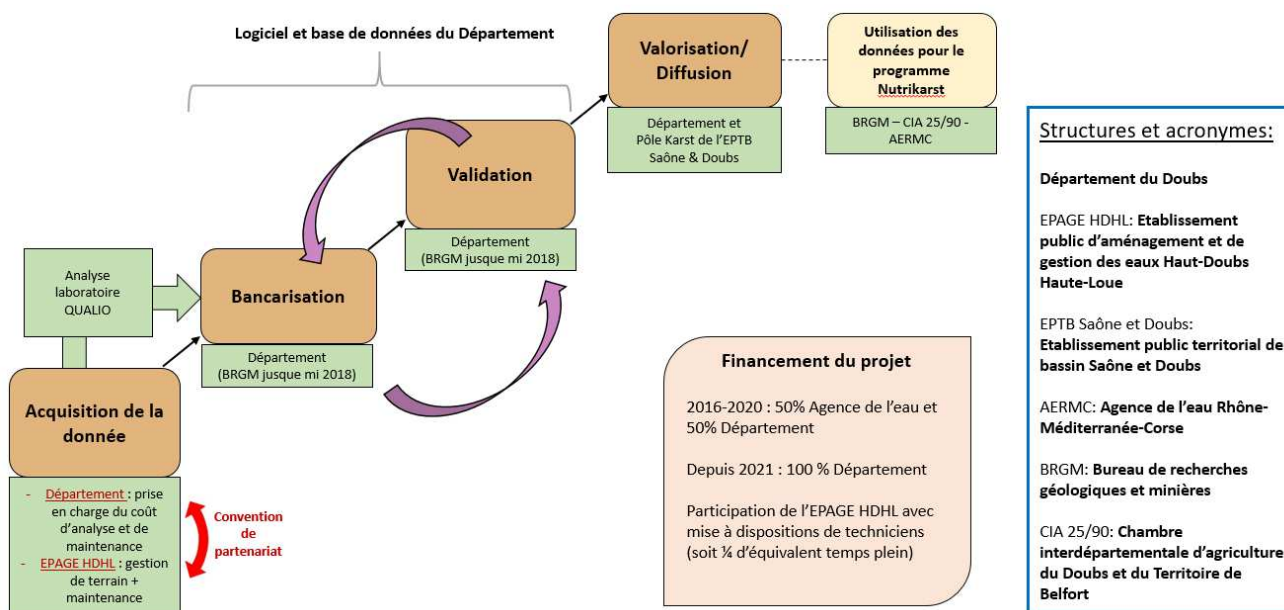


Figure 2 : Schéma synoptique du réseau Quarstic et acteurs impliqués

## 1.2 Les objectifs du réseau Quarstic

Orientés par les préconisations du groupe scientifique de la Conférence Départementale de l'Eau du 11 avril 2014 <sup>1</sup> et les recommandations techniques du BRGM issues de la première phase de suivi, les objectifs du réseau Quarstic sont les suivants :

► **Poursuivre les efforts de métrologie permettant un niveau de résultat adapté à la sensibilité des sols et cours d'eau karstiques vis-à-vis des transferts de nutriments.**

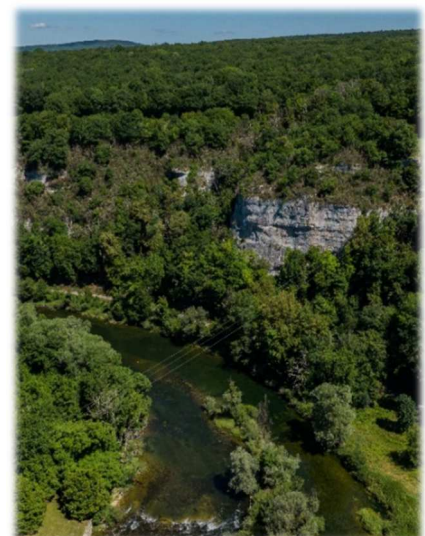
Le contexte est celui de rivières karstiques à forte valeur patrimoniale (Photographie 1 et 2) marquées par une eutrophisation importante et ce malgré des concentrations en nutriments qui ne paraissent pas, de prime abord, excessives. Par ailleurs, ce contexte géologique induit une forte variabilité interannuelle et nécessite d'aller au-delà des suivis ponctuels de routine<sup>2</sup> pour apprécier l'état de conservation réel des cours d'eau et son évolution.

► **Disposer d'une estimation fiable des flux de nutriments afin d'analyser leur tendance évolutive à moyen et long terme.**

La fréquence de suivi élevée permet d'estimer finement des flux représentatifs et de statuer sur les apports de nutriments aux cours d'eau. Aussi, les liens entre la qualité des eaux et ses sources de perturbations potentielles (activités agricoles, industrielles, rejets domestiques...) nécessitent d'être étudiés à **une échelle de temps pertinente** permettant de faire la part des choses entre l'évolution de la qualité d'eau liée aux impacts anthropiques et la variabilité naturelle (influence des conditions hydrologiques), voire le changement climatique.

► **Améliorer les connaissances sur les transferts de nutriments en appui aux programmes de recherche sur cette thématique.**

Les données produites sont ainsi utilisées dans le cadre de projets de recherche sur cette thématique tel que le programme NUTRIKARST (BGRM, CIA 25/90 et AERMC), débuté au second semestre 2019, dont le but est de quantifier finement les transferts d'azote des sols aux rivières et ceci à plusieurs niveaux d'échelle (massif du Jura, bassin de la Loue et sous bassin du Verneau).



*Photographie 1 et 2 : Source de la Loue (en haut) et vallée de la Loue à Rurey. Crédit photo L. Georges, Département du Doubs*

<sup>1</sup>Humbert J.F. (2014). Réflexions et propositions du Groupe Scientifique de la Conférence Départementale.

<sup>2</sup>[Les réseaux de suivi de routine](#) intègrent les réseaux de suivi pilotés par l'AERMC Corse (RCS, RCO, RRP) en application de la Directive Cadre Européenne sur l'eau (DCE) et le réseau de suivi des cours d'eau à forte valeur patrimoniale du Département du Doubs.

► **Communiquer et sensibiliser les différents publics du territoire à la problématique de qualité de l'eau**

Afin d'informer et de sensibiliser les élus, les gestionnaires mais également le grand public à la dégradation de la qualité des grands cours d'eau karstiques et à l'enjeu que constitue leur préservation (biodiversité, ressource en eau...), le Département a mis en place un site dédié à l'eau et aux milieux aquatiques. Ainsi, les productions relatives au réseau Quarstic sont directement accessibles sur ce site (<https://doubs-eau.fr>).

Outre les objectifs précédents, le présent document s'intègre plus particulièrement dans cet objectif de communication des résultats relatifs à la qualité des cours d'eau.

► **Evaluer plus finement les actions et aider à la prise de décision des porteurs de projets locaux**

Si un suivi fin des flux de nutriments à moyen ou long terme permet d'apprécier l'impact de l'évolution des activités anthropiques ou du changement climatique, il peut également constituer un indicateur de l'efficacité des actions entreprises à l'échelle du bassin versant (ou de sous bassins versants) pour la préservation des milieux aquatiques et de la ressource en eau.



*Photographie 3 : Le Doubs dans la traversée d'Arçon. Crédit photo L. Georges, Département du Doubs.*

### 1.3 Le suivi : instrumentation, prélèvements et analyses

De 2016 à 2018, les mesures étaient réalisées sur 5 sites clé du bassin de la Loue, situés à proximité ou au droit de stations hydrométriques gérées par la DREAL Bourgogne Franche-Comté (Figure 3) et ceci pour facilement coupler les suivis de concentration et de débits afin d'estimer des flux de nutriments. Ces cinq sites sont :

- **Les sources de la Loue et du Lison soit les sources karstiques principales du bassin.**
- **Le Doubs à Arçon soit le secteur en amont des pertes principales du cours d'eau, pertes qui alimentent en partie la source de la Loue.**
- **Les stations de Vuillafans et Chenecey-Buillon, soit deux stations qui permettent de caractériser des situations en rivières dans les parties amont et aval du bassin versant strictement karstique.**

Qu'il s'agisse du volume financier des analyses effectuées en laboratoire ou du temps consacré par le technicien de l'EPAGE Haut-Doubs Haute-Loue à la gestion des phases de terrain (relevé, saisie et maintenance), des évolutions et ajustement du protocole se sont avérées nécessaires dans l'objectif de pouvoir maintenir le dispositif sur le long terme. Afin de pouvoir pérenniser le suivi, et en s'appuyant sur les préconisations émises par le BRGM suite aux 3 première années de mesures, le suivi par préleveur automatique est maintenu sur 2 stations, le Doubs à Arçon et la Loue à Chenecey-Buillon 2 autres (Lison à Nans-sous-Saint-Anne et Loue à Ouhans) faisant l'objet d'un suivi allégé par sondes uniquement (Tableau 1 ci-après).

Aussi, le réseau a évolué au cours du temps et des ajustements du protocole se sont avérés nécessaires dans l'objectif de pouvoir maintenir ce dispositif. Ces ajustements, basés sur les recommandations du BRGM conduisent en 2022 à la situation décrite par la figure 3.

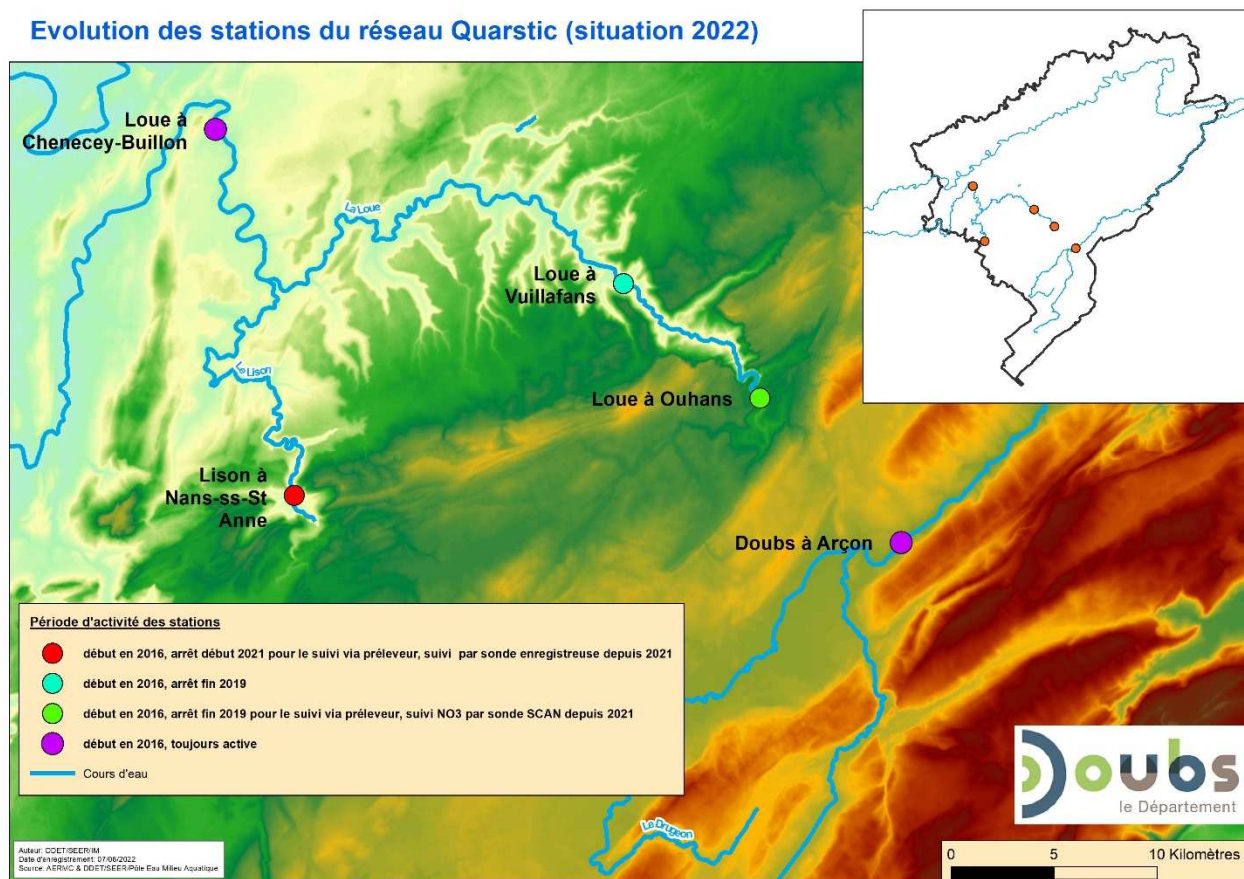


Figure 3 : Evolution des stations du réseau Quarstic, situation 2022

**Un dispositif de préleveurs automatiques (Photographie ) permet la réalisation de prélèvement unitaire d'eau toutes les 24h, et ce, tous les jours de l'année.** En période de basses eaux, soit globalement 6 mois par an, 7 prélèvements unitaires sont homogénéisés et forment 1 échantillon composite hebdomadaire mis en analyse. En hautes eaux, 2 échantillons composites sont analysés par semaine, intégrateurs d'une séquence de 3 et 4 jours. Ainsi, un nombre d'analyse deux fois plus importants est effectué en période de hautes eaux que lors des basses eaux et ceci pour mieux prendre en compte la plus forte variabilité des concentrations rencontrées lors de la séquence automne/hiver.

Tableau 1 : Instrumentation des stations du réseau Quarstic en 2022

Stations suivies par préleveur automatique <sup>3</sup> pour analyse des nitrates+ sonde en continu <sup>4</sup> pour les paramètres in-situ	Station suivie par sonde en continu pour les paramètres in-situ	Station suivie par sonde SCAN <sup>5</sup>
Doubs à Arçon	Lison à Nans-sous-Sainte-Anne	Source de la Loue à Ouhans
Loue à Chenecey-Buillon		



Photographie 4: Dispositif de prélèvement sur la station de Chenecey-Buillon. Crédit photo J. Nicolet (EPAGE HD/HL)

## 1.4 Le traitement des données

**Les calculs de flux ou de descripteurs sont effectués par cycle (année) hydrologique soit une période courant du 1<sup>er</sup> septembre au 31 août de l'année suivante.** Ce choix permet notamment d'intégrer aux différents traitements la continuité des événements de hautes eaux qui se déroulent souvent en fin d'automne/début d'hiver.

### 1.4.1 Les flux

Comme l'évoquent Minaudo et Moatar (2008) « *la connaissance des flux de nitrates transportés par les cours d'eau représente un enjeu essentiel pour les gestionnaires de bassin versant, en particulier lorsqu'il s'agit d'identifier les bassins versants les plus contributeurs sur lesquels il faut agir pour limiter les apports, ou bien afin de quantifier précisément l'impact de mesures environnementales prises. Une bonne connaissance des flux repose sur une bonne connaissance des concentrations en nutriments dans les cours d'eau, associée à celle des débits* ».

Le réseau Quarstic s'appuie donc sur des stations de mesure où sont suivis conjointement et à forte fréquence le débit et les concentrations en nitrates. Les flux bruts peuvent donc être

<sup>3</sup> Les préleveurs automatiques permettent des prélèvements quotidiens, en vue d'une analyse des nitrates sur des échantillons moyens hebdomadaire ou bi-hebdomadaires.

<sup>4</sup> Les sondes en continu permettent un enregistrement horaire des paramètres in-situ soit la température, le pH, la conductivité et l'oxygénation.

<sup>5</sup> La sonde SCAN permet un enregistrement à pas de temps horaire des concentrations en nitrates.

estimés, pour un site donné, par le produit entre ces paramètres, et exprimés en kg/an. Afin d'approcher les flux à l'échelle annuelle, cette estimation est effectuée en utilisant une méthode adaptée à la structure des données<sup>6</sup>. Les flux annuels bruts sont ensuite rapportés à la surface du bassin versant producteur, afin de permettre une comparaison spatiale entre les différents sous-bassins hydrogéologiques définis lors de la configuration du réseau (Charlier et Vallet, 2016). Ces flux spécifiques sont exprimés en kg/ha/an. L'objectif est de comparer les bassins versant entre eux quel que soit leur taille et de discerner ceux qui contribuent davantage aux apports de nitrates dans les cours d'eau.

L'évolution du réseau Quarstic (Cf 1.3) a entraîné une évolution des méthodes d'estimation et un regroupement de sous-bassins, c'est ce qu'explique la Figure 4 ci-dessous qui détaille le calcul pour chaque sous bassin.

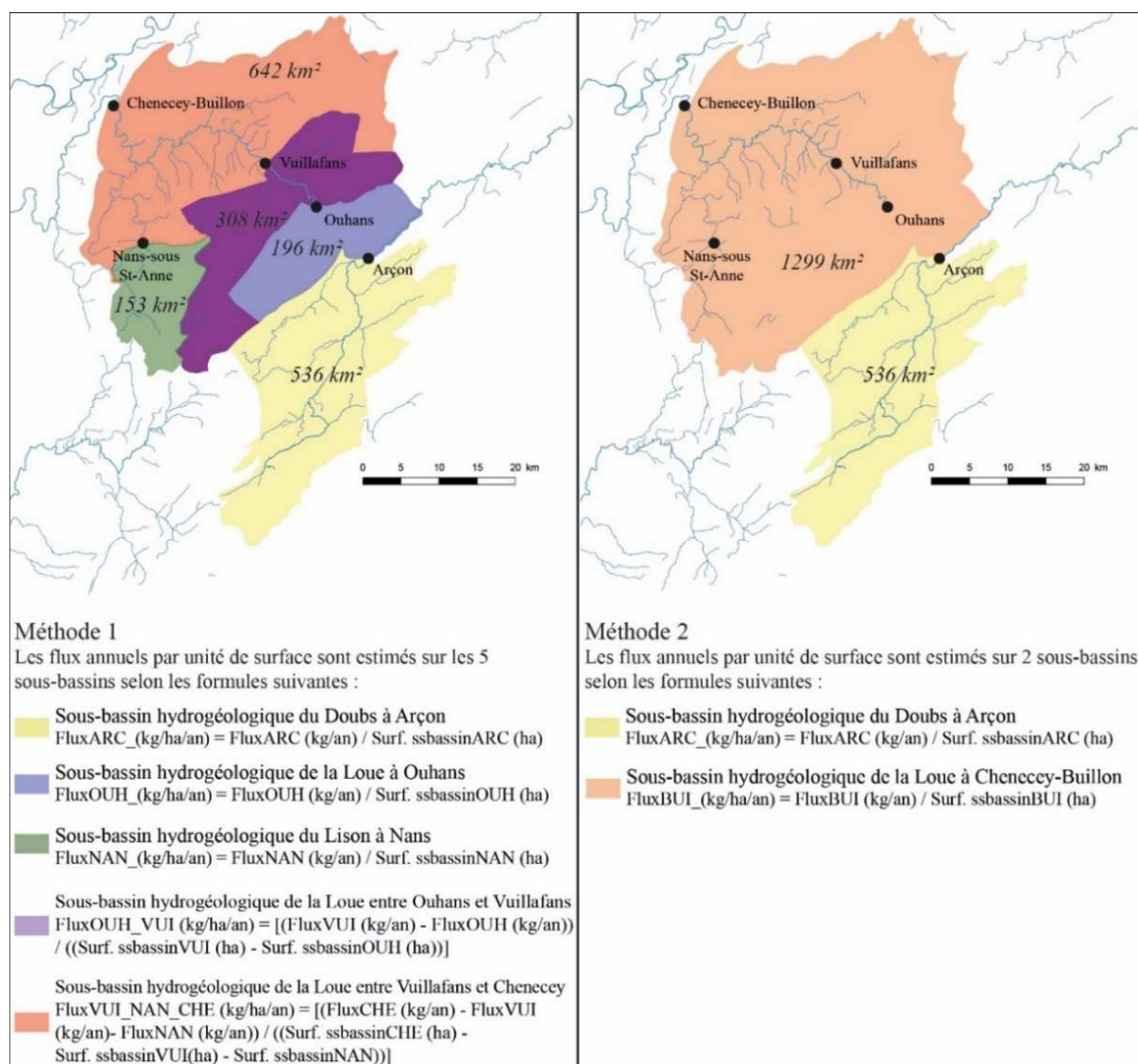


Figure 4 : Évolution de la méthode de calcul des flux ramenés à une unité de surface

<sup>6</sup> Ici la méthode utilisée est celle de « l'interpolation linéaire de la concentration » :  $Flux = K \sum_{j=1}^{365} C_{jQj}^{int}$  selon Moatar et Meybeck (2005).



### 1.4.2 Les descripteurs statistiques utilisés

En complément de l'approche par flux, une caractérisation statistique est également proposée, permettant une approche comparative entre stations et années, mais également de confronter ces descripteurs à des seuils de qualité. Les descripteurs présentés dans ce rapport sont :

- **Le percentile 90**, qui est une valeur au-dessous de laquelle se situent au moins 90% des données. C'est un repère de la gamme de valeurs hautes atteintes sur un site de mesure.
- **La médiane**, qui est la valeur qui partage une série de données en deux parties de même effectif.
- **La moyenne annuelle**, qui a été approchée grâce aux moyennes par saison. Par exemple, la moyenne de l'année 2019 a été obtenue en faisant la moyenne de l'été, de l'automne, de l'hiver et du printemps 2019. Ce choix de calcul prend en compte le protocole de prélèvement avec deux fois plus de mesures en automne/hiver où la variabilité hydrologique est plus forte (alternance hautes eaux et basses eaux, crues...) qu'en printemps/été, pour essayer de percevoir les variations de concentrations plus fortes en période pluvieuse. Ainsi, cette méthode a été choisie pour donner le même poids à chaque saison de l'année sans biaiser le calcul.

## 2 Les nitrates et l'eutrophisation des cours d'eau

L'eutrophisation des cours d'eau est une succession de processus biologiques enclenchés en réponse à un apport excessif de nutriments, notamment des composés de l'azote et du phosphore. Les effets les plus notables sont des proliférations de producteurs primaires (plantes aquatiques, algues filamenteuses ou cyanobactéries dans les eaux courantes (Photographie ), des phénomènes de toxicité avec d'éventuels risques sanitaires associés, une perturbation de l'oxygénation (déficit d'oxygénation en période nocturne et sur-saturation en période diurne), des pertes de biodiversité (Pinay *et al.*, 2018).

Le risque d'eutrophisation d'un écosystème aquatique dépend à la fois de conditions locales comme l'ensoleillement, la température ou le ralentissement des écoulements, mais aussi des apports de nutriments provenant de son bassin-versant. L'azote et le phosphore sont souvent considérés ensemble parce que ce sont les principaux facteurs responsables du déclenchement des phénomènes d'eutrophisation des écosystèmes aquatiques, les facteurs précédemment cités étant aggravants.



*Photographie 5 : Prolifération d'algues en bordure du Doubs à Arçon. Crédit photo BRGM*

Concernant l'azote retrouvé dans les cours d'eau, celui-ci a des origines multiples (Figure 5) et peut être présent sous formes organiques ou sous formes minérales, comme :

- les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ), l'ammoniac ou l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) qui présentent des effets toxiques sur l'écosystème aquatique lorsque leur concentration augmente,
- **les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) qui contribuent au processus d'eutrophisation des rivières.** C'est sur cette forme de l'azote que se concentre d'ailleurs ce document. Les nitrates constituent en effet la forme dominante des transferts d'azote depuis les sols jusqu'aux eaux de surface ou au eaux souterraines, c'est une forme très mobile facilement transportée par lessivage des sols. De plus, il s'agit, avec l'ammonium, d'une forme pouvant être prélevée par les végétaux, y compris aquatiques comme les algues filamenteuses, pour permettre leur croissance.

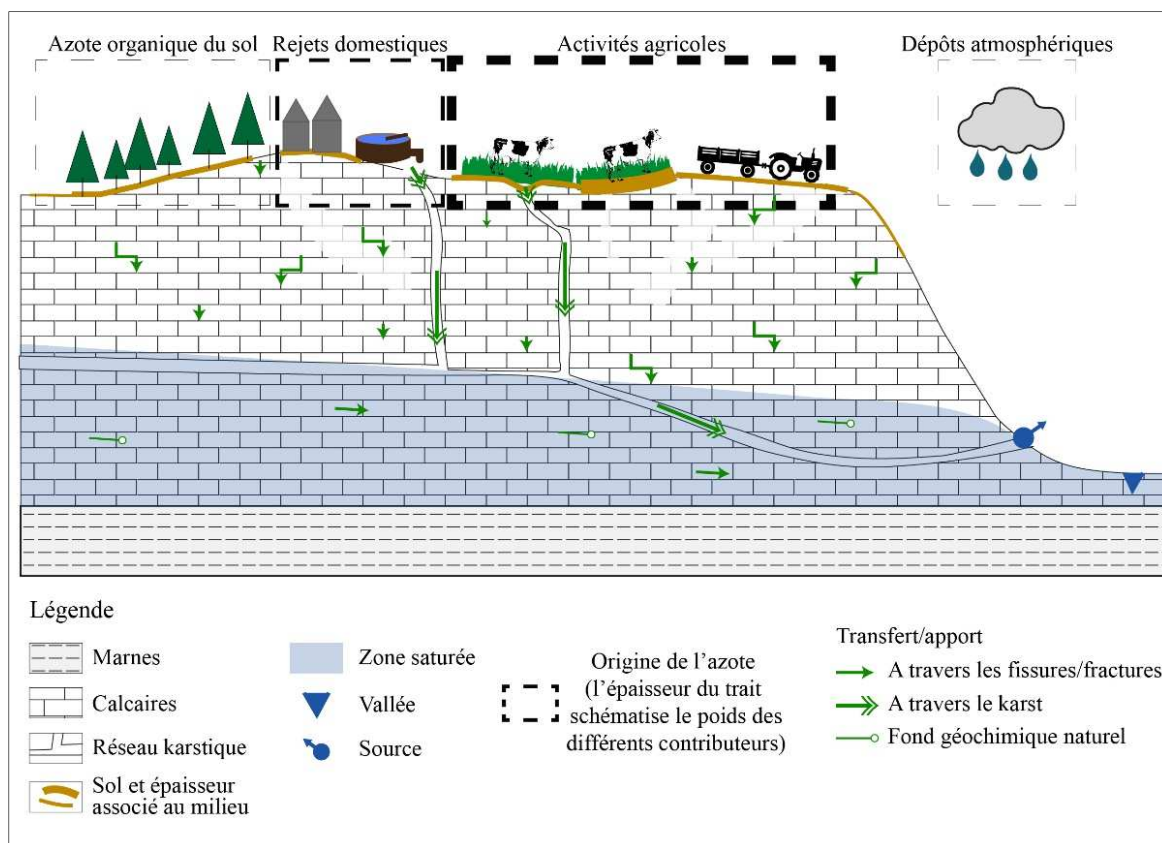


Figure 5 : Schéma des sources d'apport d'azote dans les eaux souterraines et les cours d'eau.

Il est possible d'affiner ce schéma à la lumière des résultats du programme Nutrikarst. Ainsi dans cette étude, les différents apports ont été précisés à l'échelle d'une vingtaine de bassins (et de sous bassins) du massif du Jura dont ceux du Doubs à Arçon, de la Loue à Vuillafans et à Chenecey-Buillon. Sans rentrer dans le degré de précision de l'étude, les auteurs évaluent que les activités agricoles apportent entre 75 et 95 % de l'azote sur le secteur, que l'assainissement constitue le poste secondaire, et que les autres sources peuvent être considérées comme négligeables.

A noter que ces proportions concernent la production d'azote à l'échelle du bassin versant, et ne peuvent en toute rigueur pas être directement transposées en termes de proportions de la charge en nitrate présente dans les cours d'eau. En effet, selon les sources de production, la fraction de la part d'azote produite réellement transférée vers les cours d'eau et y transitant in fine est susceptible de varier en fonction des processus de stockage, transferts, de phénomènes d'épuration...

## 3 Résultats 2016-2021

### 3.1 Une forte variabilité des concentrations et des flux

#### 3.1.1 Dans le temps

##### 3.1.1.1 A l'échelle interannuelle

La figure 6 présente, pour la station de Chenecey-Buillon, l'évolution conjointe des débits moyens journaliers, des débits moyens annuels, des concentrations en [NO<sub>3</sub>] et des flux de l'azote issu des nitrates [N- NO<sub>3</sub>]. Les données sont agrégées sur 19 cycles hydrologiques depuis 2002/2003 jusqu'au cycle 2020/2021 avec les données issues :

- des analyses de Grand Besançon Métropole (GBM) sur la période 2002/2016 (station de prélèvement dans la Loue pour l'alimentation en eau potable ;
- du réseau Quarstic sur les cinq derniers cycles (2016/2021).

Une telle approche, à l'échelle interannuelle, permet de borner les paramètres dans des contextes hydroclimatiques très variables.

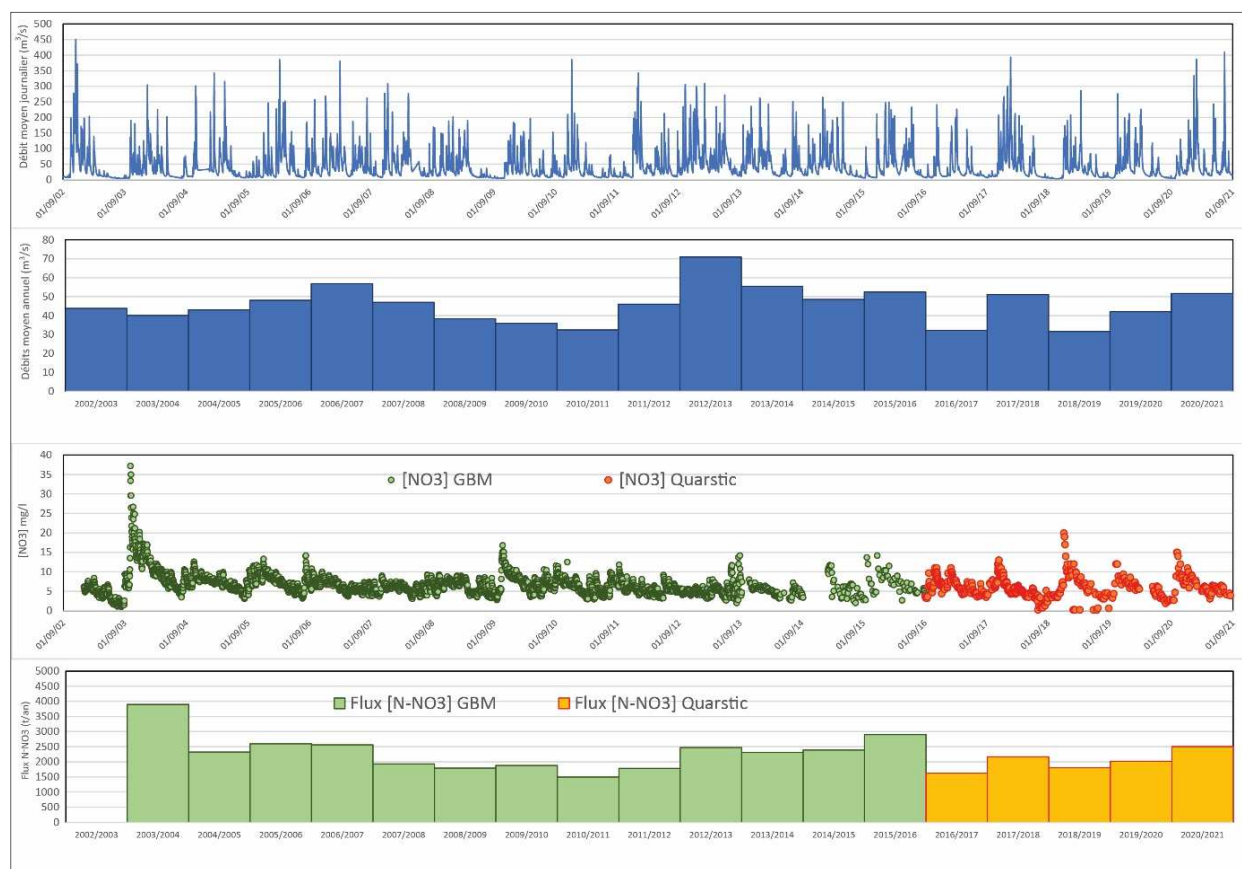


Figure 6 : Chronique des débits et concentrations en nitrates sur la Loue à Chenecey-Buillon depuis 2002

Au regard de cette figure, il apparaît d'abord que les concentrations en  $[\text{NO}_3]$  s'inscrivent, hors événement exceptionnel, dans des gammes de valeurs comprises entre 5 et 15 mg/l soit de deux à 5 fois supérieures au fond géochimique naturel (Nisbet et Vernaux, 1970). Sur près de 20 ans de données, la valeur moyenne est légèrement supérieure à 6 mg/l.

Les fluctuations à la station de Chenecey-Buillon ont également été étudiées par Charlier *et al.* (2020) mais sur une chronique plus longue (1970-2018). Les auteurs mettent en évidence l'évolution conjointe entre les courbes de livraison d'engrais et celle des nitrates dans les eaux, avec une augmentation sur la période 1970-1990 puis une inflexion à partir des années 2000 (inflexion que ces auteurs associent à la diminution de la fertilisation minérale sur les cultures et prairies).

Au niveau des flux annuels de  $[\text{N-NO}_3]$ , plusieurs configurations s'observent :

- Les cycles avec des flux conséquents (2012/2013, 2015/2016) sont classiquement à relier au contexte climatique pluvieux et aux débits conséquents. Un cycle s'individualise dans ce groupe, le cycle 2003/2004 pour lequel le flux annuel important n'est pas corrélé au débit moyen annuel important mais plus aux concentrations records enregistrés avec une évolution des concentrations en nitrates singulières, un pic automnal à 40 mg/l puis une très lente récession de ces concentrations jusqu'à retrouver des valeurs plus « classiques » au printemps 2004.
- Lorsque les concentrations ne présentent pas une telle configuration mais des fluctuations annuelles plus « classiques » [5-15 mg/l], c'est bien l'hydroclimatologie qui contrôlent les flux : des années avec des flux moyens lorsque la pluviosité est moyenne (2007/2008, 2014/2015) ou des flux plus faibles lorsque le cycle est plus sec (2010/2011, 2016/2017).

### 3.1.1.2 A l'échelle annuelle

L'évolution des  $[\text{NO}_3]$  présente une structure saisonnière et ceci quelle que soit la station. Celle d'Arçon sur le Doubs est l'archétype de ce fonctionnement (Figure 7) avec des valeurs plus fortes en fin d'automne et en hiver et qui précèdent une diminution progressive au printemps jusqu'aux valeurs minimales de la fin d'été.

Les concentrations en nitrates montrent une évolution saisonnière marquée du fait de la saisonnalité des mécanismes de transferts des nitrates vers les eaux superficielles en lien avec les conditions climatiques et hydrologiques (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La hausse des concentrations en automne provient ainsi principalement de la minéralisation automnale et du reliquat d'azote en entrée d'hiver c'est à dire l'azote non consommé par les végétaux en fin de période de végétation constituant un stock lessivable) (Tournebize *et al.*, 2008) dont le transfert est favorisé par les précipitations et la hausse des débits. Au printemps, la reprise de la végétation et des processus d'épuration au niveau du cours d'eau et de ses berges réduisent les apports et conduisent à des plus faibles concentrations.



Photographie 6 : Hausse de débit automnale sur la Loue à Chenecey-Buillon, phénomène propice au transfert de nitrates. Crédit Photo : T. Daudey (Département du Doubs)

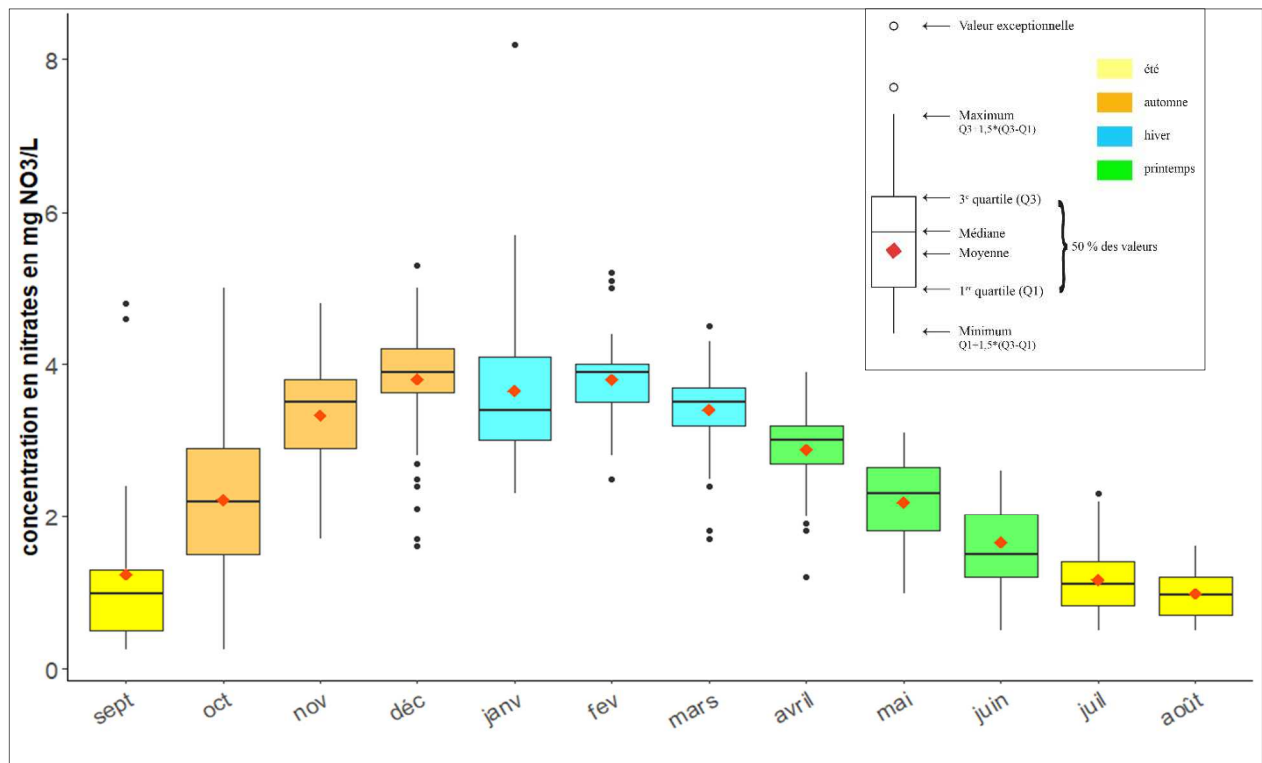


Figure 7 : Distribution mensuelle des concentrations en nitrates à Arçon. (Données mensuelles des cycles hydrologiques 2016/2017 à 2020/2021)

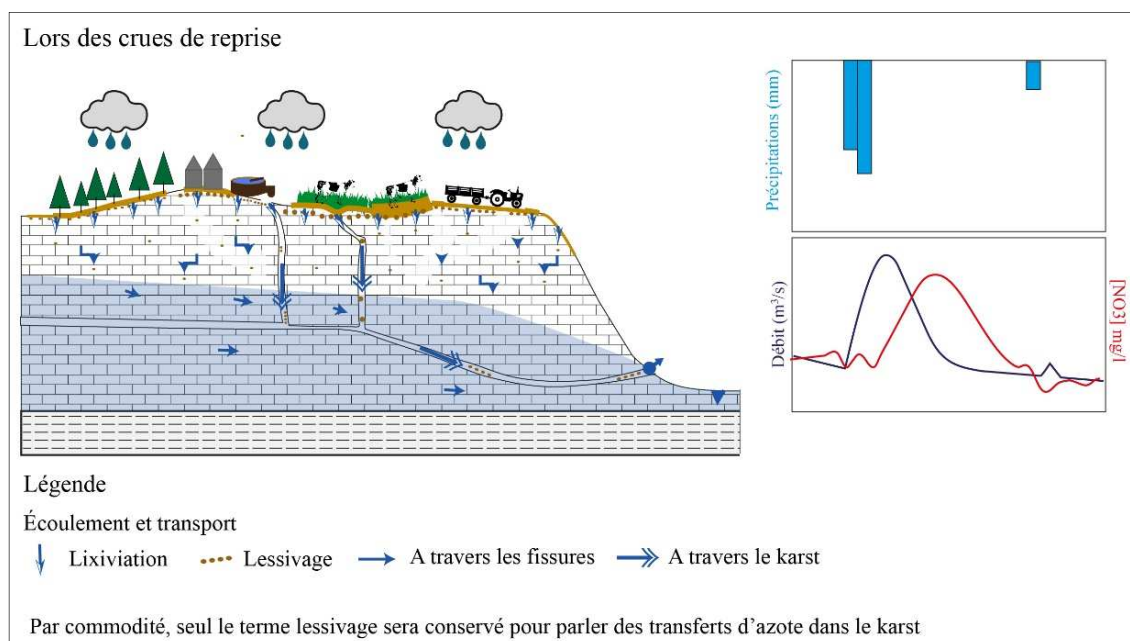


Figure 8 : Représentation schématique des processus de transfert de nutriments lors des crues de reprise

Une des composantes majeures de cette saisonnalité est l'observation annuelle d'un pic automnal que la figure 8 schématise et particulièrement bien illustré en 2003 (voire en 2018) : un étiage sévère auquel succède des concentrations en nitrates très importantes après les lessivages associés aux premiers épisodes pluvieux conséquents. L'hypothèse associée est que la sévérité des sécheresses estivales contrôle au moins partiellement l'intensité des lessivages automnaux.

Deux explications concourent à expliquer ce phénomène. D'abord la diminution de production végétale en période de sécheresse qui s'accompagne mécaniquement d'une augmentation de l'azote disponible dans le sol (Tournebize *et al.*, 2008). Mais aussi le profil des eaux mobilisées comme le souligne Charlier *et al.*, (2022), ces écoulements de reprise peuvent être : « i) des eaux souterraines préalablement stockées dans le karst (Le Mesnil *et al.*, 2022) et enrichies en  $\text{NO}_3$  par les lessivages successifs des épisodes pluvieux printaniers et estivaux, et ii) des eaux issues du lessivage des sols lors des épisodes pluvieux de ces crues de reprise qui sont alors faiblement diluées par le faible volume d'eau de la zone noyée du karst en fin d'étiage ».

Notons que l'hypothèse forte est que les évolutions climatiques risquent de renforcer ce phénomène de pic saisonnier avec des périodes de sécheresse encore plus marquées et des lessivages automnaux accrus.

Enfin, rappelons que la dynamique temporelle des concentrations en nitrates n'est pas directement synchronisée avec le degré de colmatage algal, symptôme de l'eutrophisation. Ainsi, les taux de colmatage les plus élevés sont observés préférentiellement en période de débit stabilisé, notamment si celles-ci ont été précédées de conditions hydroclimatiques favorisant le lessivage (Degiorgi *et al.* 2018). D'une part cela atteste que d'autres paramètres influencent le développement algal, tels les vitesses d'écoulement, l'intensité lumineuse, la minéralisation, mais également que les concentrations en nitrates obtenues en basses eaux restent suffisantes pour conduire à des proliférations.

### 3.1.2 Dans l'espace

Le suivi mis en place autorise une estimation des flux par sous bassin selon les modalités présentées sur la figure 4. Ramenés à une unité de surface comparable (ici l'hectare), les flux annuels calculés sont directement comparables entre les différents sous bassins (Figure 9).

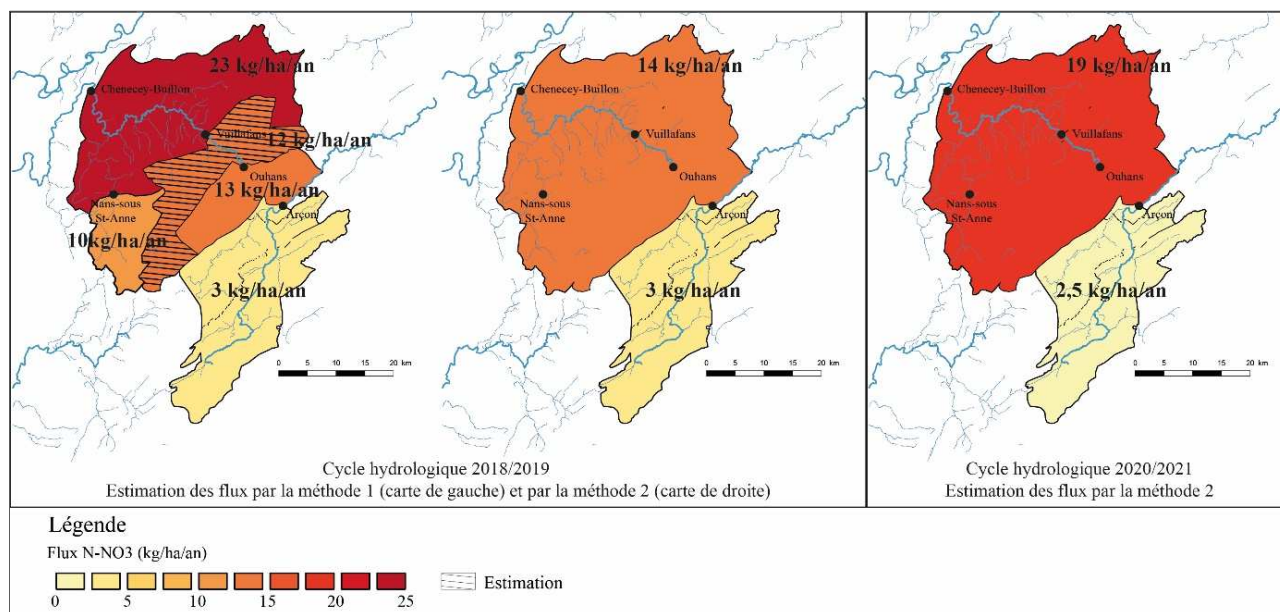


Figure 9 : Flux annuels de N-NO3 des sous-bassins de la Loue

Le sous bassin aval de la Loue (station de Chenecey-Buillon) présente les charges les plus élevées et ceci pour tous les cycles hydrologiques avec des charges annuelles comprises entre 15 et 25 kg/ha/an. Pour ce sous-bassin, les flux estimés sont de l'ordre de 1,5 à 2 fois plus élevés que pour les bassins intermédiaires et environ 7 fois plus importantes que ceux enregistrés sur le sous bassin du Doubs à Arçon (compris entre 2,5 et 5 kg/ha/an).

De telles dissemblances (et surtout l'opposition amont/aval) ne peuvent pas s'expliquer par d'importantes différences de contextes : la géologie et l'hydroclimatologie sont globalement homogènes entre les différents sous bassins. Si l'influence de phénomènes auto-épuratifs dans la Haute-Chaîne est fortement soupçonnée (*cf. infra*), les différences observées sont sans doute également corrélées aux pratiques agricoles des territoires (Charlier *et al.*, 2020). C'est ce que traduit la figure 10, sur laquelle sont mises en perspective :

- la proportion des 5 sous bassins occupée par des surfaces agricoles « transformées<sup>7</sup> » (apports d'engrais azotés et/ou travail du sol) représentées par les céréales et champs et les prairies temporaires ;
- le flux annuel de N-NO3 des cinq sous bassins (seul le cycle hydrologique 2018/2019 est représenté sur la figure 10).

<sup>7</sup> Par opposition aux prairies permanentes qui constituent l'immense majorité de la Surface Agricole Utile : celles-ci représentant 97, 94, 82, 87 et 62 % de la SAU aux stations respectivement d'Arçon, d'Ouhans, de Vuillafans, de Nans et de Chenecey (RGP 2019)



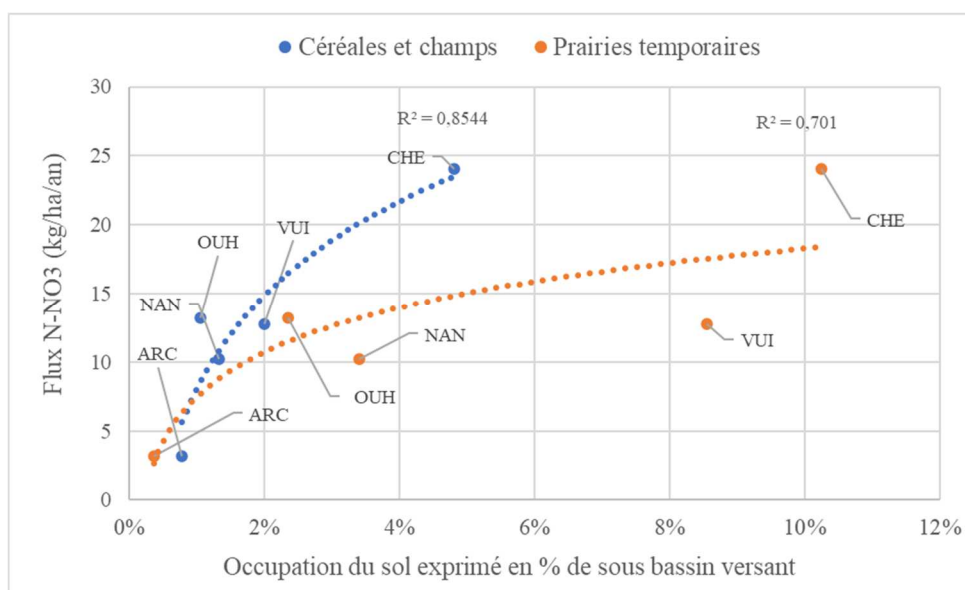


Figure 10 : Relation entre la proportion de sous bassin occupé par des surfaces agricoles et les flux annuels de N-NO<sub>3</sub> (adapté de Charlier et al., 2020)

Si pour l'ensemble des cycles hydrologiques, les relations semblent témoigner d'une corrélation statistique entre les proportions occupées par des surfaces agricoles transformées et les flux annuels, l'échantillon de données reste trop sommaire pour être totalement conclusif.

Il n'en demeure pas moins que ces chiffres participent du constat, déjà largement étayé dans la littérature scientifique, que tout ce qui concourt à la transformation agricole des sols (apports d'engrais/travail du sol) participent à l'augmentation de la charge azotée des hydrosystèmes.

## 3.2 Concentrations et seuils

Ce chapitre a vocation à présenter quelques résultats synthétiques relatifs aux concentrations en nitrates mesurées sur le bassin d'alimentation de la Loue et à les confronter aux seuils réglementaires et aux valeurs naturelles attendues sur ce type de milieu selon la synthèse réalisées dans le cadre de l'étude flux admissible portée par l'EPAGE Haut-Doubs Haute-Loue.

### 3.2.1 Un contraste marqué entre les stations de suivi

La distribution des données (Figure 11) et les descripteurs synthétiques calculés indiquent une différence notable entre certaines stations et déjà perçue ci-avant (cf. § 2.1.2).

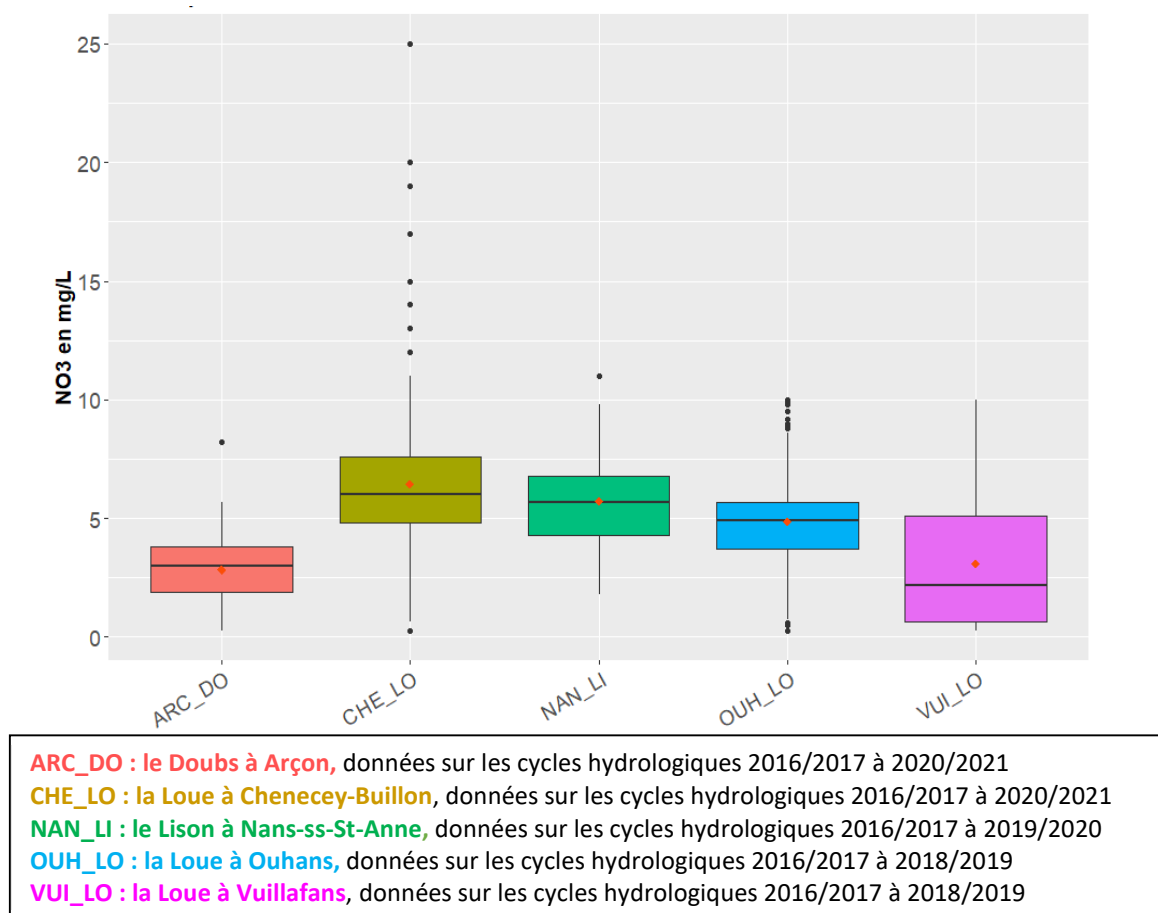


Figure 11 : Distribution des concentrations en nitrates sur les 5 stations suivies

Le Doubs à Arçon, station intégratrice de la Haute-Chaîne, présente la concentration moyenne en nitrates la plus faible, proche de 2,5 mg NO<sub>3</sub>/L, et 90% des résultats (P90) se situent sous 4,1 mg NO<sub>3</sub>/L. Ces valeurs sont plus modestes et tamponnées que sur les autres stations. S'il est probable que ce résultat puisse être lié à de moindres apports de nitrates vers les eaux superficielles du Doubs amont, comparativement à la Loue ou au Lison, il convient de mentionner qu'au niveau d'Arçon, le Doubs a pu bénéficier de phénomènes d'auto-épuration sur plus de 40 km déjà parcourus depuis sa source. Le Doubs, sur ce trajet, traverse le lac Saint-Point et voit son lit -comme celui de son principal affluent le Drugeon- bordé de zones humides et colonisé par les végétaux aquatiques. Autant de sites favorables à une autoépuration via l'absorption par les producteurs primaires ou via dénitrification<sup>8</sup>. La faiblesse des débits estivaux sur ce secteur, en limitant les apports et en favorisant le développement algal (réchauffement, faible hauteur d'eau et vitesse d'écoulement...), est également susceptible de contribuer au constat de moindre concentration en nitrates sur le Doubs à Arçon que sur les autres stations suivies.

Concernant les stations implantées à proximité immédiate des deux principales exurgences karstiques de la vallée, c'est celle du Lison (Lison à Nans-sous-Saint Anne) qui présente la concentration moyenne en nitrates la plus élevée, bien que la gamme de valeurs et la distribution restent assez proches de celles de la Loue à Ouhans.

<sup>8</sup> **Dénitrification** : Processus microbiologique de transformation de l'azote nitrique (nitrates NO<sub>3</sub>) sous forme gazeuse (N<sub>2</sub> ou N<sub>2</sub>O) qui permet une élimination de l'azote minéral de l'eau en direction de l'atmosphère. Ce processus se produit principalement en absence d'oxygène, dans les sols saturés en eau des zones humides, les berges, les sédiments.

La station de Vuillafans, suivie uniquement jusqu'en 2019, présente une assez forte dispersion des concentrations en nitrates. Si des valeurs proches de 10 mg NO<sub>3</sub>/L peuvent être obtenues au plus fort des crues automnales, les concentrations sont particulièrement faibles en période estivale, proche du seuil de quantification de 0,5 mg NO<sub>3</sub>/L. Sur la période de suivi commune, les concentrations sont globalement plus faibles que celles mesurées au niveau de la source de la Loue à Ouhans, traduisant une possible dilution par les nombreuses afférences renforçant le débit de la Haute-Loue (sources de Moulin Miguët, Baume Archée, Bief Poutot, Grand Bief...). L'hypothèse la plus vraisemblable est celle d'une importante auto-épuration du cours d'eau sur ses premiers kilomètres, se traduisant entre autres par de fortes productions algales (Degiorgi *et al.*, 2019).

La station de la Loue à Chenecey-Buillon, en fermeture du bassin strictement karstique, présente la concentration moyenne (6,08 mg NO<sub>3</sub>/L) et le percentile 90 (9,67 mg NO<sub>3</sub>/L) les plus élevés parmi les stations suivies. La distribution des concentrations fait également état de différences au niveau des valeurs extrêmes. **Les valeurs maximales enregistrées sur les stations étudiées sont en effet voisines de 10 mg NO<sub>3</sub>/L, hormis pour la station de la Loue à Chenecey-Buillon. Sur cette dernière, les concentrations sont susceptibles d'atteindre jusqu'à 25 mg NO<sub>3</sub>/L lors des épisodes hydro-climatiques les plus propices au transfert des nitrates des sols vers les eaux superficielles.**

Sur la période allant de septembre 2016 à septembre 2021, les maximales mesurées à Chenecey-Buillon sont en effet atteintes début décembre 2018 (période où les 5 stations étaient encore suivies), lors des premières pluies et hausses de débit significatives succédant à une période de sécheresse estivale et automnale très sévère. Ce niveau de concentration avait déjà été observé à Chenecey-Buillon à la suite de la sécheresse de 2003 (*cf.* § 2.1.1.1). L'absence de tels pic sur les autres stations suggère que le stock d'azote lessivable présent dans les sols du sous-bassin d'alimentation de la Loue située entre Vuillafans et Chenecey-Buillon est plus conséquent que sur les autres bassins et/ou que les transferts y sont plus rapides. Le stock d'azote lessivable est en effet un des principaux facteurs de contrôle du transfert des nitrates vers les cours d'eau (Tournebize *et al.*, 2008).

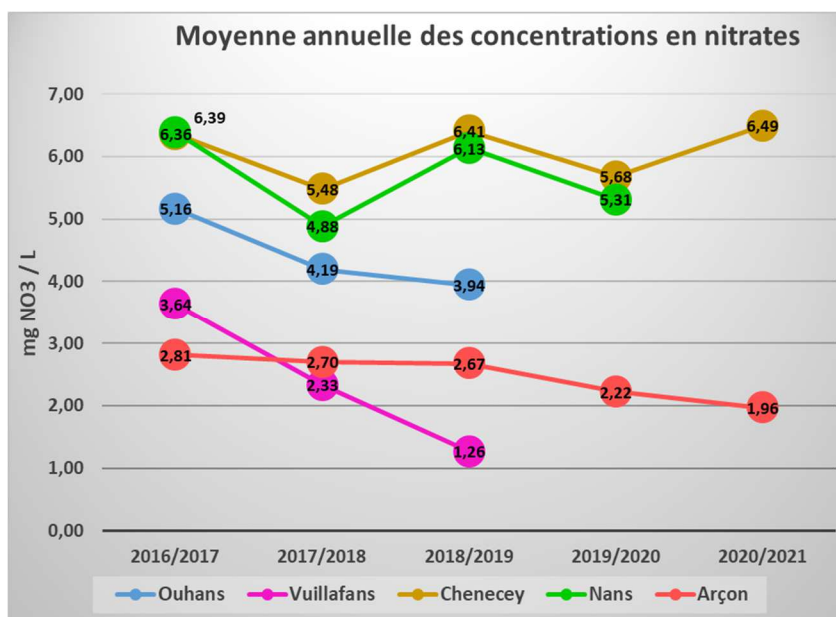


Figure 12 : Moyenne annuelle des concentrations en nitrates sur les 5 stations Quarstic

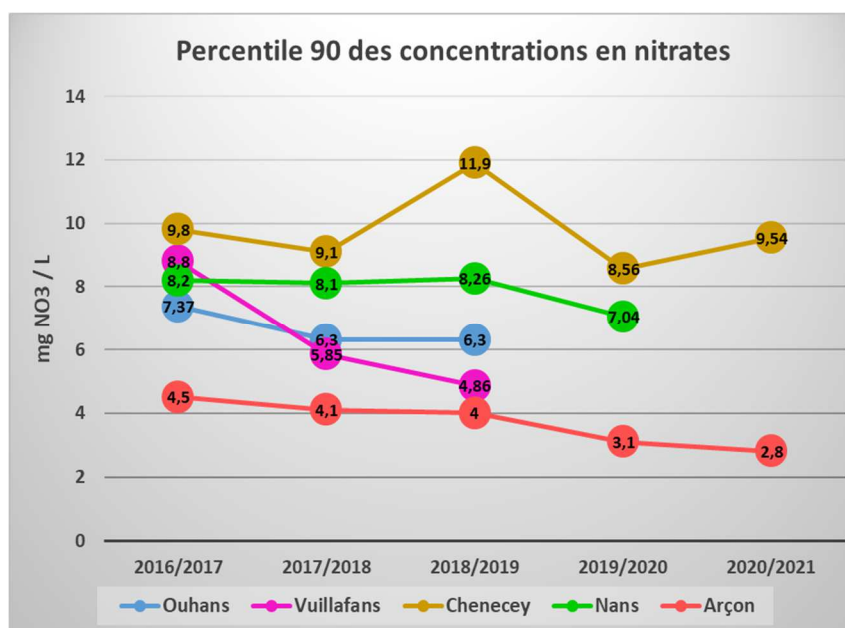


Figure 13 : Percentile 90 des concentrations en nitrates sur les 5 stations Quarstic

Le détail de l'évolution temporelle des descripteurs synthétiques (Figure 12 et Figure 13), disponibles pour 5 cycles hydrologiques consécutifs à Arçon et Chenecey-Buillon, apporte quelques informations complémentaires. D'une part si des variations interannuelles des descripteurs sont observées, le positionnement des stations les unes par rapport aux autres reste globalement similaire. Les différences de niveau de charge en nitrates entre les stations semblent ainsi liées à des facteurs propres à chaque sous-bassin (charge en azote, propension des sols et du sous-sol aux transferts rapides...) dont les effets sont persistants.

La variabilité interannuelle des conditions hydro-climatiques ne conduit en effet pas à un changement de la hiérarchie des stations. Au contraire, lors des années particulières comme le cycle hydrologique 2018/2019 influencé par une sécheresse estivale et automnale et une reprise tardive des forts débits, l'écart entre les stations semble s'accroître. Les deux stations les plus affectées, la Loue à Chenecey-Buillon et le Lison à Nans-sous-Sainte-Anne voient leur concentration moyenne progresser par rapport à l'année hydrologique précédente (ainsi que le percentile 90 pour Chenecey-Buillon, en lien avec les pics de décembre 2018 évoqués précédemment). A l'inverse, le cycle hydrologique 2018/2019 ne conduit pas à une hausse des indicateurs sur la Loue à Ouhans et Vuillafans et sur le Doubs à Arçon.

Plus largement, pour les stations suivies sur 5 cycles hydrologiques, Chenecey-Buillon et Arçon, les indicateurs restent pour chacune d'entre elles dans une gamme de concentration comparable, et il est délicat d'aller plus loin dans la caractérisation de l'évolution temporelle. En effet, au vu de l'importante variabilité interannuelle naturelle des concentrations, la durée de suivi reste malgré tout modeste pour tirer des conclusions quant à une évolution des concentrations et des apports de nitrates.

Que ce soit au niveau du bruit de fond de la concentration en nitrates, caractérisé par les moyennes annuelles, ou au niveau des valeurs extrêmes, la partie aval de la zone d'étude dont la station de Chenecey-Buillon est intégratrice, apparaît comme la plus touchée par les apports

en nitrates, ce que corrobore l'approche spatiale sur les flux. Il convient ensuite de s'intéresser à la traduction de ce phénomène en termes de classes de qualité.

### 3.2.2 Des concentrations supérieures aux seuils naturels

Une première approche consiste à comparer la répartition des données pour les stations au sein des différentes classes d'état écologique fixés par l'arrêté du 25 janvier 2010 modifié<sup>9</sup> en application de la Directive Cadre Européenne (DCE) sur l'eau (Figure 14).

Il apparaît que pour le Doubs à Arçon, la totalité des mesures sont inférieures à 10 mg NO<sub>3</sub>/L et assimilées à la classe « très bon état » pour les nitrates selon l'arrêté en vigueur, et pour les stations de la Loue à Ouhans et Vuillafans et du Lison à Nans-sous-St-Anne, ce sont plus de 99% de mesures qui se situent dans la gamme de « très bon état » au sens de la DCE. Sur la Loue à Chenecey-Buillon, ce sont 92,5% de résultats qui se situent dans la classe de « très bon état » au sens de la DCE.

Sur les stations étudiées, le percentile 90, indicateur retenu pour les appréciations réglementaires, est donc non seulement inférieur à 10 mg NO<sub>3</sub>/L et situé dans la gamme de « très bon état », mais est, *de facto*, inférieur à 18 mg NO<sub>3</sub>/L soit la limite retenue pour considérer une masse d'eau superficielle comme subissant ou susceptible de subir une eutrophisation et la définir comme une zone vulnérable en application de la directive Nitrates<sup>10</sup>.

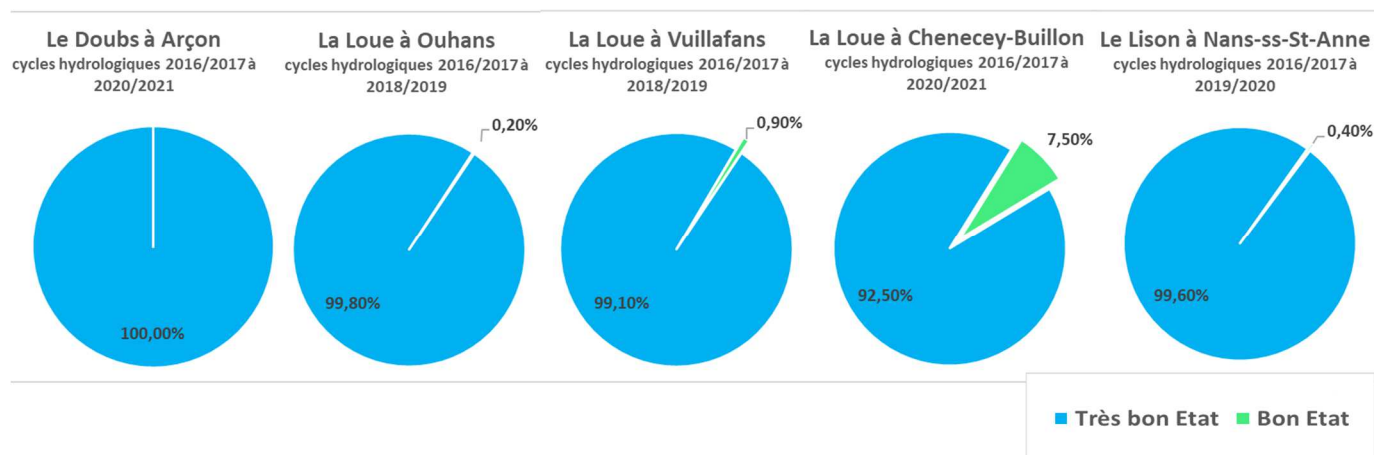


Figure 14 : Répartition des mesures de nitrates sur les stations selon les classes d'état DCE de l'arrêté du 25 janvier 2010 modifié

**L'atteinte de ce « très bon état » au sens réglementaire pour les nitrates semble toutefois peu pertinente, notamment au vu des proliférations algales régulièrement comprises entre 50 et 100% de recouvrement en étiage sur la Loue (Degiorgi *et al.*, 2018) et des observations**

<sup>9</sup> Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement

<sup>10</sup> Directive européenne n° 91/676/CEE du 12 décembre 1991, dénommée « directive Nitrates », vise à protéger les eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole

de terrain effectuées dans le cadre du réseau Quarstic (passage d'un technicien de l'EPAGE Haut-Doubs Haute-Loue à fréquence hebdomadaire).

Ce constat de colmatage algal, manifestation visible de l'eutrophisation - malgré des concentrations en nitrates inférieures à la valeur de 10 mg NO<sub>3</sub>/L indiquées par la DCE comme seuil du très bon état - a déjà été mis en exergue dans les travaux de l'Université de Franche-Comté relatifs aux proliférations végétales sur le cours de la Loue (Degiorgi *et al.*, 2018).

La littérature scientifique confirme que des concentrations en azote relativement faibles sont susceptibles d'induire des proliférations végétales, indépendamment des valeurs en phosphore. A l'initiative de l'EPAGE Haut-Doubs Haute-Loue, une synthèse bibliographique sur les cours d'eau karstiques à l'échelle internationale a été réalisée par l'université de Bourgogne Franche-Comté (Degiorgi & Badot, 2022). Elle propose notamment des concentrations maximales admissibles en nitrates à partir desquelles des perturbations peuvent apparaître. Ces concentrations maximales s'entendent comme des percentiles 90 issu de chroniques de données permettant de prendre en compte la variabilité inter et intra annuelle des processus écologiques et des concentrations en nitrates.

	Concentrations maximales admissibles en nitrates (mg NO <sub>3</sub> /L)
Haut Doubs	2,5
Haute Loue/ Basse Loue/ Lison	3,5

Tableau 2 : Concentrations maximales admissibles proposées par Degiorgi et Badot (2022)

Ces auteurs distinguent par ailleurs les concentrations maximales sur la partie amont du Haut-Doubs (zone à truite supérieure) des concentrations maximales admissibles sur la Haute et moyenne Loue et le Lison (zone à truite moyenne et à ombre). Sur ces derniers secteurs, les eaux sont naturellement plus minéralisées et les capacités d'assimilation et de transfert trophique sont plus conséquentes.

Lorsque l'on considère ces seuils (Figure 15), plus en adéquation avec la sensibilité des cours d'eau karstiques du massif jurassien, **il apparaît que les valeurs repères sont dépassées par une large majorité des mesures sur le Lison à Nans-sous-St-Anne ainsi que sur la Loue à Ouhans et Chenecey-Buillon. A Arçon et Vuillafans la proportion de mesures supérieures à la gamme attendue reste également notable.**

La situation contraste donc totalement avec celle perçue par le prisme de la DCE. D'après cette analyse, il est ainsi plus aisé de comprendre pourquoi les cours d'eau suivis sont impactés par le colmatage algal malgré des concentrations qui sont, notamment à Arçon, largement inférieures aux seuils règlementaires.

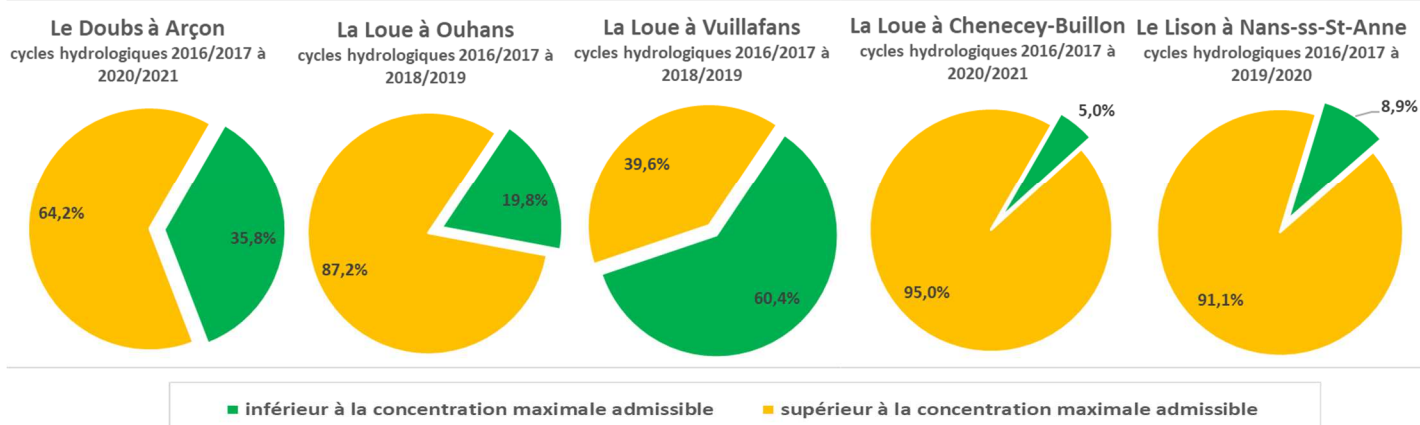


Figure 15 : Répartition des mesures de nitrates sur les stations en regard des concentrations maximales admissibles proposées par Badot et Degiorgi (2022)

La Figure 16 permet de situer des descripteurs des données, comme la moyenne et le percentile 90 par rapport à la gamme de concentration à partir de laquelle les symptômes de l'eutrophisation peuvent se manifester.

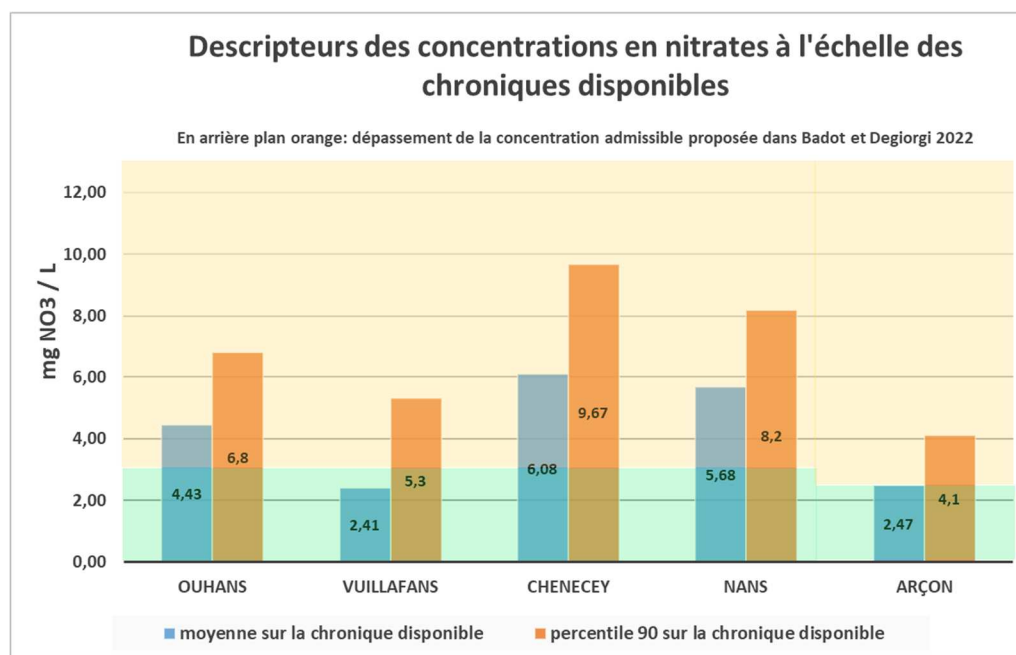


Figure 16 : Descripteurs synthétiques des résultats annuels pour chaque station : moyenne et percentile 90

Sur la Loue à Chenecey-Buillon où le Lison à Nans-sous-Sainte-Anne, la concentration moyenne sur l'ensemble de la chronique disponible est de l'ordre de 2 fois supérieure à la valeur proposée comme seuil naturel haut. Si cette moyenne s'approche ou se situe au niveau de la gamme de concentration attendue pour les stations de la Loue à Ouhans et Vuillafans et du Doubs à Arçon, ce n'est pas le cas du percentile 90 qui demeure sensiblement supérieur. Les valeurs hautes atteintes sur ces stations restent donc susceptibles de contribuer à l'eutrophisation des cours d'eau étudiés.

## 4 Conclusions et perspectives

Le déploiement d'un réseau de suivi comme Quarstic procède d'un objectif ambitieux, celui de mieux comprendre les (dys)fonctionnements d'une rivière mythique mais malade, la Loue. Aussi et après plus de cinq ans de suivis, des constats forts peuvent être posés, tels :

- la présence d'une surcharge azotée et ce sur tout le bassin. Si les concentrations peuvent être considérées comme modérées, elles dépassent quasi systématiquement les seuils admissibles et sont largement suffisantes pour générer des phénomènes d'eutrophisation importants préjudiciables aux milieux ;
- la forte variabilité temporelle avec des fluctuations saisonnières des concentrations de nitrates largement contrôlée par l'hydroclimatologie. Les différences entre les concentrations de NO<sub>3</sub> en fin de période d'étiage et lors des crues de reprise témoignent du rôle prépondérant du karst qui permet les lessivages depuis les plateaux vers les fonds de vallée ;
- la forte variabilité spatiale également avec une opposition marquée entre les flux calculés entre les secteurs en amont et les parties plus en aval. Contraste qui s'explique par une différence en termes de pratiques agricoles avec un constat simple, plus la proportion occupée par les surfaces agricoles transformées est importante plus les flux d'azote sont conséquents.

Ces résultats seront prochainement complétés par l'intégration de deux cycles hydrologiques supplémentaires (2021/2022 et 2022/2023), et feront l'objet d'une mise à jour du document prévue début 2024. Un bilan du réseau de mesure sera alors établi afin de pourvoir statuer sur son devenir.

Les observations d'ores et déjà effectuées permettent de circonscrire un peu plus les problèmes de la Loue dans le temps et dans l'espace mais le seul paramètre nitrates ne peut évidemment pas expliquer l'ensemble des dysfonctionnements observés. Concernant les nutriments, les paramètres phosphorés présentent également des surabondances, certes plus ponctuelles, mais révélatrices d'une contamination diffuse comme en attestent les résultats du programme atelier Loue ou du suivi de qualité des cours d'eau mené annuellement par le Département (Degiorgi et Badot 2020, CD-EAU Environnement 2022). Le cours d'eau est, de plus, impacté par un ensemble de substances chimiques (HAP, produits phytosanitaires et biocides à usage vétérinaire), retrouvées dans les matrices du cours d'eau (eau, sédiments, MES, chair des poissons)(Degiorgi et Badot 2020). Ces perturbations s'inscrivent par ailleurs dans un contexte défavorable, avec des milieux déjà dégradés morphologiquement et qui subissent désormais des tensions de plus en plus fréquentes liées à la raréfaction de la ressource en eau.

Les constats effectués sont particulièrement préoccupants et témoignent d'une forte altération du fonctionnement de l'hydrosystème dans son ensemble.

En termes de connaissance relative à l'eutrophisation des cours d'eau du bassin de la Loue et plus largement du massif jurassien, plusieurs programmes de recherches et étude sont en cours portées par le BRGM ou les EPAGE Haut-Doubs Haute-Loue et Doubs-Dessoubre afin de mieux comprendre l'impact des différentes pratiques agricoles et la dynamique de transfert de



nutriment, définir les flux admissibles au sein des bassins-versants, mais également intégrer aux réflexions une dimension prospective quant à l'évolution de la ressource en eau.

La poursuite des actions de connaissances pourrait également porter sur une mise en perspectives des résultats obtenus sur le bassin de la Loue. Il conviendrait notamment d'effectuer un travail de synthèse sur l'évolution des concentrations en nitrates d'autres grands cours karstiques à l'échelle nationale.

## 5 Bibliographie

- Charlier J.B. et Vallet A. (2016). *Projet Quarstic : QUALité des eaux et Réseau de Surveillance des rivières Comtoises*. Rapport de fin de 1ère année. BRGM/RP-65874-FR, 24p
- Charlier J. B., Vallet A., Hevin G., Moiroux F., (2018) – *Projet QUARSTIC : QUALité des eaux et Réseau de Surveillance des rivières Comtoises*. Rapport final. BRGM/RP-68315-FR, 165p.
- Charlier, JB., Vallet, A., Tourenne, D., Hévin, G. (2020). Dynamics and Fluxes of Nutrients in Surface and Groundwaters in a Cultivated Karstic Basin in the Jura Mountains. In: Bertrand, C., Denimal, S., Steinmann, M., Renard, P. (eds) Eurokarst 2018, Besançon. Advances in Karst Science. Springer, Cham.
- CD-EAU Environnement (2022). *Suivi de la qualité des milieux aquatiques du département du Doubs, année 2021*. Rapport annuel du réseau de mesure sous maîtrise d’ouvrage du Département. 173 p.
- Degiorgi F., Benoist J., Bolard A., et Badot P.M. (2018). *Étude de l’état de santé des rivières karstiques en relation avec les pressions anthropiques sur leurs bassins versants. Rapport de la tranche 2B Suivi de la nature et de la dynamique des proliférations végétales*. Université de Franche-Comté, 55 p.
- Degiorgi F., Bolard A., Ducrot A., Benoist J., Chanez E., Decourcière H. et Badot P.M. (2019). *Étude de l’état de santé des rivières karstiques en relation avec les pressions anthropiques sur leurs bassins versants. Rapport de la tranche 3 et synthèse Volet « Capacités biogènes de la Loue et de ses affluents »*. Université de Franche-Comté, 91 p.
- Degiorgi F. et Badot P.M. (2020). *Étude de l’état de santé des rivières karstiques en relation avec les pressions anthropiques sur leurs bassins versants. Rapport de la tranche 3 « Bilan synthétique des opérations réalisées et des recherches et analyses effectuées et disponibles »*. Université de Franche-Comté, 47 p..
- Degiorgi F. et Badot P.M. (2022). *Détermination des concentrations et flux admissibles sur les cours d’eau du bassin Haut Doubs Haute Loue. Identification et synthèse de la littérature scientifique existante*. Université de Franche-Comté, 116 p.
- Le Mesnil M., J.-B. Charlier, R. Moussa, Y. Caballero (2022). Investigating flood processes in karst catchments by combining concentration-discharge relationship analysis and lateral flow simulation. *Journal of Hydrology*, 605, 127358.
- Minaudo C. et Moatar F. (2018). *Méthodes pour le calcul des flux d’azote et de phosphore à l’échelle annuelle ou saisonnière lorsqu’on n’a pas ou peu de données dans les cours d’eau*. Université de Tours/OFB, 35p.
- Moatar F. et Meybeck M. (2005). Compared performances of different algorithms for estimating annual nutrient loads discharged by the eutrophic River Loire. *Hydrol. Process.* 19, 429–444.

- Nisbet M. et Verneaux J. (1970). Composantes chimiques des eaux courantes. Discussion et proposition de classes en tant que base d'interprétation des analyses chimiques. *Annales de Limnologie*, 6(2) : 161 – 190.
- Pinay G., Gascuel C., Ménesguen A., Souchon Y., Le Moal M. (coord), Levain A., Moatar F., Pannard A., Souchu P. (2018). *L'eutrophisation : manifestations, causes, conséquences et prédictibilité*. Synthèse de l'Expertise scientifique collective CNRS - Ifremer - INRA - Irstea (France), 148 pages.
- Tournebize J., Arlot M.P., Billy C., Birgand F., Gillet J.P. et Dutertre A. (2008) Quantification et maîtrise des flux de nitrates : de la parcelle drainée au bassin versant. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, Lavoisier ; IRSTEA, pp.5-25.