



RAPPORT PUBLIC  
2022 → 2025

BILAN DE 3 ANNÉES  
D'ENQUÊTE  
AU FIL DE LA LOIRE

---

# Loire Sentinelle *un fleuve, une santé*

## SOMMAIRE

page 12

### Partie 1 • ADNe



Prendre la mesure de tout un peuple

page 32

### Partie 2 • Microplastiques



Rendre visible une pollution invisible

page 50

### Partie 3 • Dénouement



Soigner nos relations aux cours d'eau

## NOTES

→ Dans un souci de transparence, nous déclarons n'avoir aucun lien d'intérêt concernant les données publiées dans ce rapport, ni avoir eu recours à l'intelligence artificielle pour sa réalisation.

→ De par la composition (8 femmes et 4 hommes) et la démarche inclusive de notre collectif, nous avons pris le parti d'écrire les noms génériques au féminin avec un point médian – une recherche qui, comme l'écrit l'autrice brésilienne Eliane Brum, « répond à la nécessité d'utiliser un autre langage pour accueillir d'autres vies et créer d'autres mondes. »

RAPPORT PUBLIC  
2022 → 2025

BILAN DE 3 ANNÉES  
D'ENQUÊTE  
AU FIL DE LA LOIRE

Si vous tenez ce rapport entre vos mains, c'est que vous tenez à la Loire.

À sa lecture, il vous apparaîtra que l'inverse est tout aussi vrai : la Loire *nous tient*, littéralement. Elle nous *tient en vie*, nous hydrate, nous nourrit. Elle nous *tient en haleine* quand elle déborde ou s'assèche. Elle nous *tient en alerte* quand ses tourments reflètent ceux de nos sociétés riveraines.

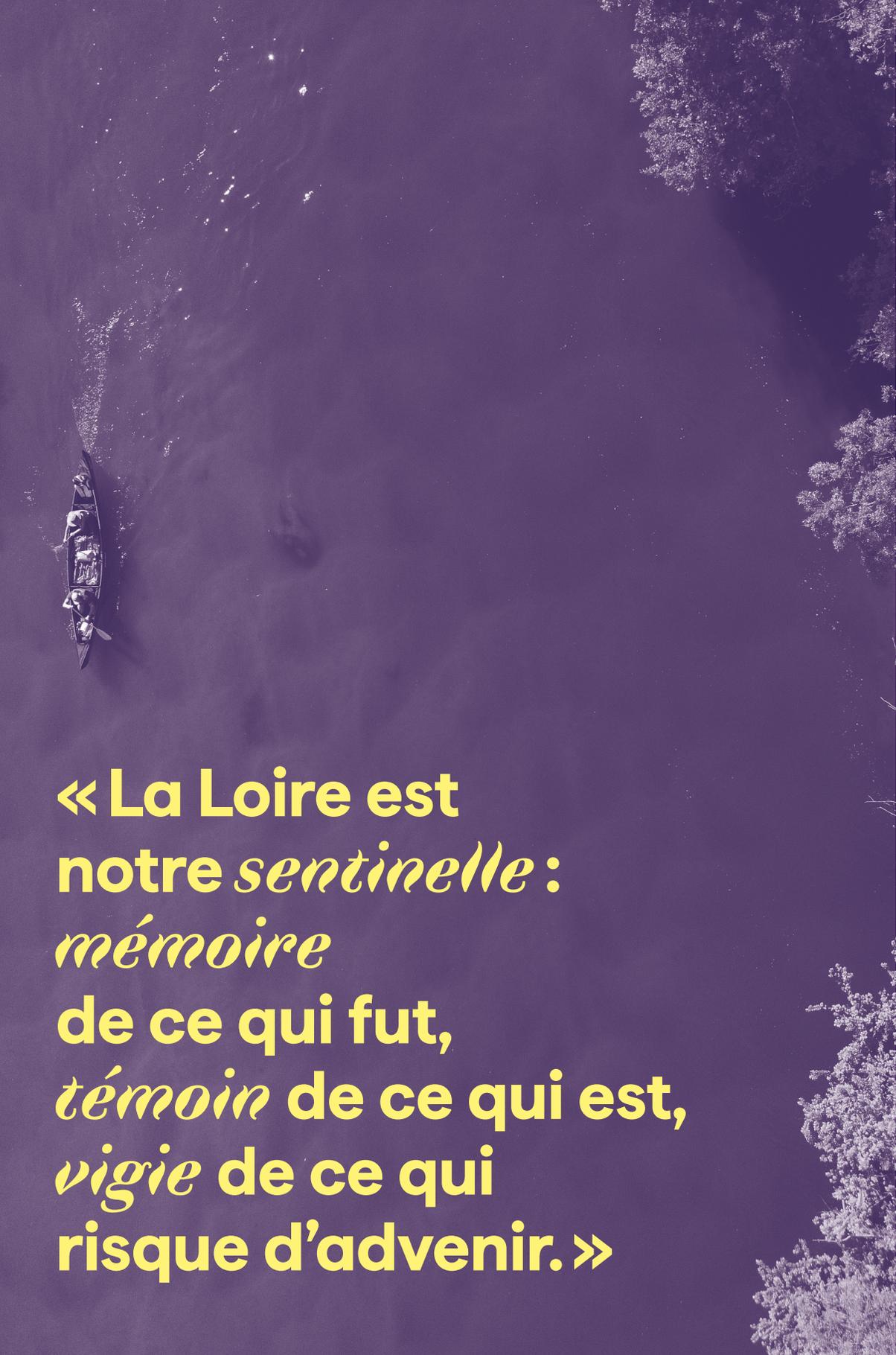
Que signifie concrètement cette « santé en partage » entre un écosystème – la Loire – et ses habitant-es ? Si la Loire est contaminée en microplastiques, nous le sommes également ; si sa biodiversité s'amointrit, nous nous amoindrissions aussi ; si son état écologique est menacé, notre état de santé l'est tout autant.

Cette interdépendance irrigue le présent rapport. Comme la responsabilité qui nous incombe de prendre soin de la Loire, ce territoire où tout circule et tout est connecté, où il n'y a pas de frontière étanche entre notre santé et celle des milieux qui nous accueillent, mais un monde commun et des vulnérabilités partagées. « Nous sommes le fleuve, le fleuve est nous. »

« Ici se pose une question qui nous permet d'avancer : qui serait prêt à "mourir pour elle" ? Qui irait jusqu'à dire : " Cette vie de Loire est liée à notre vie ", à l'instar des maoris le long de la Whanganui ? »

Bruno Latour, lors des auditions du parlement de Loire

# Loire Sentinelle un fleuve, une santé



**« La Loire est  
notre *sentinelle* :  
*mémoire*  
de ce qui fut,  
*témoin* de ce qui est,  
*vigie* de ce qui  
risque d'advenir. »**

# Préambule

## La Loire est tout un monde.

Un fleuve qui étire son cours sur plus de mille kilomètres. Un réseau hydrologique, appelé bassin versant, dont les eaux innervent l'équivalent d'un cinquième du territoire hexagonal. Une continuité écologique qui relie amont et aval, montagne et plaine, terre et océan. Un écosystème d'une grande diversité et complexité, faisant face à des pressions multiples (industrielles, agricoles, urbaines, touristiques...). Un anthroposystème profondément marqué par une implantation plus que millénaire le long de ses rives. La Loire est tout cela à la fois : un monde fait d'autres mondes.

Ces mondes ligériens, nous sommes une dizaine – scientifiques, artistes, journalistes, auteur-es – à y tremper régulièrement nos pieds et nos pagaies, y collecter paroles, eaux et sédiments, y rencontrer habitant-es humain-es et autres qu'humain-es, et à les raconter sous des formes multiples.

Ce rapport est l'une d'entre elles. Une forme de bilan après trois années d'enquête menées au fil de la Loire, de 2022 à 2025. Une forme de confluence entre les champs de la recherche, de la création et de l'action. Une forme d'exploration de versants invisibles du fleuve : celui des traces ADN *laissées* par tous les vivants, et celui des microplastiques *délaissés* par les seuls humains.

Des sources à l'estuaire, de l'ADN environnemental aux microplastiques, c'est une « Loire mosaïque » que nous vous invitons à découvrir au fil de ces pages. Un fleuve qui fonde le monde dans lequel nous vivons. L'emplis d'histoires. Réunit toute une communauté composée de diatomées et de ciliés, de poissons et d'oiseaux migrateurs, de bivalves et de cyanobactéries, autant que d'humaines et d'humains. Un fleuve qui nous alerte, à sa manière, sur les bouleversements en cours et à venir.

**Car la Loire est notre « sentinelle » : mémoire de ce qui fut, témoin de ce qui est, vigie de ce qui risque d'advenir.**

# Loire Sentinelle, un *observatoire* de la vie du fleuve

**La Loire change, et change de plus en plus rapidement. Mais elle n'est pas la seule : l'attention et le regard que nous lui portons s'en trouvent également, et définitivement, transformés.**

Développer ce « nouveau regard », c'est apprendre à voir autrement un fleuve que nous pensons si bien connaître. C'est *opter* pour d'autres formes d'exploration et *adopter* de nouveaux outils de visualisation (scientifiques, artistiques, habitants...) qui donnent à voir des mondes, pas seulement inconnus, mais également invisibles – comme ceux de l'ADN environnemental (ADNe) ou des microplastiques (MP).

**Explorer la Loire pour mieux la comprendre et la défendre.** Voilà ce que propose le projet de recherche-action-création Loire Sentinelle, par l'étude de la biodiversité<sup>1</sup> et de la plasticodiversité<sup>2</sup> à l'échelle du fleuve et le dialogue permanent entre savoirs, pratiques et sensibilités.

Au travers de cette enquête au long cours, qui se déploie au fil des saisons et dans différents territoires ligériens, entre collectes de terrain et analyses en laboratoire, création et éducation, Loire Sentinelle cherche à répondre à un double enjeu : **prendre la mesure** de l'état de santé de la Loire ; **comprendre les mesures** nécessaires pour soigner notre relation au fleuve.

**Projet hybride par vocation, Loire Sentinelle navigue à la confluence des sciences, des arts et de la médiation.**

## NOTES

**1** • La biodiversité peut être définie comme le « tissu vivant de la planète ». Elle s'organise en quatre niveaux enchevêtrés et interdépendants : la diversité des écosystèmes, des espèces, des populations et des gènes.

**2** • La plasticodiversité est un néologisme désignant les plastiques dans toute leur diversité de formes et de couleurs, de propriétés physiques et de compositions chimiques, d'effets sur la santé des milieux et des organismes.

## La base flottante

→ Prendre le pouls du fleuve et des activités qui y prennent place

## La résidence flottante

→ Faire émerger une culture vivante du fleuve

## La médiation au fil de l'eau

→ Relier nos modes de vie à la vie fleuve

La « Base flottante » vise à collecter et partager des données nouvelles sur les interactions complexes entre les activités humaines et la vie du fleuve. Par l'étude de la biodiversité (via l'**ADN environnemental**) et de la contamination plastique (via les **microplastiques**) sur l'ensemble de son continuum, il s'agit de **contribuer à l'évaluation de l'état de santé de la Loire** et, par extension, de nos relations avec elle.



**ADNe, les vivants de Loire révélés**

**Objectif :** inventorier, surveiller et veiller sur la biodiversité ligérienne



**Microplastiques, nos modes de vie révélés**

**Objectif :** comprendre l'origine, le devenir et l'impact des microplastiques en Loire

La « Résidence flottante » invite des artistes et auteur-es à partir du terrain pour interroger la Loire, dans un rapport vécu et quotidien au fleuve. Une démarche originale **où les arts et les sciences se vivent, se font et se partagent ensemble.**

Au fil des saisons, elle s'anime de questions multiples et mouvantes : que va devenir la Loire et nous avec ? Comment tisser de nouvelles solidarités entre amont et aval ? Comment œuvrer à une culture du fleuve et de son bassin versant ?

## CRÉATION

→ **Documentaires** sonores et audiovisuels

→ **Reportages** écrits, dessinés, photographiques

→ **Contributions** dans la presse et l'édition

→ **Expositions**

→ **Podcasts**

La « Médiation au fil de l'eau » propose à des publics variés de **découvrir la Loire autrement** – la Loire en tant que fleuve, bassin versant et milieu de vie essentiel à ses habitants humains et autres qu'humains. Nourrie des travaux de la Base et de la Résidence flottante, cette pédagogie plurielle invite à repenser nos modes de vie depuis la Loire.

## PÉDAGOGIE

→ **Jeune public :** ateliers d'éducation scientifique, artistique et culturelle

→ **Grand public :** conférences, stands, balades, diffusions

→ **Outils de médiation :** malle pédagogique, jeu de plateau, émission radio *in situ*

→ **Contenus web :** articles, carnets de bord, ressources en ligne

# Loire Sentinelle, un écosystème d'acteurs

**Le projet Loire Sentinelle réunit un ensemble d'acteurs des mondes scientifique, artistique, culturel, éducatif et associatif autour d'une ambition commune : apprendre de la Loire pour mieux vivre avec.**

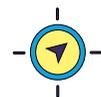
## → Structure porteuse

**NATEXPLOREERS** œuvre à la confluence de l'exploration, des sciences et de la culture du vivant. Fondée en 2015 par les biologistes et médiatrices scientifiques Barbara Réthoré et Julien Chapuis, elle est hébergée au sein de la coopérative angevine CDP49 et est à l'initiative du projet de recherche-action-création Loire Sentinelle.



## → Associations engagées

Deux associations contribuent à la création d'outils pédagogiques et à l'animation d'ateliers, là où les publics se trouvent – sur leurs lieux de vie, dans les établissements scolaires, en bord de Loire... Elles facilitent également l'accueil des artistes et auteurs-es en résidence.



### **REPORT'CITÉ**

Éducation aux médias  
– Angers



### **CONSERV-ACTION**

Éducation au vivant  
– Mauges-sur-Loire



### **BIOSSE – Ecotoxicologie**

Effets de l'exposition aux contaminants sur la santé  
– Angers



### **LEE – Chimie environnementale**

Évaluation de la pollution plastique dans le continuum terre-mer  
– Nantes



### **SPYGEN – ADN environnemental**

Inventaire de la biodiversité basé sur l'étude de l'ADNe  
– Le Bourget-du-Lac

## → Collectif arts-sciences

Entre 2022 et 2025, 10 artistes, auteurs-es et journalistes se joignent régulièrement aux « résidences embarquées » et participent de la démarche de recherche-action-création portée par Loire Sentinelle.



**Clara Arnaud**  
Autrice



**Tiphaine Crézé**  
Journaliste



**Aurélie Calmet**  
Dessinatrice



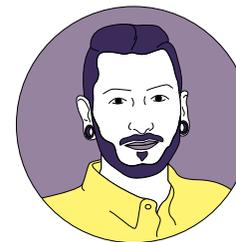
**Amélie Patry**  
Céramiste



**Laure Bourru**  
Réalisatrice  
documentaire



**Jean-Félix Fayolle**  
Photographe



**Julien Chapuis**  
Biologiste,  
membre fondateur



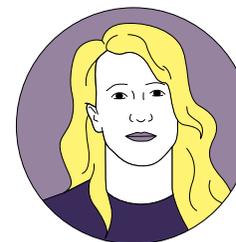
**Barbara Réthoré**  
Biologiste,  
membre fondatrice



**Marielle Macé**  
Chercheuse,  
essayiste



**Sébastien Rochard**  
Journaliste



**Sarah Pellerin-Ott**  
Danseuse,  
chorégraphe

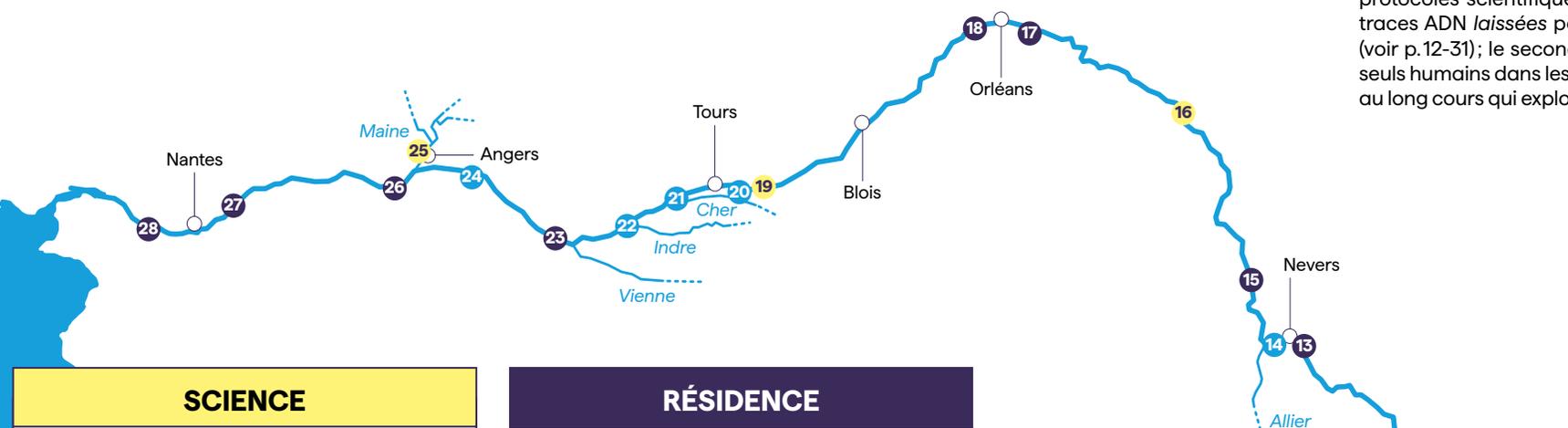


**Clément Vuillier**  
Auteur-illustrateur

# Retour aux sources, la Grande Descente

De mai à juillet 2022, du pied du mont Gerbier-de-Jonc aux portes de l'Atlantique, un collectif composé de scientifiques, d'artistes et d'auteur-es descend le cours intégral de la Loire pour sonder son état de santé.

À bord de leurs «canoës laboratoires», ils embarquent notamment deux protocoles scientifiques d'un nouveau genre: le premier, pour détecter les traces ADN laissées par tous les êtres vivants et ainsi révéler leur présence (voir p. 12-31); le second, pour collecter les microplastiques délaissés par les seuls humains dans les eaux et sédiments de Loire (voir p. 32-49). Une enquête au long cours qui explore la face invisible de la Loire et livre ici ses conclusions.



## SCIENCE

**28**  
SITES  
D'ÉTUDE  
tout au long  
de la Loire

**2**  
NOUVEAUX  
INDICATEURS  
de la santé des cours  
d'eau: ADNe  
& Microplastiques

**3**  
CONTRIBUTEURS  
MAJEURS  
centres urbains,  
affluents, barrages

**3**  
LABORATOIRES  
PARTENAIRES  
BIOSSE, LEE  
SPYGEN

**176**  
ÉCHANTILLONS  
d'eau  
et de sédiment

→ ADNe:  
**36** prélèvements  
→ Microplastiques:  
**140** prélèvements

## RÉSIDENCE

**6**  
ARTISTES,  
AUTEUR-ES  
ET JOURNALISTES  
embarqué-es  
→ Dessinatrice  
→ Réalisatrice  
→ Journaliste  
→ Photographe  
→ Écrivaines

**90**  
JOURS  
DE RÉSIDENCE  
cumulés

**50**  
HEURES  
DE VIDÉOS ET  
SONS collectées

**10**  
ESCALES-  
RENCONTRES  
avec les  
ligérien-nes

**3**  
CARNETS  
DE DESSIN  
remplis

## → La Grande Descente

Première d'une série d'expéditions et d'enquêtes de terrain imaginées à l'échelle du bassin versant, la « Grande Descente » vise à dresser une **cartographie inédite de la biodiversité et de la contamination plastique à l'échelle d'un fleuve européen.**

**CARTOGRAPHIE DE LA LOIRE** et des sites échantillonnés lors de la Grande Descente

- Site «ADN environnemental»
- Site «Microplastiques»
- Site «ADN environnemental + Microplastiques»

■ Grand barrage

## ITINÉRANCE

**1000**  
KILOMÈTRES  
PARCOURUS  
des sources  
à l'estuaire  
→ 100 km  
à pied  
→ 900 km  
en canoë

**3**  
MOIS D'ITINÉRANCE  
et 60 nuits  
de bivouac

**200**  
KILOS DE MATÉRIEL  
ET PROVISIONS  
transportés

**2**  
CANOËS  
et 2 surnoms gagnés  
en route:  
*Rustine* et *Scubi*

**3**  
KILOS DE TOMATES  
SÉCHÉS  
consommés

# Retour vers le futur

Chaque année, d'amont en aval,  
d'aval en amont, le collectif Loire  
Sentinelle « met les pieds dans  
le milieu » et embarque les publics  
dans un nouveau voyage.

## La Marche de l'eau • 2023

1<sup>er</sup> → 9  
juillet



### synopsis

Une semaine de marche sur la question du partage équitable de l'eau entre Loire et Ardèche, entre les écosystèmes et les usages humains.

### organisation

Association  
SOS Loire Vivante

### documentaire sonore

[www.soundcloud.com/loradiodeslocaux/la-marche-de-leau](http://www.soundcloud.com/loradiodeslocaux/la-marche-de-leau)

Haute-Loire  
→ Ardèche

## La Grande Remontée • 2023

1<sup>er</sup> → 20  
septembre



### synopsis

Une aventure nautique à la fois scientifique, artistique et festive, destinée à mettre en commun les connaissances, savoirs et pratiques liés au fleuve.

### organisation

Associations  
La Rabouilleuse  
et Voiles de Loire

### carnet de bord

[www.livexplorer.com/adventures/la-grande-remontee-2023](http://www.livexplorer.com/adventures/la-grande-remontee-2023)

Nantes  
→ Orléans

## La Petite Descente • 2024

6 → 14  
juillet



### synopsis

Un parcours (petit mais costaud) ponctué de 5 escales à la confluence des sciences, des arts et de la médiation.

### organisation

Natexplorers, dans le cadre des RDV Nature en Anjou

### site internet

[www.natexplorers.fr/loire-sentinelle](http://www.natexplorers.fr/loire-sentinelle)

Montsoreau  
→ Chalonnes

## La Grande Remontée • 2025

1<sup>er</sup> → 23  
septembre



### synopsis

Deux ans après, la Grande Remontée est de retour pour 20 jours de navigation et autant d'escales en bord de Loire.

### organisation

Association  
La Rabouilleuse  
et la Mission Val de Loire

### site internet

[www.lagrande-remontee.fr](http://www.lagrande-remontee.fr)

Saint-Nazaire  
→ Orléans





PARTIE 1



ADNe

---

# Prendre la mesure de tout un peuple

# ADNe, la biodiversité révélée

## Là où les vivants passent, ils laissent des traces.

Certaines sont visibles : empreintes, excréments, dépouilles, mues, marquages... D'autres, invisibles jusqu'alors, sont rendues accessibles par les avancées récentes en génétique et bio-informatique : des traces ADN libérées en continu par les êtres vivants et regroupées sous le terme d'ADN environnemental (ADNe).

C'est un des points communs à tous les êtres vivants : ils laissent dans leur sillage – via leur urine et leurs excréments, leur sang, le renouvellement de leurs cellules ou la décomposition de leur corps – une empreinte génétique, invisible mais détectable, qui témoigne de leur identité (en tant qu'espèce, genre, famille...) et de leur présence (continue ou discontinue, actuelle ou passée) dans un milieu.

Aujourd'hui, il est possible de suivre ces empreintes à partir du simple prélèvement d'une matrice (eau, sol, sédiment...) et de remonter jusqu'aux organismes correspondants, dans une forme de « pistage élargi » aux écosystèmes. C'est le propre de l'ADNe : **détecter des êtres vivants sans les voir, ou avoir à les capturer, et encore moins à les sacrifier.**

Loin d'être inféodée à l'eau douce, où elle trouve ses origines à la fin des années 2000<sup>1</sup>, la méthode d'ADNe continue à se concentrer sur les hydro-systèmes, reflétant la biodiversité aquatique qui y évolue, mais pas seulement... Car depuis peu, on sait que l'ADNe, dans l'eau, porte également de précieuses informations sur les espèces semi-aquatiques et même terrestres qui vivent au contact de l'eau<sup>2</sup>. Elles s'y nourrissent, s'y abreuvent, s'y baignent, y passent, y défèquent, libérant leur ADN et révélant donc leur présence.

L'ADN, « grand ressort de la vie »<sup>3</sup>, est aussi celui du volet *Biodiversité* de l'étude Loire Sentinelle, porté conjointement avec le laboratoire SPYGEN, pré-curseur dans l'inventaire du vivant basé sur l'ADNe. **En 18 points des sources à l'estuaire, et pour la première fois à l'échelle d'un fleuve européen, l'ADN environnemental donne à voir toute la diversité du vivant** – des poissons migrateurs aux mammifères semi-aquatiques comme la loutre ou le castor, en passant par les diatomées, bivalves, bactéries – au travers de 5 analyses complémentaires : « Procaryotes », « Eucaryotes », « Vertébrés », « Poissons » et « Bivalves ».

**En somme : nous cherchons à suivre la piste des vivants pour suivre l'état de santé du fleuve.**

### ILLUSTRATION

← *Micro-organismes*, illustrés par Clément Vuillier (double page précédente)

### NOTES

1 • Fictola et al. « Species detection using environmental DNA from water samples. » *Biology Letters*, 2008.

2 • Coutant et al. « Amazonian mammal monitoring using aquatic environmental

DNA ». *Molecular Ecology Resources*, 2021.

3 • Lynn Margulis et Dorion Sagan. *Microcosmos. 4 milliards d'années de symbiose terrestre*. Wildproject, 2022 (1987).

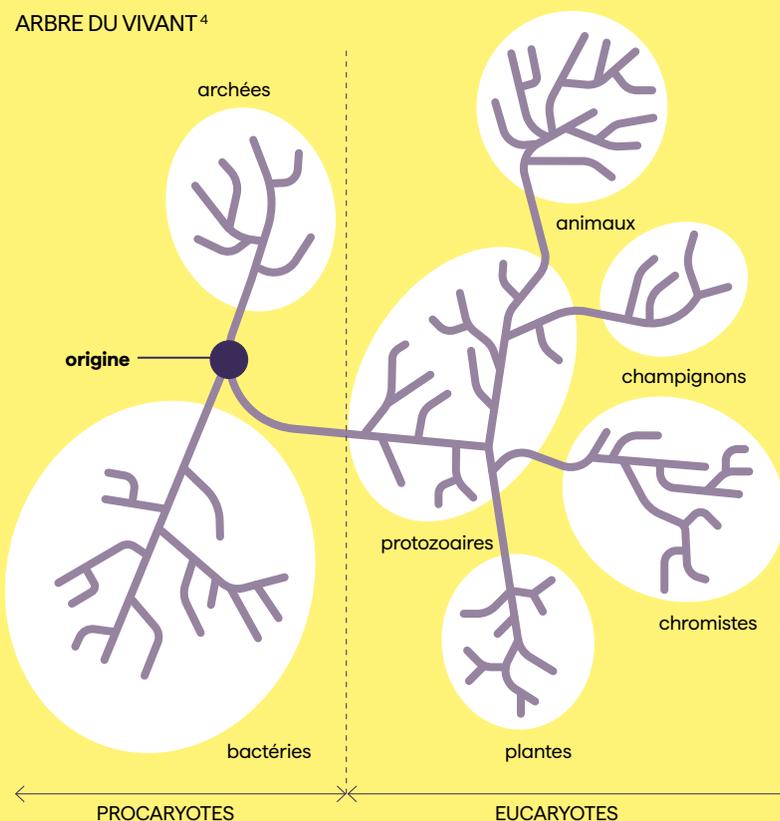
4 • D'après les phylogénies proposées par Cavalier-Smith et la mégaclassification de Ruggiero et al.

## → De quoi parle-t-on ?

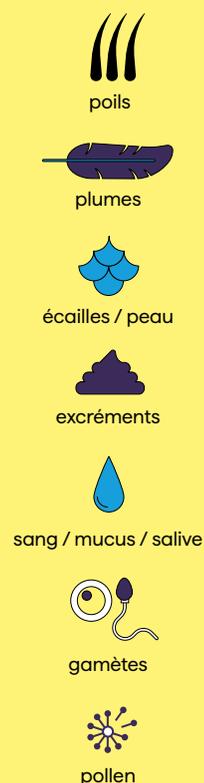
L'ADN (Acide DésoxyriboNucléique) est une molécule présente dans les cellules de tous les êtres vivants. Elle contient toute l'information génétique d'un organisme et renseigne notamment sur son appartenance à une espèce.

La technique d'échantillonnage par ADN environnemental (ADNe) consiste à récupérer les traces génétiques laissées par les organismes vivants dans le milieu, principalement dans l'eau ou le sol, à des fins d'inventaire.

### ARBRE DU VIVANT<sup>4</sup>



### SOURCES potentielles d'ADNe



## → Où en est-on ?



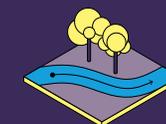
**1987** : première détection de bactéries à partir d'échantillons de sols

**2008** : première détection d'un amphibien à partir d'échantillons d'eau

**2009** : première identification de régimes alimentaires à partir de fèces

**2012** : premiers inventaires de grands groupes vertébrés

**2021** : premier inventaire global de la biodiversité à l'échelle d'un fleuve (Maroni, Guyane)



Dans l'eau, l'ADNe peut être

→ **transporté** sur quelques mètres ou plusieurs kilomètres

→ **détecté** durant quelques jours ou plusieurs semaines

# • L'épopée d'un échantillon

**L'aventure d'un échantillon d'ADN environnemental (ADNe) depuis son prélèvement en Loire jusqu'à son analyse au laboratoire.**

## → Saisonnalité

- Prélèvements: mai → juillet 2022
- Analyses: septembre 2022 → novembre 2023
- Rédaction: décembre 2023 → janvier 2026

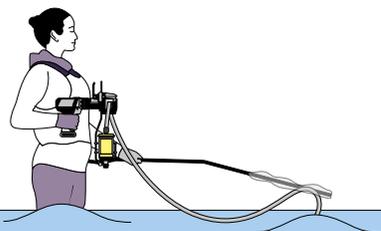
## → Échantillonnage

- 18 sites d'étude: sources → estuaire (≈ 1 000 km)
- 1 matrice: eau
- 36 prélèvements au total

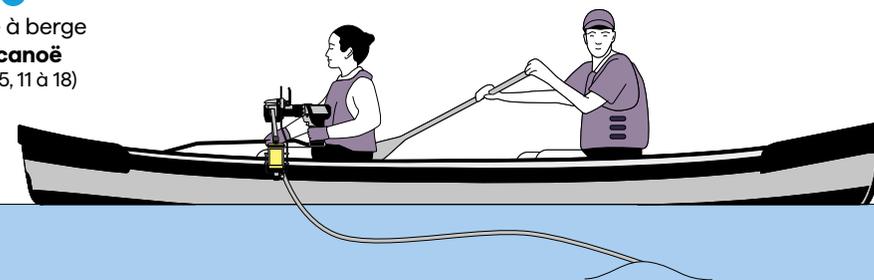
## → Évaluation

- 3 contributeurs majeurs: villes, affluents, obstacles
- 5 méthodes d'analyse: Procaryotes, Eucaryotes, Vertébrés, Poissons, Bivalves

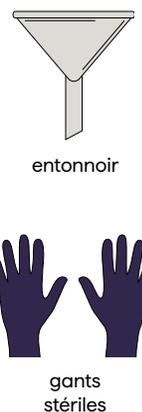
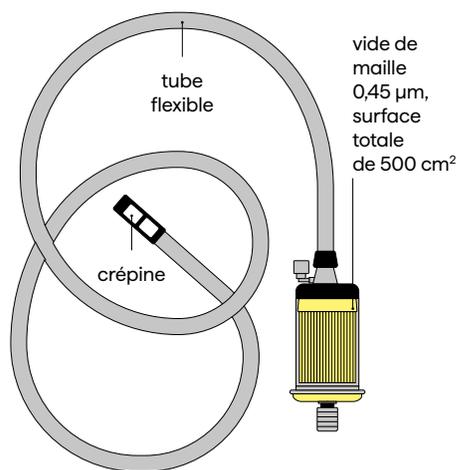
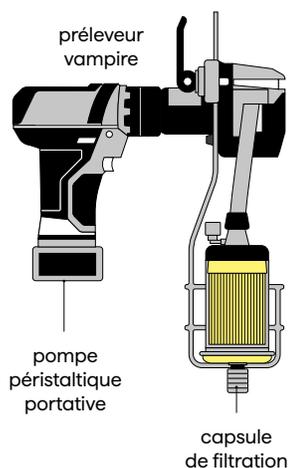
**A**  
flux principal atteignable à pied (sites 1 à 10, sauf 5)



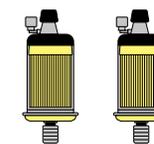
**B**  
berge à berge en canoë (sites 5, 11 à 18)



outils



prélèvement



capsules de filtration

⌚ 2 × 30 min

💧 30 litres d'eau filtrés par capsule

**2 réplicats par site = 36 échantillons** envoyés au laboratoire SPYGEN

En milieu courant, le prélèvement d'ADNe consiste à filtrer 30 litres d'eau à l'aide d'une pompe péristaltique. Il s'effectue en canoë (B), d'une rive à l'autre, ou à pied (A), quand la navigation s'avère difficile. Dans les deux cas, l'échantillonnage se fait face au courant – ce qui limite le risque de contamination par notre ADN – et légèrement sous la surface de l'eau, là où l'ADNe se trouve en suspension. Sitôt la filtration terminée, la capsule est vidée de son eau et remplie avec une solution tampon afin de conserver l'ADN. Elle est alors agitée pour mettre en suspension les fragments d'ADN, reconditionnée, puis envoyée au laboratoire pour analyses. Le même protocole est répété pour chaque échantillon et sur chaque site d'étude.

## ANALYSES – Laboratoire Spygen



**Extraction de l'ADN** total présent dans l'échantillon



**Amplification** d'un petit fragment de l'ADN appelé « barcode »



**Séquençage** (lecture de l'ADN) à haut débit



**Traitement bioinformatique**

espèce 1 .....  
 espèce 2 .....  
 espèce 3 .....  
 espèce 4 .....  
 espèce 5 .....  
 espèce 6 .....

**Inventaire d'espèces**

## RÉSULTATS



→ Liste d'espèces pour les vertébrés et bivalves

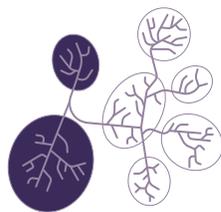
→ Liste d'ordres pour tous les autres eucaryotes

→ Liste des bactéries et archées



« La Loire est  
majoritairement  
peuplée d'*espèces*  
*méconnues,*  
*microscopiques...* »

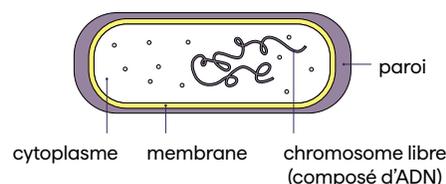
# • Zoom sur les *procaryotes*



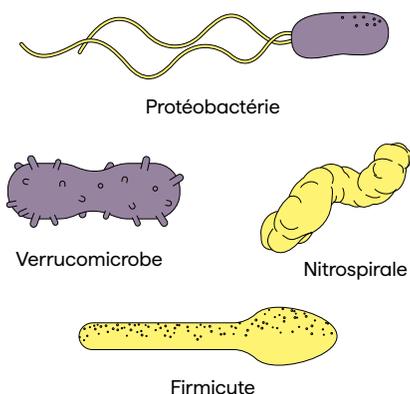
## DÉFINITION

Micro-organismes unicellulaires dépourvus de noyau dont l'ADN est dispersé dans le cytoplasme. Rassemblés en deux domaines – bactéries et archées –, ils vivent généralement librement, même si certains, comme les cyanobactéries, forment des colonies.

## SCHÉMA SIMPLIFIÉ D'UNE CELLULE PROCARYOTE



## → Ça coule de source

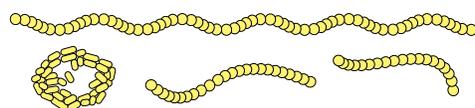


Là où jaillissent les premières eaux de la Loire jaillit aussi la vie microbienne. **Sur les 18 sites étudiés au fil du fleuve, les sources présentent la plus grande diversité microbienne** (avec 910 espèces de bactéries détectées sur un total de 1410 tout au long de la Loire). Protéobactéries, verrucomicrobes, nitrospirales, firmicutes... Tout un nouveau « bestiaire » à même de peupler nos imaginaires.

Car plonger dans le monde microbien, c'est plonger dans l'inconnu : on ne connaîtrait que 5 à 10 % des micro-organismes qui peuplent la planète et... la rendent habitable, par leur action décisive dans la fabrication et l'équilibre des écosystèmes depuis près de 4 milliards d'années. En Loire, comme partout ailleurs, « la vie est avant tout une affaire de bactéries, de virus et de micro-organismes. C'est là l'essentiel de son histoire et c'est là sa structure profonde. »<sup>1</sup>

## → Cyanobactéries et proliférations

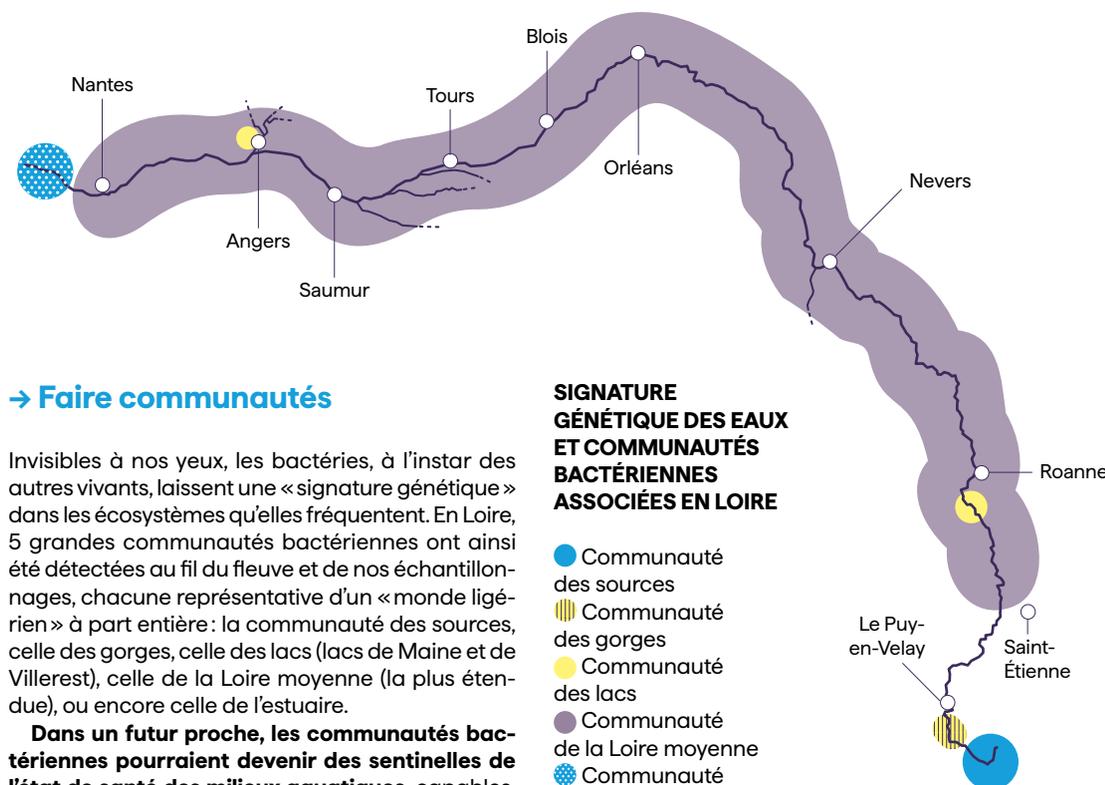
Levons tout de suite un doute : les cyanobactéries (aussi appelées « algues bleues ») sont bien des bactéries. Micro-organismes photosynthétiques, elles sont présentes sur Terre depuis près de 3 milliards d'années et à l'origine de la « Grande Oxydation », phénomène majeur ayant conduit à la formation de l'atmosphère actuelle. Paradoxalement, depuis les années 1980, leur prolifération et décomposition massives asphyxient lacs, étangs et cours d'eau<sup>2</sup>.



**La Loire ne fait pas exception et connaît, chaque été ou presque, des proliférations de cyanobactéries dites « benthiques »**<sup>3</sup>. Ces dernières sont susceptibles de produire des toxines (dangereuses voire mortelles) que l'on trouve essentiellement dans les « biofilms » flottant en surface ou s'échouant sur les rives. Les sources de ces proliférations sont multiples et bien connues : rejets de nutriments et polluants par l'agriculture et l'élevage intensifs, gestion déficiente des eaux usées, augmentation des températures et réduction des débits sous l'effet du changement climatique...

Ne tenons pas les cyanobactéries pour responsables : leur présence est normale et indispensable dans les écosystèmes aquatiques ; ce sont les pratiques agricoles, industrielles et urbaines, « intentionnellement inattentives »<sup>4</sup>, qui ont créé la possibilité de ces proliférations.

**Cinq grandes communautés bactériennes, composées de 1410 espèces, se répartissent le long de la Loire. Dans leur sillage, elles laissent une « signature génétique » aujourd'hui détectable grâce à l'ADN environnemental (ADNe). À l'avenir, elles pourraient devenir l'un des meilleurs indicateurs de l'état de santé des milieux aquatiques.**



## → Faire communautés

Invisibles à nos yeux, les bactéries, à l'instar des autres vivants, laissent une « signature génétique » dans les écosystèmes qu'elles fréquentent. En Loire, 5 grandes communautés bactériennes ont ainsi été détectées au fil du fleuve et de nos échantillonnages, chacune représentative d'un « monde ligérien » à part entière : la communauté des sources, celle des gorges, celle des lacs (lacs de Maine et de Villerest), celle de la Loire moyenne (la plus étendue), ou encore celle de l'estuaire.

**Dans un futur proche, les communautés bactériennes pourraient devenir des sentinelles de l'état de santé des milieux aquatiques**, capables, au travers de leur empreinte génétique, de rendre perceptibles des signaux jusqu'ici imperceptibles – des « signaux d'alerte précoce » qu'il nous reviendrait de déchiffrer.

Les bactéries convoqueraient ainsi nos imaginaires d'observatrices<sup>5</sup> : qu'est-ce qui, dans le cas de telle communauté bactérienne, rendrait compte d'une pollution diffuse ? De l'émergence d'un nouveau pathogène ? Ou de l'équilibre retrouvé d'un écosystème ? Autant d'indices à connecter, autant de nouveaux points de vue à adopter, autant de scénarios à imaginer.

## SIGNATURE GÉNÉTIQUE DES EAUX ET COMMUNAUTÉS BACTÉRIENNES ASSOCIÉES EN LOIRE

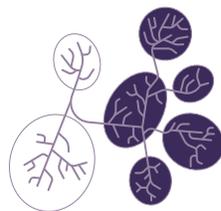
- Communauté des sources
- Communauté des gorges
- Communauté des lacs
- Communauté de la Loire moyenne
- Communauté de l'estuaire

## NOTES

- 1 • Lynn Margulis et Dorion Sagan, *Microcosmos, 4 milliards d'années de symbiose terrestre*, Wildproject, 2022 (1987).
- 2 • Voir par exemple « Prolifération des cyanobactéries : l'eau sous surveillance », dossier du MNHN sous la supervision de Catherine Quiblier, 2023.
- 3 • On distingue les cyanobactéries benthiques (au fond de l'eau) des cyanobactéries planctoniques (en suspension dans l'eau).

- 4 • Merci à Anna L. Tsing pour la distinction décisive qu'elle opère entre des pratiques « non intentionnelles » et « intentionnellement inattentives ». Voir par exemple *Proliférations*, Wildproject, 2022, p. 38-39.
- 5 • Merci également à Vinciane Despret à qui nous empruntons cette formule dans *Les virus de l'imagination*, préface à Frédéric Keck, *Les sentinelles des pandémies, Zones sensibles*, 2020.

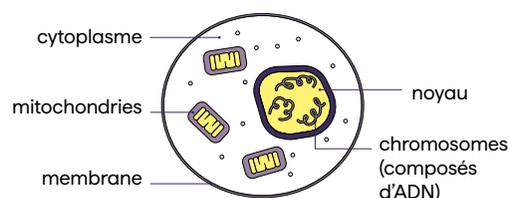
# • Zoom sur les eucaryotes



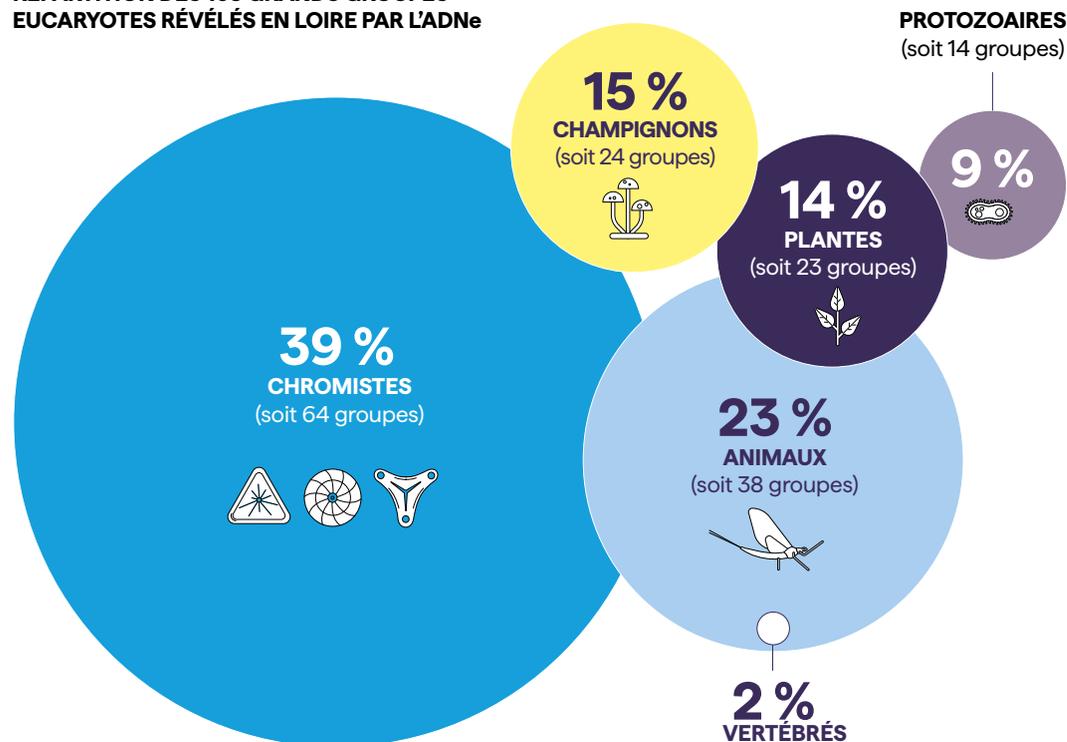
## DÉFINITION

Organismes uni- ou pluricellulaires dont l'ADN est stocké dans le noyau (*Eukaryota*, littéralement « ceux qui possèdent un véritable noyau » dans leurs cellules). C'est précisément ce qui les différencie des procaryotes.

## SCHÉMA SIMPLIFIÉ D'UNE CELLULE EUCARYOTE



## RÉPARTITION DES 163 GRANDS GROUPES EUCARYOTES RÉVÉLÉS EN LOIRE PAR L'ADNe

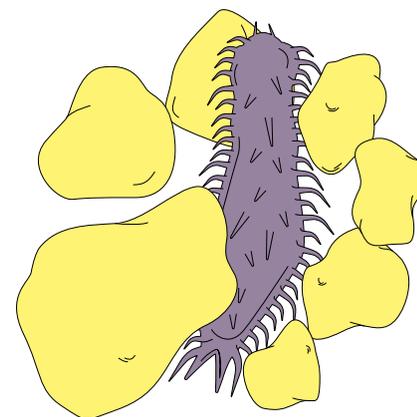


Les vertébrés ne représentent que 2 % de la biodiversité ligérienne (en-dehors des bactéries et archées). Parmi les animaux dont la présence a été révélée par l'ADNe, on retrouve ainsi une majorité d'arthropodes, de vers et de mollusques, de rotifères, cnidaires, éponges, bryozoaires et autres gastrotriches (voir ci-dessus).

Ces résultats mettent en lumière notre profonde méconnaissance de la biodiversité ligérienne et l'attention biaisée que nous portons à certaines espèces que nous apprécions ou méprisons, protégeons ou exploitons.

**Au-delà des procaryotes, plus de 98 % de la biodiversité ligérienne se compose de diatomées et de ciliés, d'insectes et de crustacés, de champignons et de plantes microscopiques, de vers plats, annelés ou ronds... Tout un peuple invisible révélé par ses traces ADN.**

## → Vivre dans les interstices

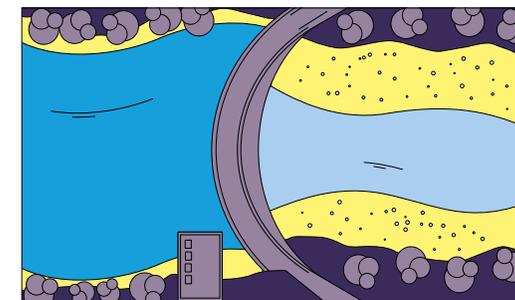


Si le nom « Gastrotriches » ne vous dit rien, vous trouvez dans la même situation que la nôtre à la découverte des résultats de cette étude pilote. Méconnus des scientifiques comme du grand public, les Gastrotriches sont de petits animaux de quelques millimètres tout au plus, recouverts de cils, à qui ils doivent leur nom – *Gastrotricha* est dérivé du grec *gaster* (ventre) et *thrix* (poils) – et qui leur permettent de se déplacer en glissant sur le fond.

Sur ou plutôt dans le fond, car les Gastrotriches peuplent avec une myriade d'autres invertébrés – regroupés sous le nom de « faune interstitielle » – les sables et graviers des écosystèmes marins, saumâtres et d'eau douce du monde entier. Pas étonnant alors de les retrouver en Loire. Plus étonnant par contre de les rencontrer des sources à l'estuaire (sur 14 des 18 sites échantillonnés), et de les rencontrer plus que tout autre groupe animal détecté par l'ADN environnemental.

Essentiels à la décomposition de la matière organique et au recyclage des nutriments, source de nourriture pour de nombreux autres animaux, **les Gastrotriches constituent un lien organique entre la micro et la macrofaune et un maillon important des réseaux trophiques.** Cette « vie interstitielle » les rend sensibles aux mutations écologiques (sédimentation excessive, changement de régime hydrologique, pollutions...) et capables de fournir des indices, invisibles mais bien présents, sur la santé des milieux aquatiques.

## → Faire barrage à la vie



Les sources de la Loire sont aussi des sources de vies multiples. Dans leurs minces filets d'eau, s'épanouit une biodiversité plus grande que partout ailleurs en Loire (avec 87 groupes eucaryotes sur un total de 163 groupes détectés le long du fleuve). Plus grande par le nombre et plus petite par la taille, car elle est principalement composée de micro-organismes : diatomées, ciliés, chytrides, copépodes, euglènes, volvocales...

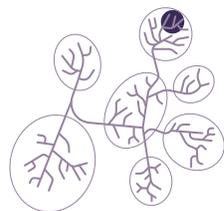
À 260 km de là, la situation est tout autre. En amont du barrage de Villerest, dans le « lac de retenue » du même nom, la biodiversité est en état de choc. **Avec le plus faible total de groupes eucaryotes détectés (18 sur 163), les plus faibles diversités de chromistes, vertébrés, poissons relevées en Loire, on peut qualifier la retenue générée par le barrage de Villerest de « zone morte »**<sup>1</sup>, au moins une partie de l'année. Aux périodes les plus chaudes, sous l'effet combiné du réchauffement et de l'eutrophisation (apport de nutriments) des eaux, la prolifération d'algues et/ou de cyanobactéries provoque une désoxygénation du milieu (hypoxie voire anoxie) qui asphyxie tout ou partie de la faune aquatique. Barrez les cours d'eau, vous barrez le cours de la vie.

## NOTE

<sup>1</sup> La notion de « zones mortes » désigne des zones où la réduction anormale d'oxygène entraîne la mort ou la fuite de la plupart des organismes.

Ces phénomènes, directement liés aux activités humaines, peuvent durer quelques heures, plusieurs jours ou toute l'année.

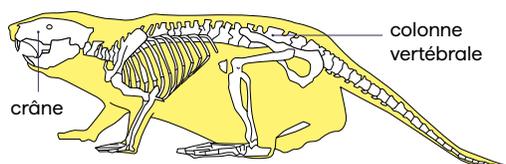
# DNA • Zoom sur les vertébrés



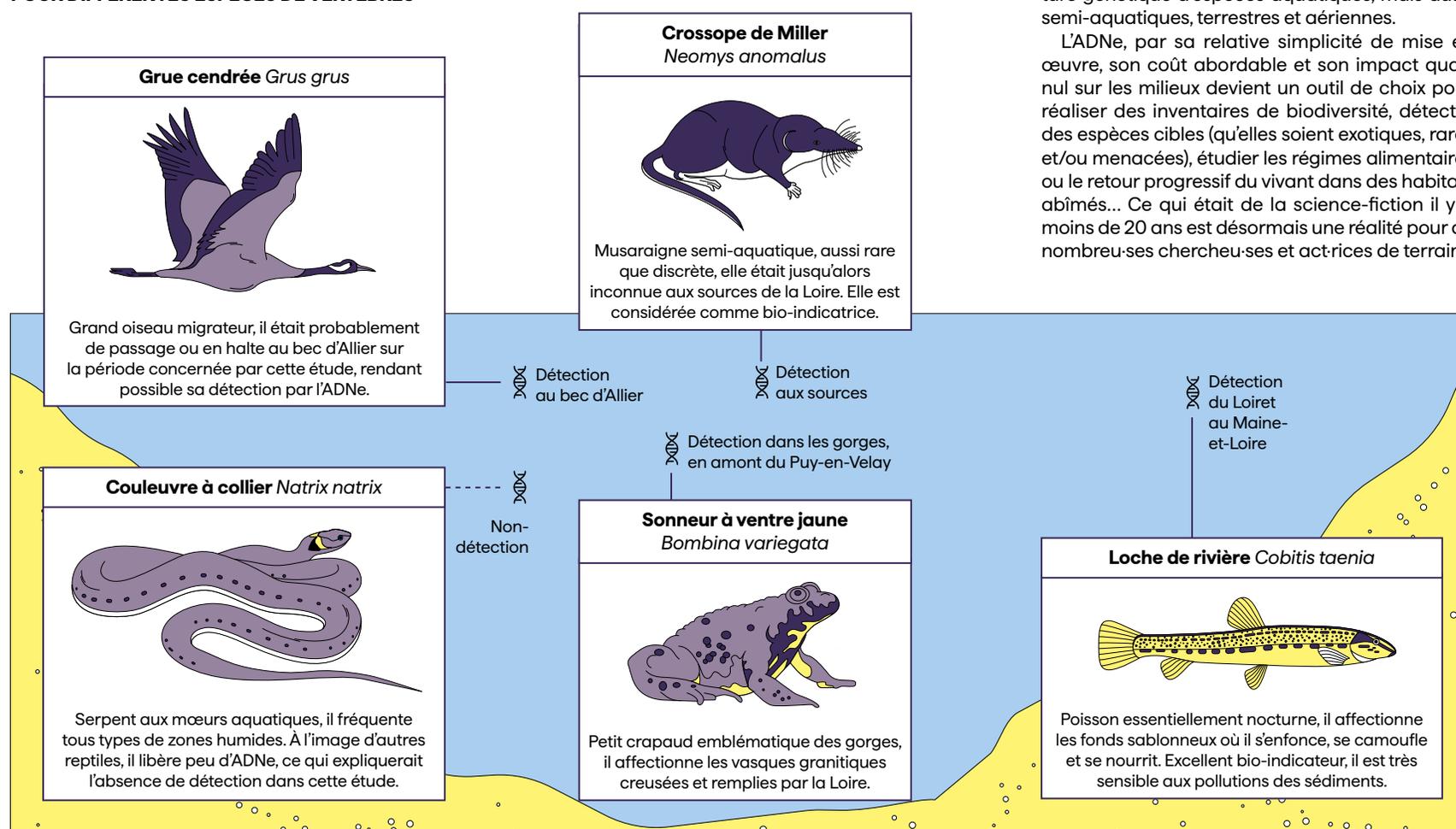
## DÉFINITION

Animaux dont la principale caractéristique est de posséder un squelette interne (osseux ou cartilagineux) composé d'un crâne et d'une colonne vertébrale. Les vertébrés regroupent ceux que l'on nomme usuellement poissons, amphibiens, reptiles, oiseaux et mammifères.

## SCHÉMA SIMPLIFIÉ D'UN SQUELETTE DE CASTOR



## SCÉNARIOS DE DÉTECTION ADN POUR DIFFÉRENTES ESPÈCES DE VERTÉBRÉS



Les vertébrés figurent parmi les animaux les plus étudiés et les mieux connus. Pour autant, dans un contexte d'extinction, ils sont de plus en plus nombreux à se dérober au regard des observat-rices et à se dévoiler essentiellement au travers d'indices de présence tels que l'ADNe.

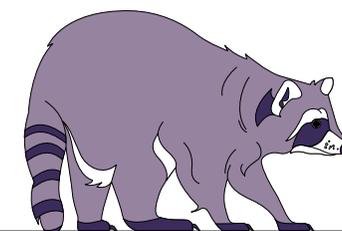
## → Voir les invisibles

Dans l'eau ou dans les airs, sur terre ou sous terre, les vertébrés peuplent différents mondes – et les peuplent différemment sous la pression des activités humaines. Moins nombreux, plus fragiles ou plus discrets, ils sont devenus difficiles à observer.

C'est là que l'ADN environnemental entre en jeu – là où des jours étaient nécessaires pour localiser certains animaux (sans garantie de réussite), quelques litres d'eau filtrés suffisent pour des résultats souvent supérieurs<sup>1</sup>. Car dans l'eau, l'ADNe permet non seulement de relever la signature génétique d'espèces aquatiques, mais aussi semi-aquatiques, terrestres et aériennes.

L'ADNe, par sa relative simplicité de mise en œuvre, son coût abordable et son impact quasi nul sur les milieux devient un outil de choix pour réaliser des inventaires de biodiversité, détecter des espèces cibles (qu'elles soient exotiques, rares et/ou menacées), étudier les régimes alimentaires ou le retour progressif du vivant dans des habitats abîmés... Ce qui était de la science-fiction il y a moins de 20 ans est désormais une réalité pour de nombreux chercheurs et actrices de terrain.

## → Ce cousin venu d'Amérique



L'ADN environnemental a parlé : le Raton laveur, dont on soupçonnait la présence dans les gorges de la Loire, a été détecté en amont du Puy-en-Velay.

Originaire des Amériques, ce mammifère omnivore de la famille des Procyonidés, a été introduit en Europe dans les années 1930, avant de s'installer progressivement et sporadiquement sur le territoire hexagonal (avec des premières données collectées vers 1960). À ce jour, 3 noyaux de populations sont connus en France<sup>2</sup> : la population pionnière du Grand-Est, issue notamment de mascottes de l'armée américaine échappées de la base militaire de Laon-Couvron ; la population de Gironde, probablement composée d'individus évadés de parcs zoologiques ; la population du Massif Central, apparue en Auvergne vers la fin des années 1990.

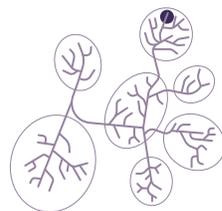
Pour cette population auvergnate – dont fait partie le ou la propriétaire de ces traces ADN – le mystère reste entier : s'agit-il d'individus échappés d'un zoo ? Ou détenus illégalement chez des particuliers ? Ou encore issus d'élevages clandestins ? L'ADN a parlé, mais il ne peut pas tout dire.

## NOTES

1 • Poulet et Basilio. « L'ADN environnemental pour l'étude de la biodiversité. État de l'art et perspectives pour la gestion ». Agence française pour la biodiversité. Collection Rencontres-Synthèse, 2019.

2 • Gautrelet. « Étude de l'éco-éthologie du Raton laveur (*Procyon lotor*) en France ». Groupe de recherche et d'étude pour la gestion de l'environnement (GREGE), 2023.

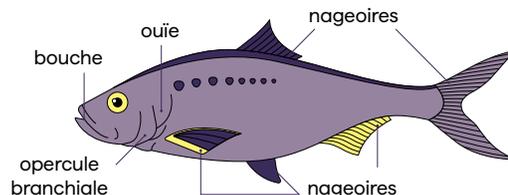
# DNA • Zoom sur les poissons



## DÉFINITION

Le terme générique « poissons », critiquable du point de vue de la zoologie, comprend plusieurs groupes d'animaux vertébrés aquatiques (*Chondrichthyens*, *Ostéichthyens*...) principalement caractérisés par la présence d'écaillles, de branchies et de nageoires.

SCHÉMA SIMPLIFIÉ D'UNE ALOSE



## PANORAMA DES POISSONS D'EAU DOUCE

108

espèces connues en France hexagonale

65 espèces connues dans le bassin de la Loire

48

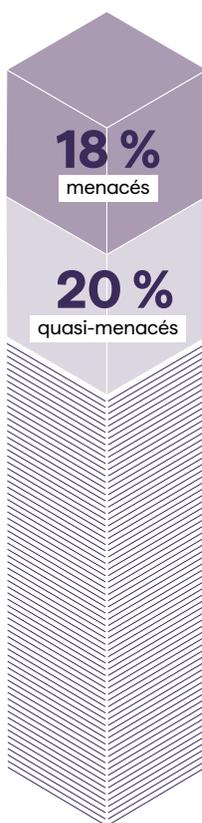
espèces détectées par ADNe au fil de la Loire

+

7

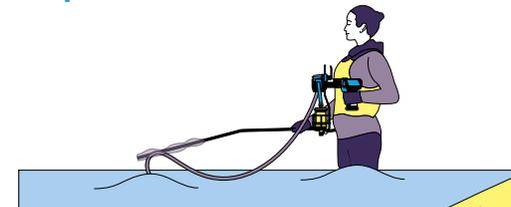
espèces marines détectées par ADNe à l'estuaire

→ 38 % des poissons d'eau douce sont menacés ou quasi-menacés d'**extinction** en France hexagonale<sup>1</sup>



La quasi-totalité des espèces de poissons connues en Loire (55 espèces) ont été détectées par l'ADNe en l'espace de 3 mois et d'une campagne scientifique, l'équivalent de 10 années d'inventaire avec des techniques traditionnelles comme la pêche électrique.

## → Les poissons laissent leur empreinte en Loire

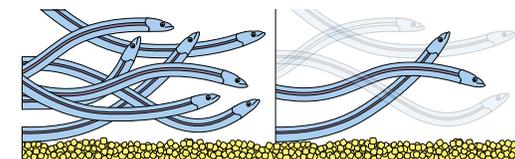


Connait-on vraiment les poissons de Loire ? Connait-on l'Ombre commun, qui peuple les eaux fraîches et tumultueuses des gorges ? Connait-on le Mulet porc, qui remonte le fleuve à chaque printemps ? Sait-on seulement combien d'espèces vivent en Loire ? Sans apporter une réponse à cette question en apparence simple, l'ADN environnemental permet de s'en approcher : **sur les 65 espèces de poissons connues en Loire, 55 ont été détectées par l'ADNe des sources à l'estuaire.**

Ici, pas de suivi sur plusieurs années et une multitude de sites, mais une mission de 3 mois et 18 sites visités. Pas de logistique lourde, mais un canoë et deux personnes à son bord. Pas de pétrole, mais de l'huile de coude. Pas de pêche électrique ou au filet maillant – méthodes traditionnellement utilisées dans les inventaires piscicoles – mais une simple filtration d'eau (voir p. 16-17).

L'ADNe rend possible ce qui était impossible il y a peu : inventorer la totalité des espèces de poissons présentes dans une zone sans avoir à les pêcher, et encore moins à les sacrifier. À titre d'exemple, dans le Rhône français, une étude a montré **la capacité de l'ADNe, en une campagne d'échantillonnage, à détecter entre 83 % et 100 % des espèces rencontrées au cours de 10 années de suivi**<sup>2</sup>. De la pêche électrique à la pêche génétique, il n'y a qu'un pas méthodologique.

## → SOS grands migrateurs



Dans cette période de deuil induite par l'extinction, les actrices de terrain comme LOGRAMI (Loire Grands Migrateurs) cherchent les derniers survivants dans les rangs clairsemés des poissons migrateurs. En 2023, 14 lamproies, 113 saumons et 137 aloses ont ainsi été observés aux stations de vidéo-comptage suivies par l'association (contre respectivement 5 332, 332 et 1063 individus en moyenne entre 2018 et 2022)<sup>3</sup>, soit **une diminution de plus de 99 %, 66 % et 87 % de leurs effectifs.**

Que nous donnent à voir ces chiffres que nous refusons de voir en face ? Que nous continuons à pêcher des espèces au bord de l'extinction. Que 2 250 barrages et seuils (soit 1 ouvrage tous les 3 kms de cours d'eau) sont autant d'obstacles aux migrateurs dans le bassin de la Loire. Que leur survie diminue autant que la température de l'eau augmente. Saisir cette complexité importe si l'on veut comprendre comment et pourquoi ces extinctions ont lieu.

Alors que l'Esturgeon européen n'est plus présent en Loire depuis le 19<sup>e</sup> siècle, nous poussons la Grande Alose et l'Anguille européenne, « en danger critique d'extinction », dans la même direction. **Cette situation nous force à nous interroger : que serait la Loire sans ses grands migrateurs ? Il nous faut l'imaginer pour l'empêcher.** Car si les efforts de conservation sont vitaux, ils ne sont pas suffisants. Des changements plus profonds sont nécessaires.

## NOTES

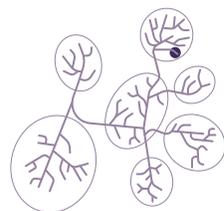
1 • UICN Comité français, MNHN, SFI et AFB. « La Liste rouge des espèces menacées de Poissons d'eau douce de France métropolitaine », 2019.

2 • Pont et al. « Environmental DNA reveals quantitative patterns of fish biodiversity in large rivers despite its downstream transportation ». *Nature*, 2018.

3 • Gauvin, Legrand, Blard et Baisez. « Tableaux de bord Migrateurs du Bassin Loire – Bilan 2023. Programme d'actions en faveur des

poissons migrateurs ». LOGRAMI, 2023.

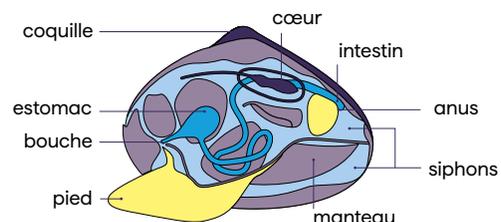
# DNA • Zoom sur les bivalves



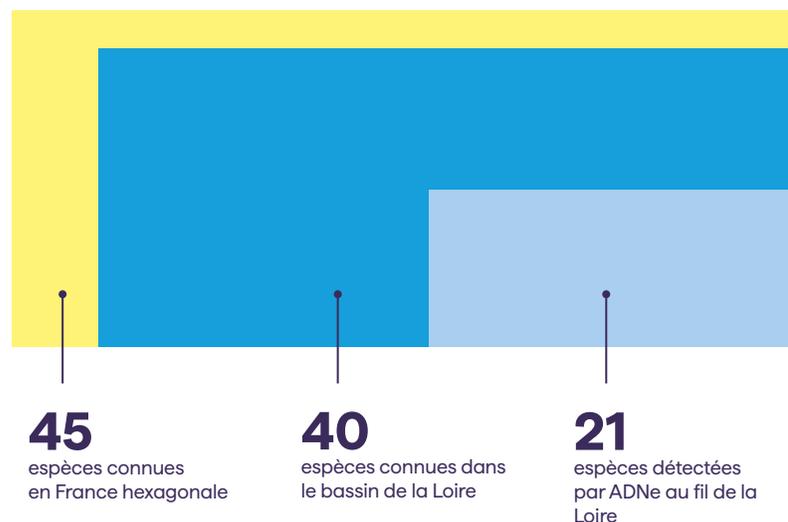
## DÉFINITION

Mollusques aquatiques dont le corps mou est recouvert d'une coquille constituée de deux parties (*Bivalvia*, littéralement « à deux valves »), capable de s'ouvrir et de se fermer. Organismes filtreurs, ils vivent enfouis dans le sédiment, à sa surface, ou encore fixés sur un substrat dur.

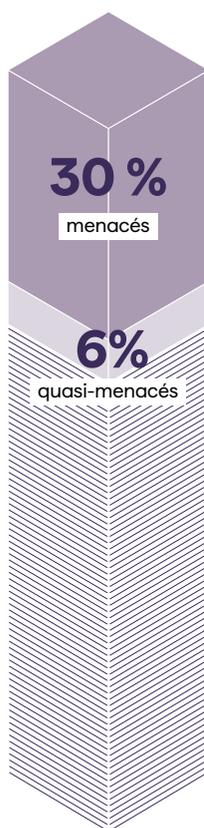
## SCHÉMA SIMPLIFIÉ D'UNE BIVALVE



## PANORAMA DES BIVALVES D'EAU DOUCE

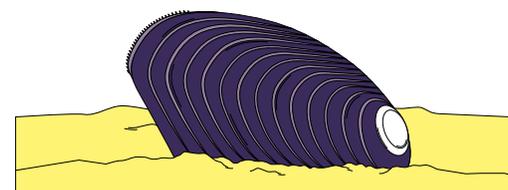


→ 36 % des bivalves d'eau douce sont menacés ou quasi-menacés d'**extinction** en France hexagonale<sup>1</sup>



L'ADNe a apporté son lot de surprises avec la détection d'une nouvelle espèce pour la France, l'Anodonte italienne *Anodonta exulcerata*, et de deux espèces que l'on pensait disparues en Loire, l'Anodonte comprimée *Pseudanodonta complanata* et la Mulette renflée *Unio tumidus*.

## → Une nouvelle venue d'Italie

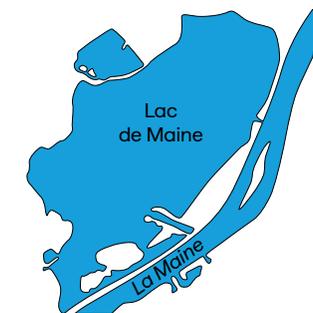


Un nom est toujours plus qu'un nom. Il porte en lui son histoire, ou tout du moins une partie de son histoire. L'Anodonte italienne *Anodonta exulcerata* était ainsi considérée comme endémique d'Italie avant qu'une équipe de chercheur-es, en 2017, ne découvre que son aire de répartition, bien qu'extrêmement fragmentée, était beaucoup plus vaste qu'on ne le pensait – allant de l'Italie à la Croatie<sup>2</sup>. Mais quel rapport entre la Loire et ce bivalve ?

Au début des années 2020, en Loire amont, quelque part aux environs de Roanne, l'ADN environnemental permet de détecter l'Anodonte italienne pour la première fois dans l'hexagone<sup>3</sup>. À l'époque, on pense à un artefact, autrement dit à une erreur d'identification. Puis en 2022, dans le même secteur, **les traces génétiques laissées par cette espèce refont surface dans nos échantillons d'eau, confirmant l'hypothèse selon laquelle l'Anodonte italienne est présente en Loire amont et une nouvelle espèce pour la France.**

Ces résultats, qui demandent à être complétés sur le terrain, soulèvent de nombreuses questions : l'espèce a-t-elle été introduite en France ? Ou, au contraire, subsiste-t-elle à l'état de « population relique », témoin de sa répartition autrefois plus vaste en Europe ? Est-elle en « danger d'extinction » comme ailleurs ? Et une dernière question nous concernant : sommes-nous prêtes à l'accueillir ?

## → Une zone refuge



Refuge pour les oiseaux, avec sa héronnière, le Lac de Maine l'est aussi pour les bivalves d'eau douce, et deux espèces en particulier : l'Anodonte comprimée *Pseudanodonta complanata* et la Mulette renflée *Unio tumidus*. Largement répandues en France hexagonale jusqu'au début du 20<sup>e</sup> siècle, elles ont toutes deux vu leur aire répartition se réduire comme peau de chagrin, au point de s'éteindre totalement dans le bassin de la Loire. Du moins, c'est ce que l'on pensait... Jusqu'à ce que l'on retrouve leurs traces ADN dans le lac de Maine (ainsi qu'en amont de Tours et en aval du bec de Vienne pour la Mulette renflée).

**Une histoire de « redécouverte » comme en offre régulièrement l'ADN environnemental en ces temps d'extinctions.** L'ADNe ne fait pas que visibiliser des êtres invisibles ou rendus invisibles par leur régression, il fait émerger de nouveaux enjeux de conservation : comment agir pour que les dernières Anodontes comprimées et Mulettes renflées résistent et, qui sait, prospèrent à nouveau ? Comment faire du lac de Maine un haut lieu de mobilisation populaire pour la sauvegarde de ces mollusques, à l'image de l'étang de Thau et de la grande nacre ou de l'archipel d'Hawaï et de ses escargots endémiques<sup>4</sup> ?

## NOTES

1 • UICN Comité français, OFB et MNHN. « La Liste rouge des espèces menacées de Mollusques continentaux de France métropolitaine », 2021.

2 • Froufe et al. « Lifting the curtain on the freshwater mussel diversity of the Italian Peninsula and Croatian Adriatic coast ». *Biodiversity and Conservation*, 2017.

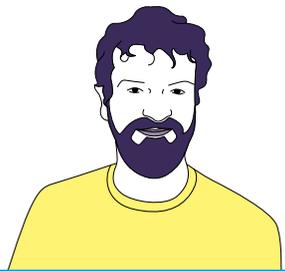
3 • Prié et al. « Conservation assessment based on large-scale monitoring of eDNA: Application to freshwater mussels ». *Biological Conservation*, 2023.

4 • Thom van Dooren. *Tout un monde dans une coquille, histoires d'escargots au temps des extinctions*. La Découverte, coll. Les Empêcheurs de penser en rond, 2023.

# ADNe, voir le *paysage* en grand

## Discussion avec

## Vincent Prié



### Loire Sentinelle : Pouvez-vous présenter votre activité ?

**Vincent Prié :** Je suis hydrobiologiste, chercheur attaché au Muséum national d'histoire naturelle. Très jeune, à l'âge de 20 ans, je me suis passionné pour les mollusques d'eau douce : escargots et bivalves. Il y a beaucoup de littérature ancienne à leur sujet (Linné, Lamarck), mais très peu de spécialistes aujourd'hui. C'est tout le paradoxe. D'une part, parce qu'ils sont difficiles à détecter – à trouver dans des eaux profondes, turbides... Et d'autre part, parce qu'on a du mal à les déterminer – à mettre un nom dessus. C'est là que l'ADNe entre en jeu.

### Très concrètement, comment étudiez-vous les bivalves d'eau douce ?

**V. P.** Dans le cadre de ma thèse, en 2013, je me suis penché sur toutes les espèces de bivalves connues en France hexagonale – une soixantaine de noms à l'époque – pour clarifier leur taxonomie. Souvent, on part d'un vieux grimoire, d'un morceau de texte, où l'on espère trouver un indice qui nous guidera jusqu'à l'espèce et à sa rencontre lors de plongées. C'est un mélange d'enquête et d'exploration. Et c'est passionnant !

Quand j'ai commencé, j'étais quasiment le seul à faire ça, alors que la France est le pays avec la plus grande diversité de bivalves en Europe. Aujourd'hui, on dénombre ainsi 45 espèces de bivalves dans l'Hexagone et la génétique a largement contribué à dresser ce nouvel état des lieux.

### Justement, quelle place a pris la technique de l'ADNe dans vos recherches ?

**V. P.** En 2011, quand je découvre l'existence de l'ADNe, c'est une petite révolution dans le champ de l'écologie et dans ma pratique personnelle. Car la méthode répond à la double difficulté posée par les mollusques d'eau douce : la détermination et la détection. Pour les bivalves par exemple, la probabilité de détection par ADNe est de 95 % contre 60 % environ en plongée.

Ce qui est vrai pour les bivalves ne l'est pas pour tous les animaux : on aura toujours du mal à détecter les reptiles et les crustacés, qui libèrent très peu d'ADN. Reste que je travaille de plus en plus avec cette technique. Ne pas le faire, ce serait comme demander à un ornithologue de travailler sans jumelles...

### « Ne pas travailler avec l'ADNe, ce serait comme demander à un ornithologue de travailler sans jumelles. »

### L'ADNe vient-il supplanter les méthodes traditionnelles ou la complémentarité des approches joue-t-elle réellement ?

**V. P.** En tout cas, je n'ai jamais autant plongé qu'aujourd'hui avec l'ADNe ! Plus sérieusement, cette technique, qui est considérée par certains naturalistes comme une « menace », ne se suffit pas à elle seule. La complémentarité des approches est donc fondamentale. Et pour plusieurs raisons.

Quand je détecte la présence d'une espèce avec l'ADNe, il est nécessaire de revenir sur le terrain pour préciser sa localisation, estimer sa population... Récemment, par exemple, on a révélé l'existence de trois espèces de moules d'eau douce menacées dans la Seine, à Paris : l'Anodonte comprimée, la Mulette des rivières et la Mulette épaisse, qui est protégée. Maintenant, il faut plonger pour savoir où elles se situent exactement et quels milieux préserver pour assurer leur sauvegarde.

Ensuite, parce que l'ADNe nous aide à sentir la présence de telle ou telle espèce, mais nous

## Vincent Prié est hydrobiologiste et directeur de projets au sein du laboratoire Spygen. Spécialiste des mollusques d'eau douce, il s'intéresse à l'ADN environnemental (ADNe) depuis le début des années 2010, dans les rivières de France et d'ailleurs.

aurons toujours besoin des yeux des naturalistes et taxonomistes pour les observer, les décrire...

Enfin, dans une dimension plus poétique, l'ADNe interroge notre rapport charnel au vivant. Est-ce que je n'irai plus au contact des milieux que j'étudie parce que la génétique serait « suffisante » ? Pour moi, la réponse est non.

### Cette complémentarité est donc nécessaire pour pallier les limites de l'ADNe ?

**V. P.** Notamment. L'ADNe n'est plus une technique émergente – on est déjà depuis un moment dans l'application très concrète – mais elle n'est pas encore stabilisée. Certaines limites actuelles peuvent être repoussées. Pour l'heure, les inventaires sont purement qualitatifs (présence ou absence d'une espèce). Mais avec le temps, pour chaque espèce, on devrait pouvoir estimer le nombre d'individus en fonction de la « puissance du signal » que l'on reçoit. Des progrès peuvent aussi être faits sur la distance de détection.

D'autres limites semblent indépassables : est-ce un individu sain ou malade ? Jeune ou adulte ? Etc. Mais quelle méthode n'a pas ses limites ? L'ADNe ne dit pas tout, mais il dit déjà beaucoup.

### « C'est la première fois qu'on obtient une "photographie" d'un fleuve européen à cette échelle. »

### Que révèle cette technique de la santé d'un fleuve ou d'une rivière ?

**V. P.** L'ADNe permet de réaliser des inventaires de biodiversité à très large spectre. C'est la force de cette méthode : elle permet de regarder un paysage avec beaucoup plus de « pixels » que ceux habituellement perçus par nos yeux, nos oreilles... L'image est de bien meilleure qualité, plus précise, et donc plus juste pour mesurer l'état de santé d'un écosystème comme un fleuve ou une rivière.

L'ADNe a tout pour devenir un nouvel indice biologique de l'état des cours d'eau.

En Guyane française, on vient par exemple de montrer une corrélation entre les sites où la plus grande diversité génétique s'exprime et les zones qui sont les mieux protégées le long du Maroni.

### Et concernant la Loire ?

**V. P.** C'est la première fois qu'on obtient une « photographie » d'un fleuve européen à cette échelle, avec autant de données sur la biodiversité, des micro-organismes à la macrofaune. C'est d'autant plus intéressant que la Loire est un fleuve charnière, au croisement des influences continentale, ibérique et méditerranéenne.

Par exemple, et pour en revenir aux bivalves, je ne m'attendais pas à retrouver l'Anodonte comprimée ou la Mulette renflée en Loire (voir p. 28-29). Ces résultats sont plus que prometteurs. Maintenant, il faut resserrer le maillage, avec plus de sites d'échantillonnage, et passer de l'inventaire au suivi à grande échelle.

### L'ADNe peut-il devenir un outil de « veille citoyenne » ?

**V. P.** Je ne sais pas, mais nous recevons de plus en plus de demandes chez Spygen de la part d'individus ou de collectifs qui cherchent à mettre en évidence la biodiversité présente sur leur lieu de vie ou leur terrain de lutte. La méthode devient de plus en plus accessible (techniquement et financièrement), elle se démocratise, et suscite donc un intérêt croissant pour développer de nouvelles pratiques et répondre à de nouveaux enjeux.

The background of the entire page is a dense, intricate network of glowing blue and yellow-green lines and dots against a dark blue background. These lines and dots represent microplastics, with some larger, more complex shapes and many smaller, simpler ones scattered throughout. The overall effect is a complex, almost chaotic web of light, symbolizing the pervasive nature of microplastic pollution.

PARTIE 2



MICROPLASTIQUES

---

# ***Rendre visible une pollution invisible***

# Microplastiques, nos modes de vie révélés

## Les plastiques sont partout. Partout dans nos vies et les milieux de vie.

Dispersés tout au long de leur histoire – depuis leur production jusqu'à leur incinération ou enfouissement, en passant par leur transport, leur consommation et, pour une infime partie d'entre eux, leur recyclage –, les plastiques se fragmentent progressivement en particules de taille milli, micro puis nanométrique sous l'effet combiné d'agressions (rayonnement solaire, température, vent, courant...) et de la dégradation par des micro-organismes.

Par la suite, ces débris de taille infinitésimale intègrent eaux, sols, organismes... Ingérés par une myriade d'êtres vivants – des plus petits, comme le zooplancton, aux plus grands, comme les baleines –, ils s'accumulent tout au long de la chaîne alimentaire, avec des effets délétères sur la santé des écosystèmes, des humains et autres animaux.

Cette histoire de la contamination du monde par les plastiques, nous ne la connaissons que partiellement et depuis récemment. Elle a commencé en mer, où de premières particules plastiques ont été détectées dans les années 70<sup>1</sup>. Elle s'est poursuivie sur les littoraux, puis dans les estuaires. Et elle continue de s'écrire, depuis quelques années, dans les cours d'eau.

Principaux vecteurs de débris plastiques vers l'océan, **les fleuves collectent les eaux – et donc les déchets – de tout un bassin versant, agissant comme un puissant révélateur de notre addiction récente et profonde aux plastiques.** Pourtant, le lien que les fleuves tissent entre terre et mer, pollution continentale et océanique, reste très peu étudié en France et dans le monde.

Face à ce constat, et en collaboration avec les laboratoires BIOSSE et LEE, le volet *Plasticodiversité* de l'étude Loire Sentinelle explore la face invisible de cette pollution : celle des microplastiques. Avec un total de 140 échantillons collectés en 20 points des sources à l'estuaire, dans l'eau et le sédiment, **il s'agit de l'état des lieux le plus précis et complet à l'échelle d'un fleuve européen.**

**Dit autrement : remonter aux sources de la Loire, c'est remonter aux sources de la pollution plastique pour repenser nos modes de vie depuis le fleuve.**

### ILLUSTRATION

← *Microplastiques*, illustrés par Clément Vuillier (double page précédente)

### NOTES

1 • Van Sebille et al. «A global inventory of small floating plastic debris». *Environmental Research Letters*, 2015.

2 • Plastics Europe. «The fast Facts 2024». Plastics Europe AISBL, 2024.

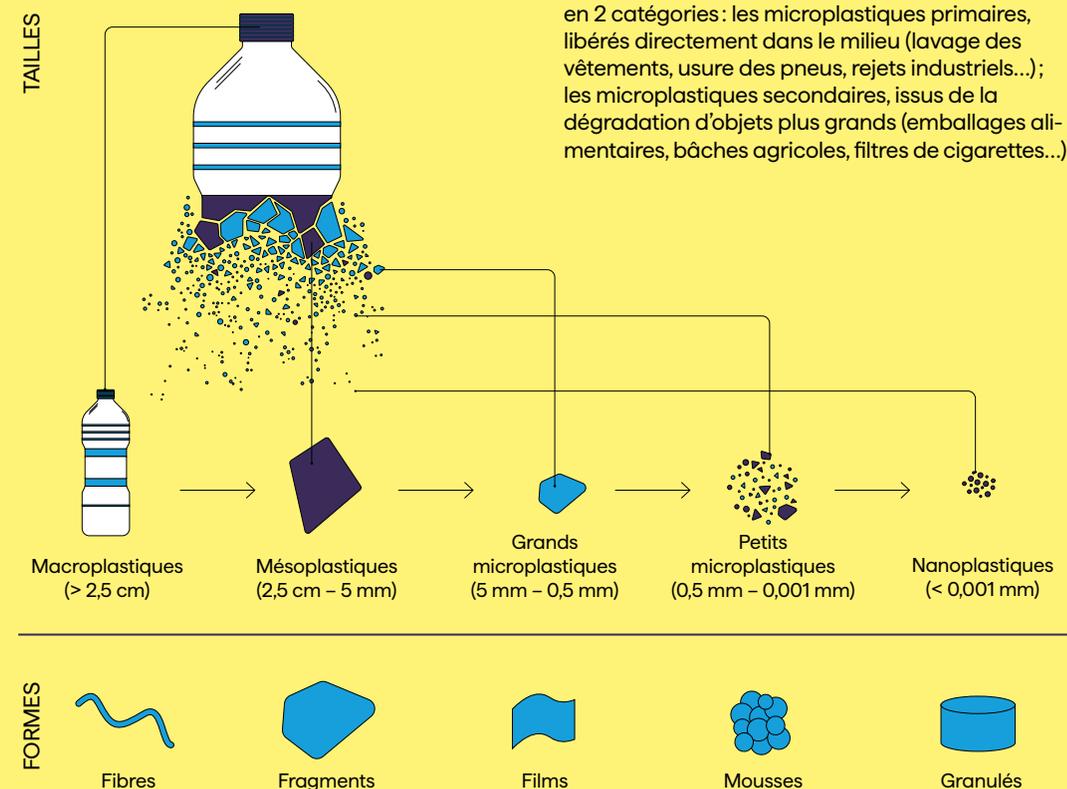
3 • Geyer. «Production, use, and fate of synthetic polymers in Plastic Waste and Recycling». *Academic Press*, 2020.

4 • «Atlas du plastique, faits et chiffres sur le monde des polymères synthétiques». Heinrich Böll Stiftung, 2020.

5 • Geyer et al. «Production, use, and fate of all plastics ever made». *Science Advances*, 2017.

6 • Isobe et al. «A multilevel dataset of microplastic abundance in the world's upper ocean and the Laurentian Great Lakes». *Microplastics and nanoplastics*, 2021.

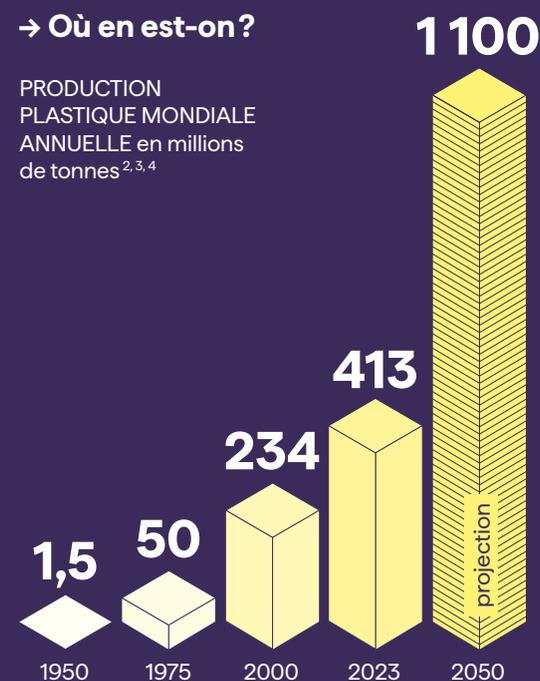
## → De quoi parle-t-on ?



Petites particules plastiques de taille comprise entre 1 µm et 5 mm, les microplastiques se divisent en 2 catégories : les microplastiques primaires, libérés directement dans le milieu (lavage des vêtements, usure des pneus, rejets industriels...); les microplastiques secondaires, issus de la dégradation d'objets plus grands (emballages alimentaires, bâches agricoles, filtres de cigarettes...).

## → Où en est-on ?

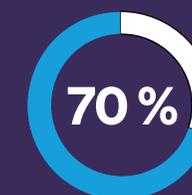
PRODUCTION PLASTIQUE MONDIALE ANNUELLE en millions de tonnes<sup>2,3,4</sup>



RECYCLAGE<sup>5</sup>



des plastiques sont recyclés



des plastiques ne sont utilisés qu'une fois

POLLUTION<sup>6</sup>

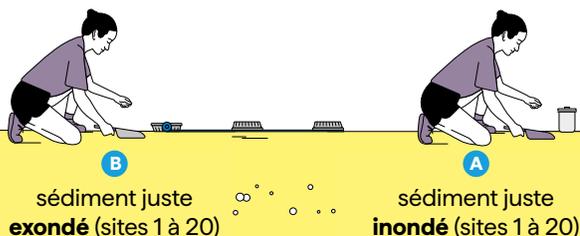
On estime à **25 000** milliards le nombre de microplastiques à la surface des océans

# L'épopée d'un échantillon

**L'aventure d'un échantillon de microplastiques (MP) depuis son prélèvement en Loire jusqu'à son analyse au laboratoire.**

**MATRICE 1: SÉDIMENT**

A B



**MATRICE 2: EAU**

C D

berge à berge en canoë sites 4, 9 à 20



**outils**

- bocal en verre
- pelle en inox

**prélèvement**

**1 triplicat** (mêlé sur le terrain) par site = **20 échantillons** envoyés au laboratoire LEE

**outils**

- barquette aluminium
- mètre
- pelle en inox

**prélèvement**

**3 réplicats** par site = **60 échantillons** envoyés au laboratoire BIOSSE

**outils**

- 75 cm
- 25 cm
- 25 cm
- filet préleveur (en nylon surstressé)
- vide de maille 300 µm

**prélèvement**

- chaussettes de prélèvement
- 3 x 30 min
- 40 m³ d'eau filtrés

**3 réplicats** par site = **60 échantillons** envoyés au laboratoire BIOSSE

Trois types de prélèvement sont réalisés sur chaque site d'étude : deux prélèvements dans le sédiment inondé (A) et exondé (B) ; un prélèvement dans l'eau, effectué à pied (C) ou en canoë (D), selon les conditions rencontrées sur le terrain. Au laboratoire, le couplage des méthodes de spectroscopie (A) et microscopie (B, C, D) permet d'analyser un éventail plus large de particules plastiques, afin de quantifier et qualifier finement la contamination microplastique en Loire.

DEUX MÉTHODES COMPLÉMENTAIRES

**SPECTROSCOPIE INFRAROUGE**

A

Méthode utilisée pour identifier la « famille chimique » d'une matière



→ **Concentration de MP** par kg de sédiment sec

→ **Tailles des particules de MP** (en µm)

25 · 100 · 500 · 1 000 · 5 000

→ **Famille chimique des MP**

densité des plastiques

PP PE PS PET PVC PA PU Acrylique

**MICROSCOPIE**

– Laboratoire BIOSSE

B C D

Méthode utilisée pour caractériser les formes, tailles et couleurs des particules plastiques



→ **Concentration de MP** par kg de sédiment sec ou par m³ d'eau

→ **Tailles des particules de MP** (en µm)

100 · 500 · 1 000 · 5 000

→ **Couleurs des MP**

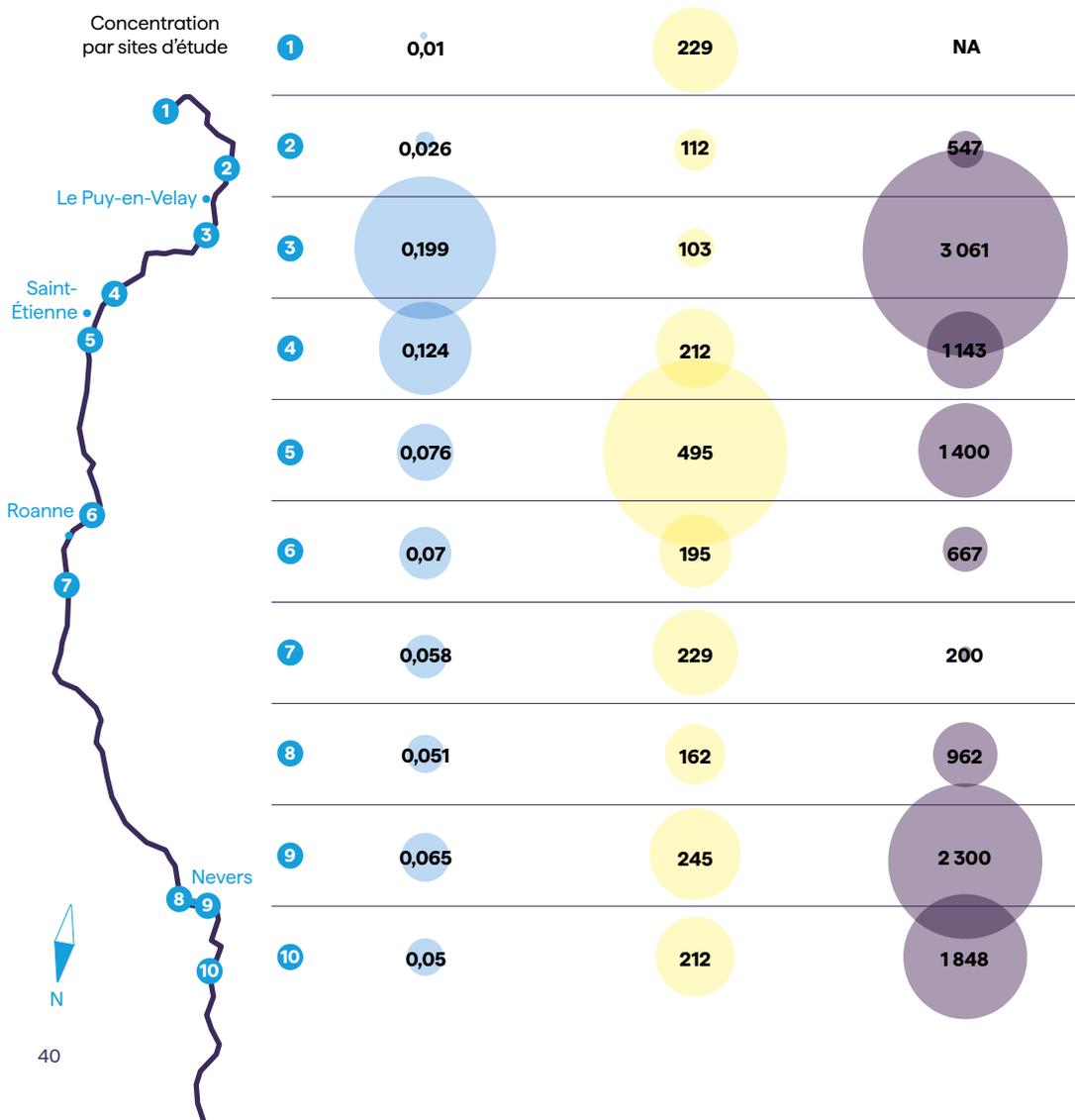
bleu / rouge / noir / vert / marron / gris



« La Loire est  
polluée en *micro-*  
*plastiques*  
dès ses *sources.* »

# • Une contamination généralisée de la Loire

Matrice	EAU		SÉDIMENT	
Méthode d'analyse	MICROSCOPIE (BIOSSE)		SPECTROSCOPIE (LEE)	
<b>Concentration moyenne en Loire</b>	 <b>0,15</b>	 <b>327</b>	 <b>1 413</b>	
	Nombre de MP par m <sup>3</sup> d'eau		Nombre de MP par kg de sédiment	



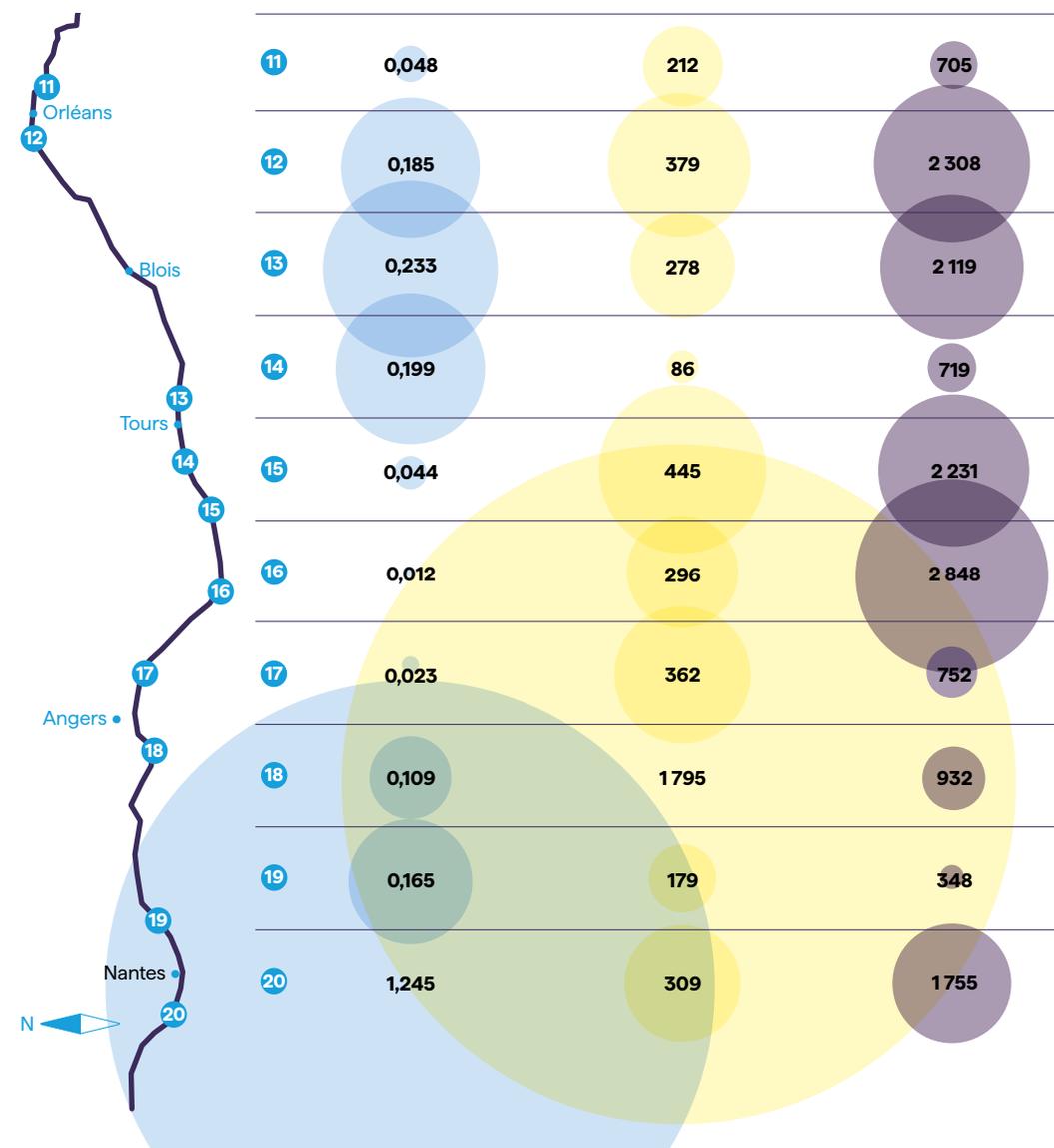
Les microplastiques sont omniprésents en Loire. On les retrouve sur tous nos sites d'échantillonnage, des sources à l'estuaire, dans l'eau comme dans le sédiment.

Le niveau de contamination de la Loire est comparable à celui de la **Garonne** ou de la **Seine**.

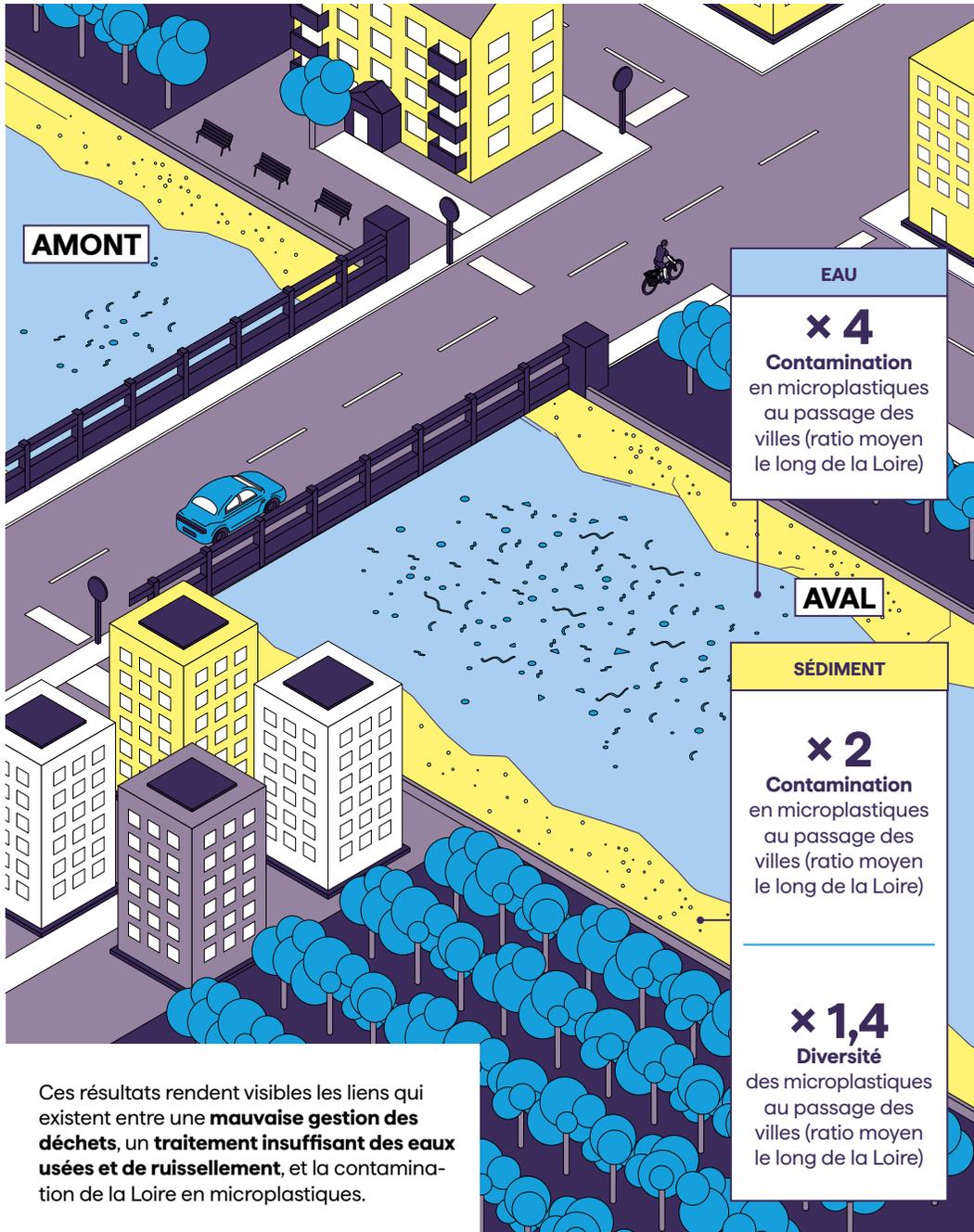
EAU		SÉDIMENT	
<b>LOIRE</b> <b>0,15</b> MP / m <sup>3</sup> eau	≈	<b>GARONNE<sup>1</sup></b> <b>0,10</b> MP / m <sup>3</sup> eau	
		<b>LOIRE</b> <b>1 413</b> MP / kg sédiment	≈
			<b>SEINE<sup>2</sup></b> <b>1 414</b> MP / kg sédiment

<sup>1</sup>Schaal et al. « Caractérisation des flux et typologies de microplastiques le long du fleuve Garonne », Projet La Pagaie Sauvage, 2020.

<sup>2</sup>Gaspéri et Cachot. « Flux et impacts des microplastiques dans l'estuaire de la Seine », Projet Plastic-Seine, 2021.

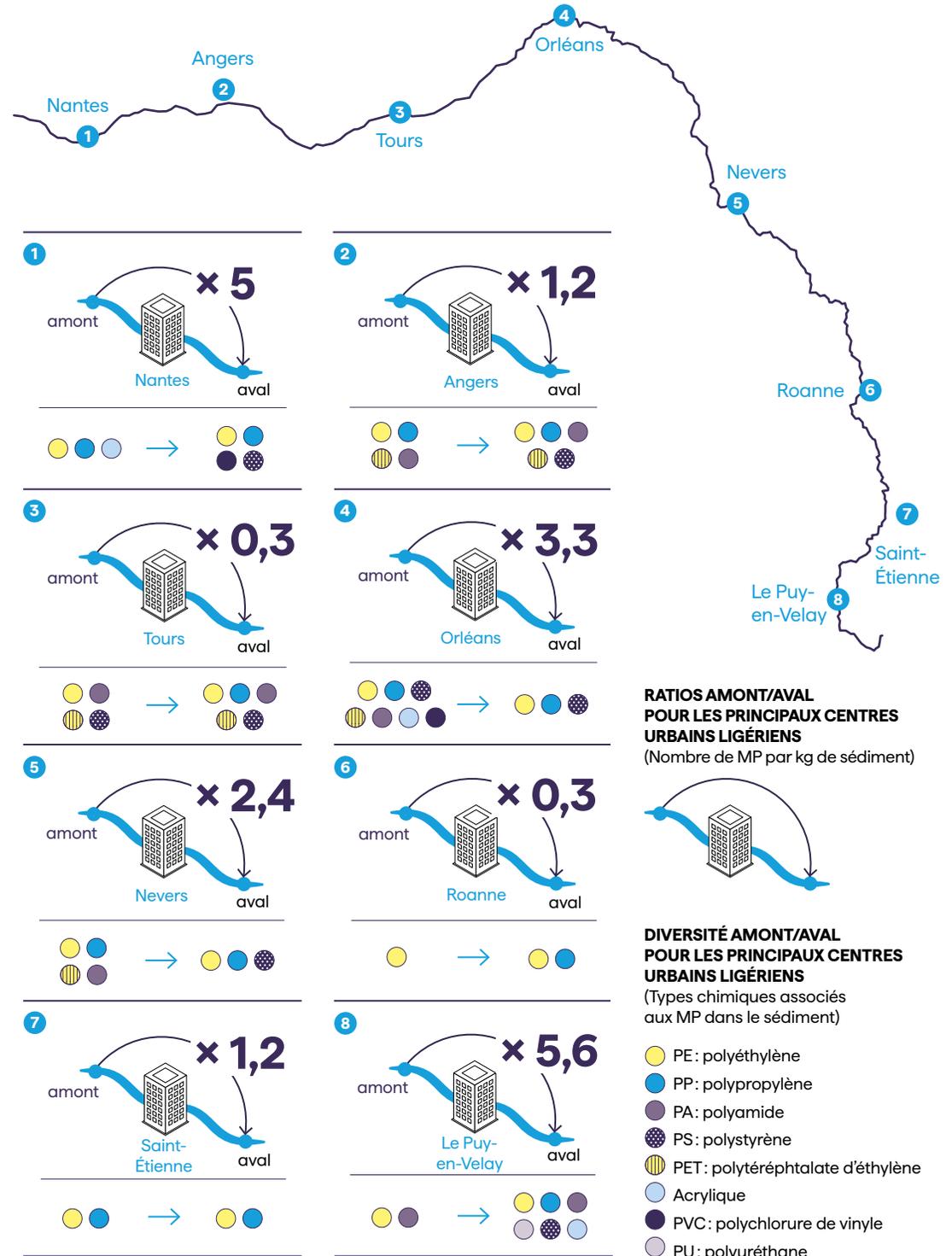


# • Une contribution majeure des villes



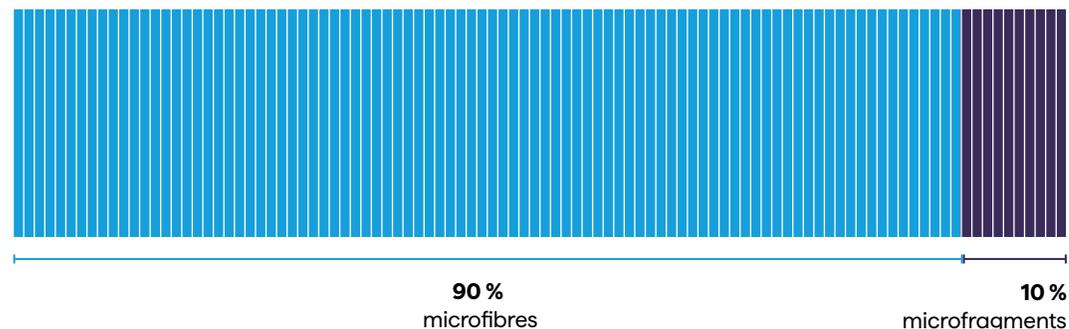
Ces résultats rendent visibles les liens qui existent entre une **mauvaise gestion des déchets**, un **traitement insuffisant des eaux usées et de ruissellement**, et la contamination de la Loire en microplastiques.

La pollution microplastique augmente au passage des villes, à la fois en nombre et en diversité. Cette étude montre que les centres urbains sont des « hotspots de microplastiques ».

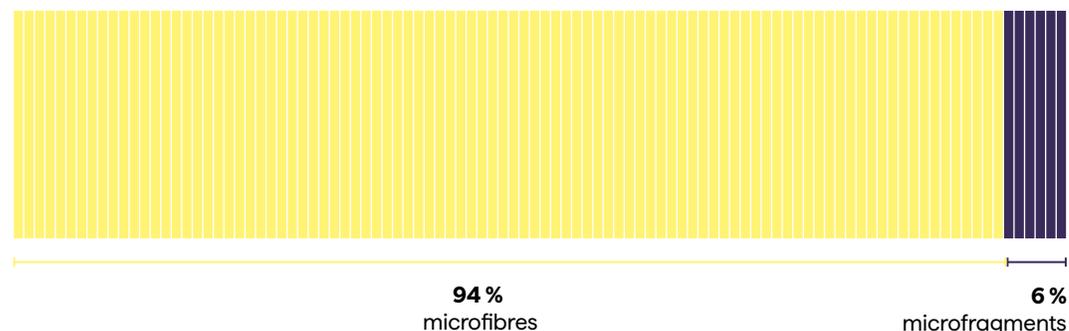


# • Une omniprésence de *microfibres*

PROPORTION DE MICROFIBRES DANS LES ÉCHANTILLONS D'EAU (exprimée en pourcentage)



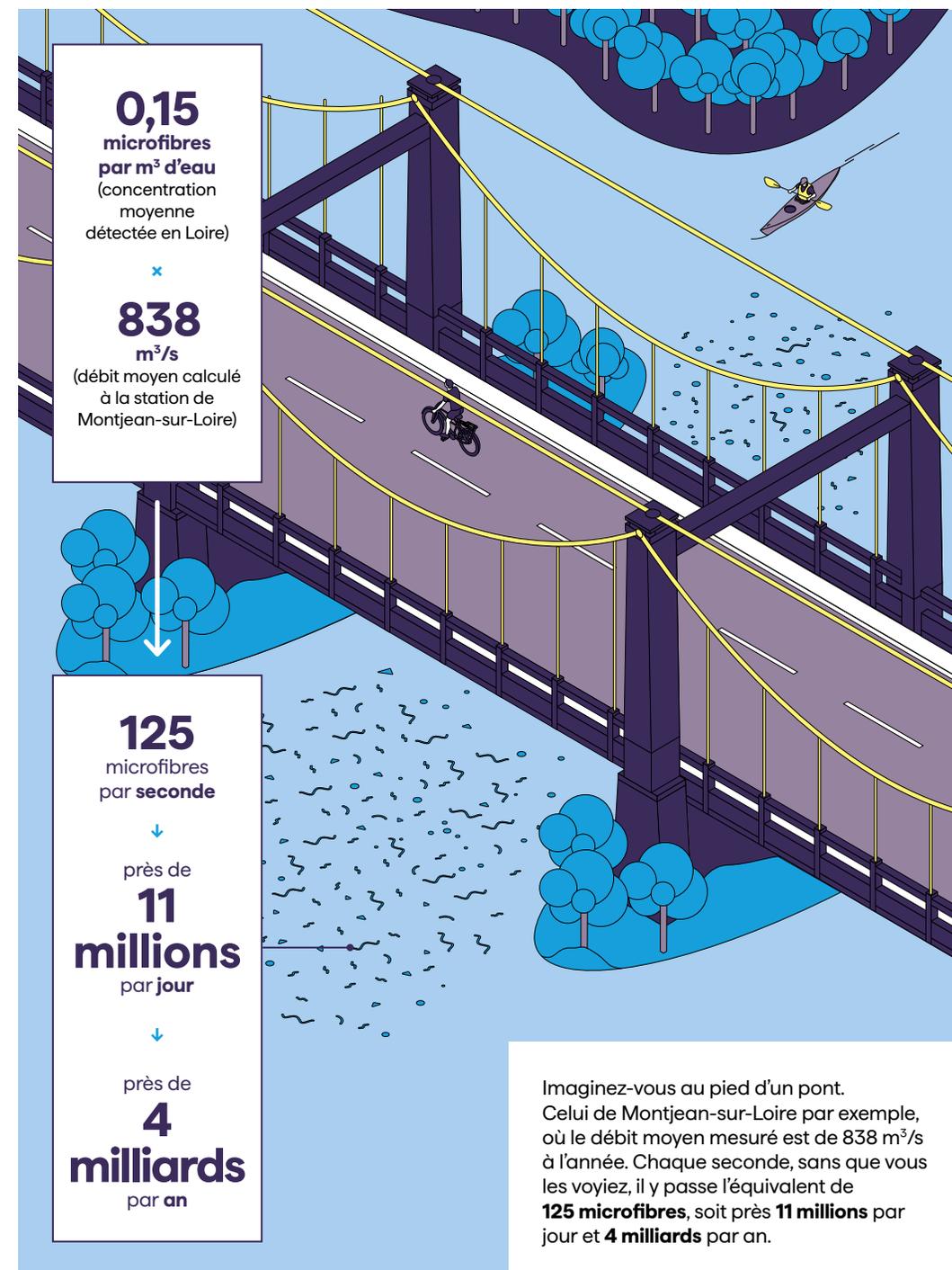
PROPORTION DE MICROFIBRES DANS LES ÉCHANTILLONS DE SÉDIMENT (exprimée en pourcentage)



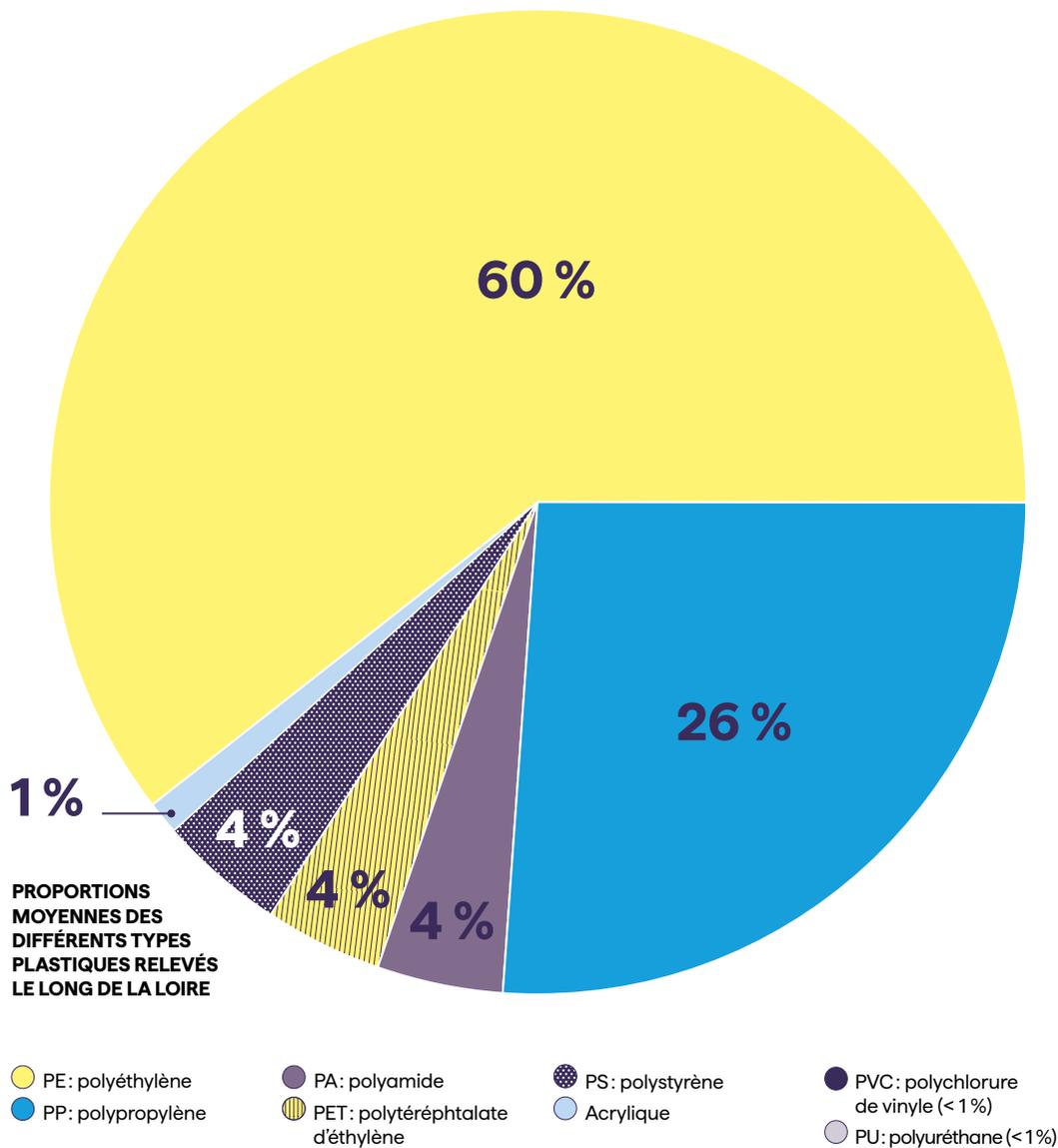
Sous le microscope, les fibres composent 90 % ou plus des microplastiques observés (contre 10 % ou moins de fragments) dans les 120 échantillons d'eau et de sédiment collectés en Loire. **Cette prédominance témoigne d'une contamination généralisée de la Loire par les microfibres textiles.** Principalement libérées lors du lavage des vêtements en machine, les microfibres rejoignent les eaux usées, passent entre les mailles des stations

d'épuration, du fait de leur petite taille, et se déversent dans les milieux aquatiques où elles sont ensuite dispersées, ingérées par des êtres vivants, qui sont consommés à leur tour et ainsi de suite, dans une forme de cercle vicieux.

Parmi l'ensemble des microplastiques collectés en Loire, une écrasante majorité sont des microfibres. La source de cette pollution globale est notamment à chercher dans le lavage des vêtements en machine.



# • Une pollution *plurielle*



L'analyse par spectroscopie infrarouge révèle la **prédominance de 2 types plastiques tout au long de la Loire: le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP)**. Parmi les 8 types de polymères détectés, le PE est le plus abondant, représentant 60 % de tous les microplastiques étudiés, le PP est le deuxième type de polymère le plus souvent détecté, à hauteur de 26 %.

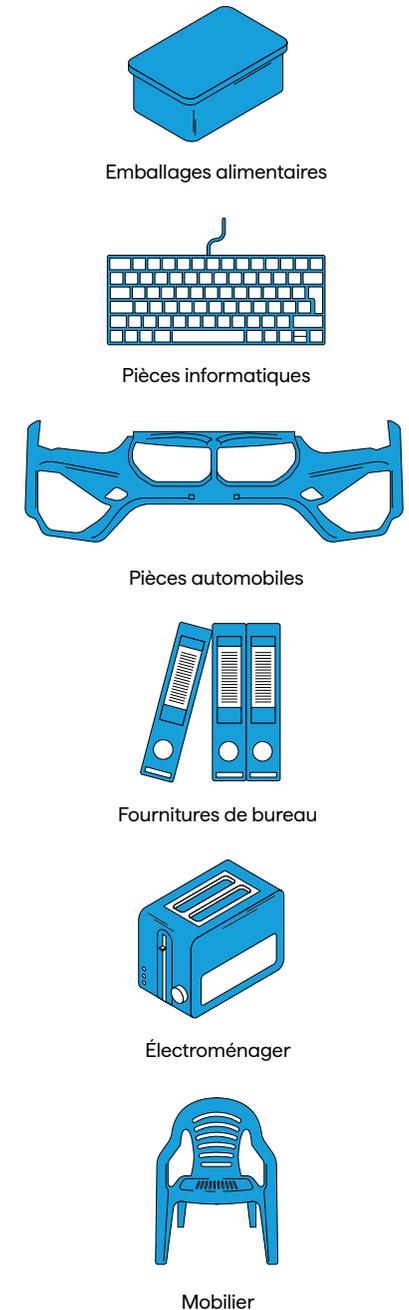
De manière non-exhaustive, le PE est utilisé dans la fabrication de bouteilles, films et sacs plastiques, d'articles ménagers, de jouets, etc.; le PP dans celle d'emballages et contenants alimentaires, de pièces informatiques et automobiles, d'électroménager et de mobilier, etc. En d'autres termes, en l'occurrence ceux de Max Liboiron, « **les plastiques ne proviennent que d'un seul endroit: l'industrie.** »

Les plastiques les plus produits et consommés dans le monde – le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP) – sont aussi ceux que nous détectons le plus en Loire sous la forme de microplastiques.

## → Exemples d'objets sources en polyéthylène (PE)



## → Exemples d'objets sources en polypropylène (PP)



# Microplastiques, vers une *veille écologique*

## Discussion avec

## Lise Durantou



### Loire Sentinelle : Pouvez-vous vous présenter ainsi que votre association ?

**Lise Durantou :** Je suis chargée de projet et coordinatrice des actions de l'association La Pagaie Sauvage. Depuis 2017, nous collaborons avec des universités, en particulier avec l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, pour acquérir des connaissances sur les microplastiques et former des étudiantes aux techniques de comptage. In fine, je vérifie systématiquement ces comptages, afin de limiter les biais d'observation.

Aujourd'hui, en s'appuyant exclusivement sur un réseau de bénévoles pour la réalisation de prélèvements, La Pagaie Sauvage archive des données sur la concentration en microplastiques des fleuves et des rivières hexagonales. Cela nous permet d'avoir une image à un instant T de la situation des microplastiques dans les cours d'eau, pour pouvoir y revenir par la suite, avec des questions bien précises.

### Comment en êtes-vous arrivée à étudier les microplastiques ?

**L. D.** Par des voies dérobées. J'ai été formée précairement en micropaléontologie à l'Université du Québec à Rimouski et j'ai travaillé à l'Université Laval comme assistante de recherche. J'avais suffisamment de repères dans la préparation d'échantillons pour ne pas être « dépaycée » en passant de la micropaléontologie aux microplastiques.

Avec La Pagaie Sauvage, nous avons d'abord pratiqué les itinérances en canoë – une passion partagée par toutes les fondatrices de l'association. Certain-es œuvraient déjà contre la pollution plas-

tique et d'autres, comme moi, avaient un lien avec la recherche dans le domaine de l'eau. Les sorties en canoë ont joué un rôle déclencheur : l'observation systématique de déchets nous a poussées à l'action. À ce moment-là, les sciences participatives sont apparues comme une solution adaptée pour étudier et agir contre une pollution émergente et alors méconnue du grand public.

### « Les microplastiques sont des marqueurs d'une pollution globale, diffuse et invisible mais qui prend racine localement. »

#### Pourquoi pensez-vous que nous avons pris tant de temps à remonter aux sources de la contamination plastique, et donc à s'intéresser aux fleuves et aux rivières ?

**L. D.** Je ne saurais dire pourquoi. Compte tenu de l'omniprésence de cette pollution et de sa toxicité potentielle, c'est un étrange paradoxe. Ce que je peux dire par contre, c'est que nous faisons face à des freins.

Le premier, c'est l'absence de standardisation des protocoles de collecte et d'étude des microplastiques. Elle rend difficiles les comparaisons d'une étude à l'autre, d'une rivière à l'autre... Pourtant, il y a urgence, et il n'y a pas d'énorme plus-value à dépenser des sommes astronomiques au laboratoire quand on peut faire de bonnes analyses visuelles pour trois fois rien – si ce n'est du temps.

Le second frein, ce sont les lobbies du plastique. Leur poids est tel que l'application des textes de loi – quand ils existent – est rendue impossible dans des délais courts. À l'image de ce qui passe depuis des années avec les pesticides...

#### Partagez-vous le constat selon lequel les microplastiques sont partout où nous les cherchons ?

**L. D.** En tout cas, la présence de microplastiques dans des milieux réputés peu anthropisés (aires protégées, zones de haute montagne, glaciers,

**Lise Durantou est membre fondatrice de La Pagaie Sauvage, l'observatoire participatif et citoyen des microplastiques en eaux douces. Au sein de l'association, elle a su allier deux de ses passions : le canoë et la santé des cours d'eau.**

pôles...) en fait un traceur de la diffusion globale des pollutions humaines. Pour le dire autrement : les microplastiques sont devenus des marqueurs de l'activité humaine. Leur présence, leur abondance, leur composition et leur répartition spatiale peuvent donc fournir des informations précieuses sur la santé des écosystèmes.

#### Comment imaginez-vous les suites des recherches sur les microplastiques ?

**L. D.** Aujourd'hui, le besoin de partage est moins important : tout le monde – ou presque – a déjà entendu parler de microplastiques. Mais paradoxalement, leur suivi n'est pas réglementé. La seule façon d'acquérir des données passe par la recherche et donc la bonne volonté de celles et ceux qui étudient cette contamination.

Bien qu'ils ne soient pas encore considérés comme des indicateurs réglementaires, le potentiel des microplastiques est réel : ils témoignent de l'intensité et de la diversité des pressions humaines, de la dégradation des milieux, de l'émergence de nouveaux risques sanitaires (voir p. 54-55)... Dans l'approche *One Health* (« Une seule santé »), leur suivi mobilise de nombreuses disciplines – chimie, biologie, hydrologie, santé, etc. –, ce qui est à la fois nécessaire et stimulant.

### « Le suivi des microplastiques est un outil de veille écologique collective, active et locale. »

#### Avec La Pagaie Sauvage, vous avez mis en évidence la pollution en microplastiques de nombreux cours d'eau du Sud-Ouest, avez-vous été surprise par les résultats de la présente étude ?

**L. D.** Malheureusement, les données sont « dans les clous » : l'omniprésence de microplastiques des sources à l'estuaire, le fait de retrouver le Polyéthylène et le Propylène en tête de liste...

Lors de nos premières expéditions, le long de la Garonne et de l'Adour, nous avons aussi réalisé

des descentes en canoë, en collectant régulièrement des échantillons, afin d'obtenir une « photographie » de la pollution en microplastiques dans un cours d'eau. La variabilité spatio-temporelle des concentrations microplastiques est tellement élevée – d'un point à un autre, d'un moment à un autre – que nos résultats diffèrent, c'est inévitable, mais nos conclusions sont analogues.

#### Pensez-vous que le suivi des microplastiques a la capacité de mobiliser largement ?

**L. D.** Les microplastiques sont des marqueurs d'une pollution globale, diffuse et invisible mais qui prend racine localement. Ils font le lien avec nos modes de vie, notre quotidien – nos vêtements, nos déchets, nos stations d'épuration... Les actions de suivi permettent donc de connecter les habitant-es à leur territoire et de rendre visible l'invisible, à l'image du projet Loire Sentinelle. Elles rendent donc tangible le sujet des pollutions diffuses, même pour des publics non-experts.

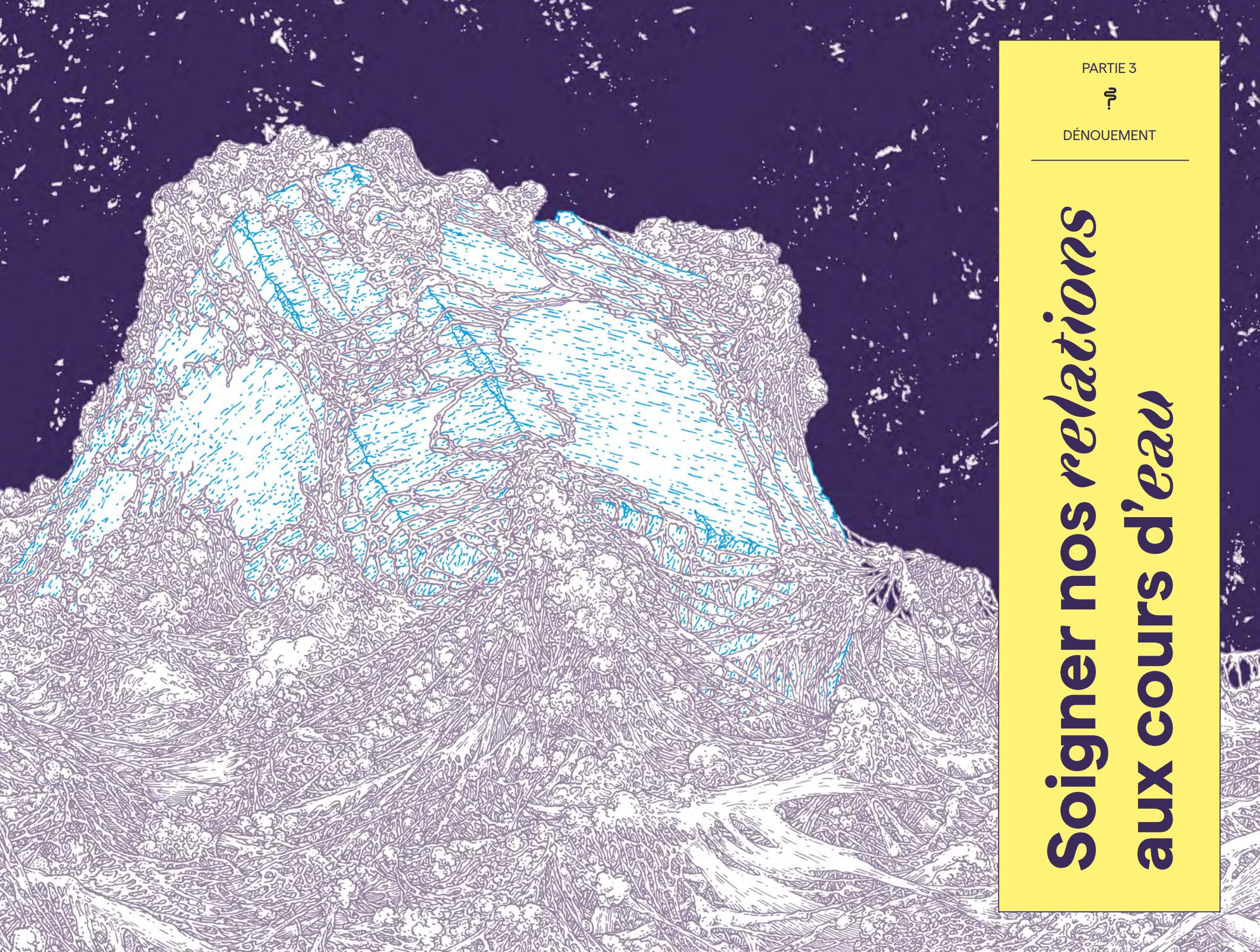
Nous le voyons avec La Pagaie Sauvage, le suivi des microplastiques est un outil de veille écologique à la fois collective, active et locale. Dans les territoires, il agit comme levier de transition, avec pour résultat la mise en place d'actions curatives ou préventives.

PARTIE 3



DÉNOUEMENT

# Soigner nos *relations* aux *cours d'eau*



# ? • Maintenant, nous savons

**Nous savons qu'il ne faut jamais douter de l'invisible<sup>1</sup>. L'ADN environnemental comme les microplastiques nous le rappellent avec vigueur. Invisibles à nos yeux, ils rendent pourtant visibles des cycles (écologique, de l'eau, de la matière...) qui défient notre entendement. Ils nous montrent aussi que tout circule partout et tout le temps.**

Nous le savons, les microplastiques ont colonisé tous les milieux, des zones les plus reculées aux zones les plus peuplées, des plus hauts sommets au plus profond des océans<sup>2</sup>. À ce titre, la pollution engendrée par les microplastiques doit être considérée comme une forme d'accaparement de l'eau, de l'air, du sol, et donc de nos corps (voir p. 54-55). Une forme de colonialisme<sup>3</sup> qui est partie pour durer. Car les plastiques ne disparaissent jamais, mais se fragmentent en particules de plus en plus petites (mésopuis micro puis nanoplastiques) avec des effets de plus en plus importants sur la santé. Une forme de « pollution totale », apte à changer la face du monde durablement et profondément.

**La pollution (avec la fragmentation des cours d'eau par les barrages) est la principale cause d'extinction de la faune d'eau douce :** des poissons aux libellules, en passant par les mollusques et les crustacés, c'est plus du quart de ces espèces qui pourrait s'éteindre dans le monde et un avenir proche<sup>4</sup>. Nos cours d'eau se dépeuplent, les poissons migrateurs se meurent : Anguille européenne, Grande Alose, Lamproie marine... Autrefois abondants, ils sont aujourd'hui poussés au seuil de l'extinction. Nous savons ces faits, mais nous concernent-ils, nous affectent-ils, nous engagent-ils ?

Nous le sentons, qu'il s'agisse des pollutions ou de la sixième extinction, des mutations climatiques ou écologiques, il nous faut apprendre à vivre avec tout en luttant contre. Mais comment faire ? Comment prendre soin d'un cours d'eau – ou de tout autre milieu de vie – malade de nos agissements ? « Comment envisager un point de contact entre [des] mondes, qui ont tant d'origines communes, mais qui sont aujourd'hui si éloignés, qu'on peut trouver, à un extrême, des gens qui vivent avec un

fleuve dont ils honorent l'esprit et, de l'autre, des gens qui le considèrent comme une ressource, le consomment et l'exploitent ? »<sup>5</sup>

**Dans cette dernière partie, loin d'une « recette miracle », nous souhaitons apporter quelques pistes pour passer de l'alerte à l'action, s'outiller, et reconnaître à d'autres êtres la capacité d'agir pour la santé des milieux.**

## ILLUSTRATIONS

← [Biofilm](#), illustré par Clément Vuillier (double page précédente)

→ [Microplastiques](#), dont une majorité de microfibrilles textiles, sous l'objectif du microscope (laboratoire BIOSSE, UCO Angers)

3 • [Max Liboiron. Polluer, c'est coloniser](#), collection « Savoirs situés », Éditions Amsterdam, 2024.

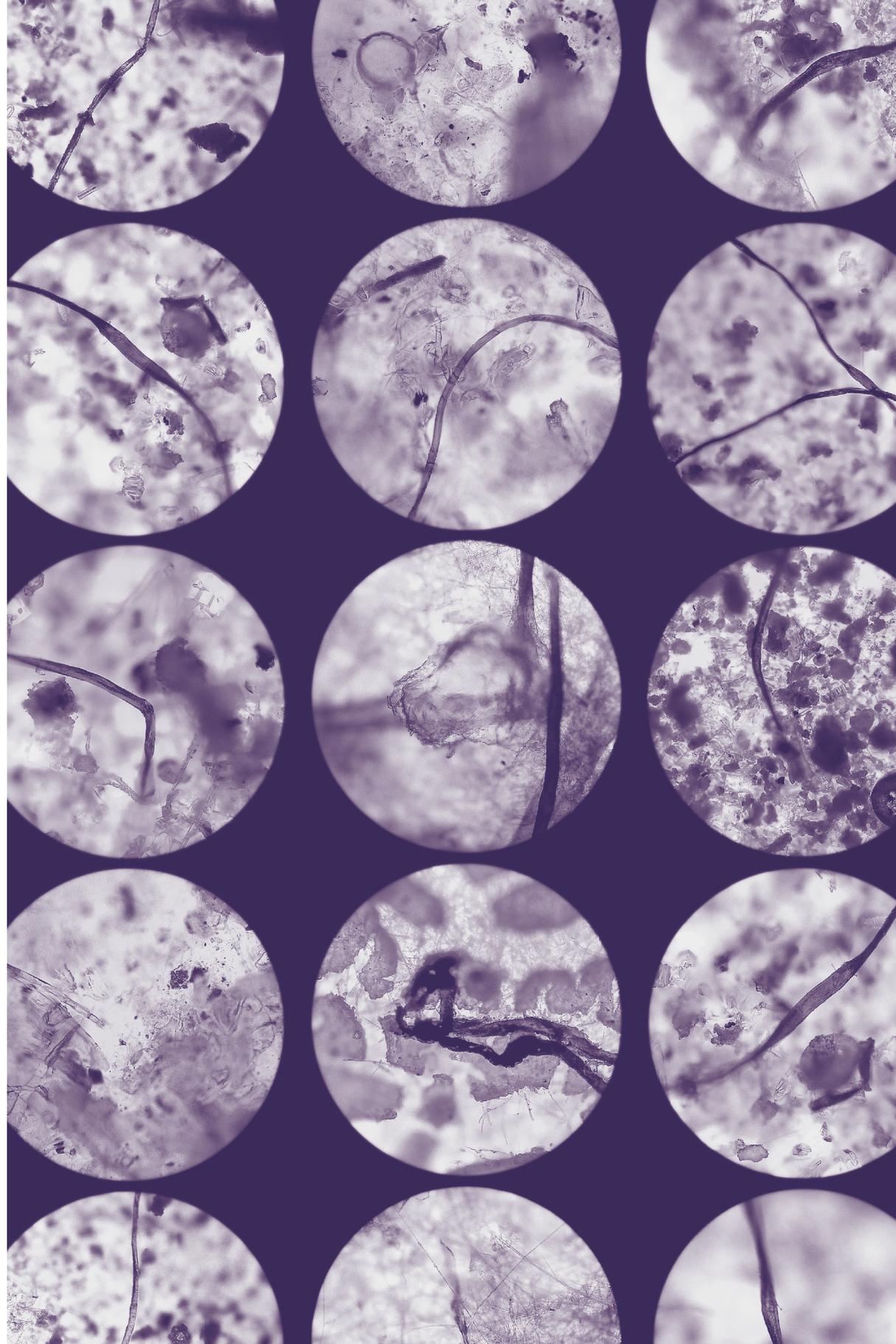
4 • [Sayer et al. « One-quarter of freshwater fauna threatened with extinction »](#), Nature, 2025.

5 • [Ailton Krenak. Idées pour retarder la fin du monde](#), Éditions Dehors, 2020.

## NOTES

1 • [Aldo Leopold. Almanach d'un comté des sables](#), Éditions Gallmeister, 2022.

2 • [Zhao et al. « The distribution of subsurface microplastics in the ocean »](#), Nature, 2025.



# Microplastiques, macro-problèmes

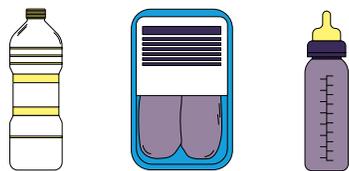
## → Les microplastiques sont partout

Tout le cycle de vie des plastiques (extraction de combustibles fossiles, production, transformation, distribution, consommation, «gestion» des déchets)

nous expose, par différentes voies et à différents niveaux, à des risques pourtant évitables pour la santé.

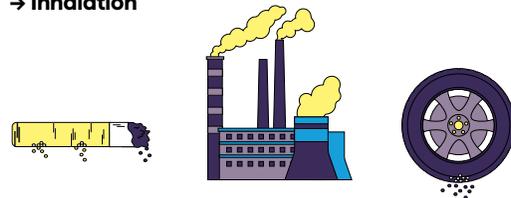
### DIFFÉRENTES VOIES DE CONTAMINATION

#### → Ingestion



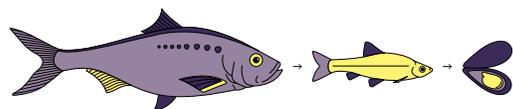
Nourriture ou boisson contaminée par contact avec du plastique

#### → Inhalation

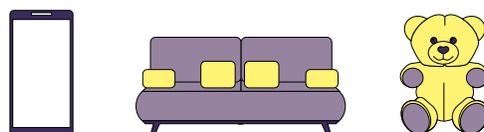


Air intérieur et extérieur contaminé (microplastiques aéroportés)

#### → Contact cutané



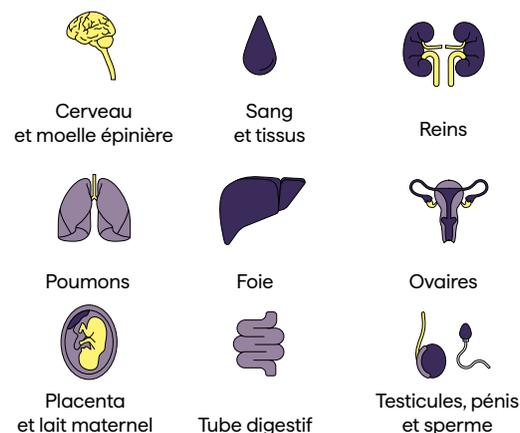
Animaux contaminés par ingestion directe ou bioaccumulation



Altération des défenses de la peau et absorption potentielle

### DIFFÉRENTES ZONES AFFECTÉES

Partout où nous les cherchons, nous les trouvons. Autour de nous et... en nous. Cerveau, poumons, tube digestif, ovaires et testicules, placenta et lait maternel... Nos corps sont littéralement colonisés par les micro- et nanoplastiques, à l'instar d'autres animaux, dont la liste ne cesse de s'allonger au fil des études.



**Les plastiques ne disparaissent jamais. Ils deviennent invisibles, franchissent les barrières biologiques, intègrent tous les maillons des chaînes alimentaires, avec des effets toujours plus visibles sur la santé des écosystèmes, des humains et des autres animaux.**

## → Les microplastiques ne sont jamais seuls

### ÉPONGES À POLLUANTS

Les plastiques captent et accumulent d'autres polluants (métaux lourds, hydrocarbures, pesticides, PFAS, perturbateurs endocriniens...) et deviennent alors des vecteurs de pollution.

### SUPER-INDICATEURS

La détection des microplastiques peut révéler indirectement la présence d'autres contaminants et de pathogènes (virus, bactéries...) qui voyagent à leur surface.

### BOMBE CLIMATIQUE

Plus les plastiques se dégradent en petits morceaux, plus ils produisent de gaz à effet de serre. Cette production augmente également avec l'exposition au soleil et participe au réchauffement climatique local et global.

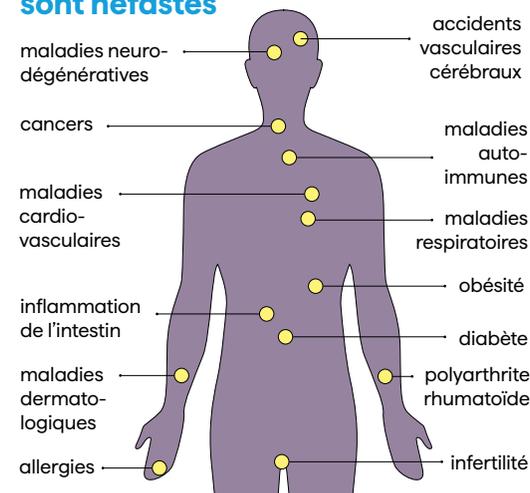
### COCKTAILS CHIMIQUES

L'industrie n'est pas transparente sur la composition des plastiques. Parmi les quelque 16 000 additifs chimiques utilisés dans la formulation des plastiques, 4 000 sont déclarés toxiques et plus de 10 000 autres n'ont pas encore fait l'objet d'études de toxicité.

### PLASTISPHERE

Des communautés microbiennes (« biofilms ») se développent à la surface de radeaux plastiques – des déchets flottants qui favorisent leur transport sur de longues distances. Ces nouveaux écosystèmes microscopiques forment ce que l'on appelle la « plastisphere ».

## → Les microplastiques sont néfastes



Panorama des maladies et troubles favorisés par l'exposition aux microplastiques

Malgré les limites auxquelles fait face la recherche pour estimer les risques aigus et chroniques de l'exposition aux microplastiques, aux additifs qu'ils contiennent, ainsi qu'aux polluants et micro-organismes qu'ils véhiculent, de nombreux effets biologiques sont aujourd'hui documentés chez les humains et d'autres animaux: inflammation, stress oxydatif, perturbation hormonale, toxicité cellulaire... Une telle exposition constituerait donc un facteur déterminant dans l'émergence de maladies et troubles de la santé, justifiant à la fois des études approfondies et des mesures de précaution, inexistantes aujourd'hui.

### NOTE

Les références liées à cette partie sont trop nombreuses pour être citées ici. Comme entrée en matière, nous vous recommandons

notamment la lecture des rapports *Plastics and Human Health (2023)* et *Les impacts des plastiques sur la santé humaine (2024)*.

# • Du bilan de santé à la *bonne santé*

**Cette étude propose une nouvelle lecture de la santé de la Loire, et ce faisant, souligne l'importance d'intégrer de nouveaux indicateurs de l'état de santé des cours d'eau. Elle invite aussi à aller au-delà du diagnostic et à agir concrètement pour des rivières vivantes.**

## → Poser un diagnostic est indispensable

Aujourd'hui, la situation fait qu'une rivière considérée en bon état écologique et/ou chimique n'est pas nécessairement synonyme de « bonne santé » : de nouveaux contaminants comme les microplastiques peuvent apparaître, des populations animales et végétales disparaître, sans avoir fait l'objet de suivis ; et la définition même d'un cours d'eau en bonne santé d'un point de vue hydromorphologique – c'est-à-dire de sa forme et de ses flux – est largement remise en question.

Bien qu'insuffisants, les diagnostics sont indispensables pour repenser la santé *depuis* les rivières, permettre un meilleur dialogue entre communautés locales et décisionnaires, ouvrir de nouvelles voies pour prendre soin des cours d'eau. Parmi ces voies, la **« régénération low-tech des rivières fondée sur les processus et inspirée du castor » se pose comme une alternative à la confluence d'approches scientifiques, écologiques, sociales et participatives**<sup>1</sup>. Une alternative qu'il convient d'explorer pour aider les rivières à se régénérer d'elles-mêmes.

## NOTES

1 • La régénération low-tech des rivières fondée sur les processus et inspirée du castor est notamment promue en France par le Mouvement d'Alliance avec le Peuple Castor ([mapca.eu](http://mapca.eu)).

2 • Patrick Guiraudoux. « La santé des écosystèmes : quelle définition ? » *Bulletin de l'Académie Vétérinaire de France*, 2022.

3 • Baufumé et al. « La santé des socioécosystèmes : promouvoir des liens durables entre biodiversité, agriculture et santé à partir des territoires ». *Horizon Sciences*, Cirad, 2025.

## → Redéfinir la santé est une nécessité

Face aux liens devenus évidents entre crises climatiques, écologiques, sociales et sanitaires – en particulier avec la pandémie Covid-19 –, le concept de « santé en partage » invite à se détacher d'une vision anthropocentrée et considérer ensemble santé des humains, des autres animaux et des écosystèmes. Dans cette optique, une pratique de santé appliquée aux territoires se doit de proposer des « chemins thérapeutiques »<sup>2</sup> adaptés à celles et ceux qui y vivent. C'est là que les approches participatives entrent en jeu. Car la définition même de santé varie selon les territoires et en fonction des communautés locales<sup>3</sup> – de leurs activités, connaissances, perceptions...

Dans le cas d'une rivière, l'enjeu consiste à rendre concrète la notion de santé (qu'est-ce qu'un cours d'eau en bonne santé ?), tout en prenant soin de ce milieu (comment l'aider à se rétablir ?) et des relations qui s'y tissent (comment concilier santé humaine et non-humaine ?). **La bonne santé d'une rivière ou de tout autre écosystème ne se décrète pas, elle se construit collectivement, par et pour les communautés habitantes**, notamment celles qui sont invisibilisées ou sans-voix.

## PHOTO

→ Chantier de régénération low-tech d'un cours d'eau fondée sur les processus et inspirée des castors (formation Arra<sup>2</sup>)



# • De l'alerte à l'action

## → Contre la pollution plastique<sup>2</sup>

NOUS, MEMBRES DU COLLECTIF LOIRE SENTINELLE, FORMULONS LES PROPOSITIONS SUIVANTES

### 1 La source de la pollution plastique a le devoir de se tarir

Nous demandons la réduction drastique de la production et de l'offre de matériaux et d'objets en plastique pour limiter la pollution à sa source.

### 2 Les plastiques à usage unique ont le devoir de disparaître à jamais

Nous demandons l'interdiction de la production de plastiques à usage unique<sup>3</sup> et de leurs alternatives partiellement composées de plastique (ex. carton pelliculé).

### 3 Les plastiques ont un devoir de simplification

Nous demandons l'application du principe de précaution, en supprimant les monomères et additifs chimiques problématiques et dangereux dans la fabrication de plastiques<sup>4</sup>.

### 4 Les vivants ont le droit à une vie sans plastique

Nous demandons la reconnaissance des populations les plus affectées par les pollutions dues au plastique et des personnes travaillant tout au long du cycle de vie des plastiques.

### 5 Les pouvoirs publics ont le devoir de se mouiller

Nous demandons la mise en œuvre de stratégies territoriales contre la pollution plastique pour :

- Prévenir la production de déchets via la réduction à la source, le développement de systèmes de réemploi, recharge et vrac (ex. réseaux de consignes);
- Préserver le cycle de l'eau de la pollution plastique, par la limitation d'entrée des plastiques dans les réseaux d'eaux, le captage des déchets avant qu'ils ne rejoignent les milieux (ex. filets aux exutoires), la lutte contre l'abandon des mégots, etc.;
- Favoriser et promouvoir la consommation d'eau du robinet, et garantir sa qualité;
- Améliorer la collecte et le recyclage, et mettre fin à l'exportation de déchets plastiques dans des « zones sacrifiées »<sup>5</sup>;
- Développer des outils, former et soutenir des groupes de veille (« collectifs sentinelles ») sur la pollution plastique depuis les territoires;
- Réduire la pollution existante, là où elle se trouve, pour limiter la diffusion des déchets plastiques, leur fragmentation et leur impact sur la santé des écosystèmes, des humain-es et autres animaux.

## NOTES

1 • Nous empruntons ici les mots du collectif Scientifiques en rébellion dans *Sortir des labos pour défendre le vivant*, Éditions du Seuil, 2024.

2 • Ces demandes s'appuient notamment sur le rapport parlementaire « Pollution plastique : une bombe à retardement ? » (2020), le guide « Territoires Zéro Pollution Plastique » (WWF, 2020), le dossier « Lutte contre la pollution plastique » (Zero Waste France, Surfrider Foundation Europe, No Plastic in My Sea, 2024).

3 • Cette demande prend au sérieux la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire (loi AGEC) qui prévoit la fin de la mise sur le marché des emballages en plastique à usage unique d'ici 2040.

4 • Voir « Microplastiques, macro-problèmes », p. 54-55.

5 • Les « zones sacrifiées » sont des lieux devenus inhabitables ou quasi-inhabitables, en raison de leur pollution ou de leur dégradation, où les intérêts économiques priment sur les communautés locales humaines et autres qu'humaines.

Face à la gravité de la situation, en Loire comme ailleurs, nous sommes convaincu-es que lancer l'alerte ne suffit plus et qu'il est de notre responsabilité en tant que scientifiques, artistes, journalistes, habitant-es de passer à l'action et de s'engager pour que le fruit de nos travaux contribue à changer les politiques et les imaginaires<sup>1</sup>.

## → Pour des rivières vivantes<sup>6</sup>

NOUS, MEMBRES DU COLLECTIF LOIRE SENTINELLE, FORMULONS LES PROPOSITIONS SUIVANTES

### 1 L'eau a le droit de remplir ses fonctions vitales plutôt que des bassines

Nous demandons le respect du Code de l'environnement<sup>7</sup>, qui définit l'eau comme un bien commun et hiérarchise ses usages pour assurer en priorité :

- L'accès à l'eau potable pour l'alimentation, la santé et la salubrité publique;
- puis, le bon état des milieux aquatiques;
- et enfin, les usages économiques et de loisirs.

### 2 Le fleuve a le droit à des droits

Nous demandons la reconnaissance a minima des droits fondamentaux<sup>8</sup> suivants pour la bonne santé des fleuves, des rivières et de leurs bassins versants :

- Le droit de s'écouler librement;
- Le droit de remplir leurs fonctions essentielles;
- Le droit de ne pas être pollué-es;
- Le droit d'alimenter et d'être alimenté-es par des aquifères durables;
- Le droit à la biodiversité autochtone;
- Le droit à la régénération et à la restauration.

### 3 Le fleuve a le droit de vivre en bonne santé (et nous avec)

Nous demandons l'évaluation et la prise en compte de la santé des fleuves, des rivières et de leurs bassins versants conformément aux connaissances scientifiques les plus récentes et en partenariat avec toutes les parties concernées par cette santé.

### 4 Tout le monde a le droit de faire connaissance avec le fleuve

Nous demandons l'éducation pour tou-t'es (petites et grand-es, riverain-es ou non) aux fleuves, rivières et bassins versants.

### 5 Les vivants du fleuve ont le droit de circuler librement

Nous demandons la mise hors service et le démantèlement de tous les ouvrages (barrages, seuils...) nuisant à la continuité écologique des fleuves et des rivières quand ils sont dépourvus d'un objectif social et écologique impérieux.

### 6 Les poissons migrateurs ont le droit d'avoir la paix

Nous demandons la mise en place d'un moratoire sur la pêche (professionnelle et amateur) des poissons migrateurs, avec l'interdiction de pêche d'espèces menacées d'extinction locale, nationale et/ou internationale comme l'Anguille européenne, la Grande Alose, la Lamproie de rivière, le Saumon atlantique, etc.

6 • Ces demandes s'appuient notamment sur la *Déclaration Universelle des Droits des Fleuves et Rivières* portée par Earth Law Center et International Rivers (2020).

7 • Code de l'environnement, « Titre 1<sup>er</sup> Eau et milieux aquatiques et marins », (Articles L210-1 à L219-18).

8 • Ces droits fondamentaux figurent dans la *Déclaration Universelle des Droits des Fleuves et Rivières* (rightsofrivers.org) adoptée à ce jour par plus de 100 organisations et dans plus de 20 pays dans le monde.

# De l'alerte à l'action

## S'informer, se former

**Pour des rivières vivantes** – rapport de WWF France sur l'état écologique des rivières françaises hexagonales

**Qualité Rivière** – carte interactive développée par les Agences de l'eau pour connaître l'état écologique et physico-chimique des cours d'eau en France hexagonale

**Info PFAS** – outil de visualisation des données nationales de surveillance des substances PFAS

**Rivernews** – newsletter des actualités et projets suivis par SOS Loire Vivante – ERN

**Plastique à la loupe** – opération de sciences participatives à destination des scolaires et à l'initiative de la Fondation Tara Océan

**Déclaration universelle des droits des fleuves et rivières** – déclaration guidée par la reconnaissance juridique croissante des droits inhérents aux fleuves et rivières dans le monde

**Notre Affaire à Tous** – accompagnement de collectifs et élus locaux à rédiger, proclamer et porter des déclarations de droits (de fleuves, de rivières, de forêts...)

## Surveiller, veiller sur

**Sentinelles de l'eau** – action portée par l'association Eau & Rivières pour surveiller, à l'échelle citoyenne, la qualité et quantité d'eau

**Sentinelles de la nature** – carte participative développée par France Nature Environnement pour signaler des dégradations ou initiatives favorables à l'environnement

**DRYrivERS** – application open-source pour aider les scientifiques à surveiller l'assèchement des rivières et réseaux hydrographiques

**O'CitEaux** – projet de recherche participatif et citoyen pour suivre l'évolution des petits cours d'eau face aux changements climatiques

**Plastic Origins** – application lancée par Surfrider Foundation pour cartographier la pollution plastique des fleuves et rivières d'Europe

**La Pagaie Sauvage** – observatoire participatif et citoyen des microplastiques en eaux douces

**Surveillance des îlots à sternes** – veille des sites de nidification des sternes et sensibilisation des publics proposées par LPO Centre-Val de Loire

Si ce rapport est nécessaire, il n'est toutefois pas suffisant. Avec cette « boîte à outils », nous bricolons quelques pistes de réflexion, d'action et de mobilisation confluentes pour naviguer en ces temps troublés.

## S'engager, se mobiliser

**Manifeste de Loire** – proposition portée par le collectif vers un parlement de Loire

**Charte Fleuve sans plastique** – démarche de la Fondation Tara Océan et d'Initiatives pour l'Avenir des Grands Fleuves (IAGF)

**Scientifiques en rébellion** – collectif de scientifiques engagé contre l'inaction face au dérèglement climatique et à l'extinction du vivant

**SOS Loire Vivante** – association agissant pour et informant sur des rivières vivantes, libres et sauvages depuis 1989

**Rivières Sauvages** – réseau associatif et label pour la préservation des derniers cours d'eau sauvages de France et d'Europe

**Réseau Hydre** – réseau animé par différents collectifs contre l'accaparement et pour le partage des biens communs de l'eau

**Pour une hydrologie régénérative** – association promouvant la régénération des cycles de l'eau douce et l'aménagement de territoires hautement résilients

**Mouvement d'Alliance avec le Peuple Castor (MAPCa)** – association soutenant la régénération low-tech des cours d'eau fondée sur les processus et inspirée du castor

## Fêter, célébrer

**Journée internationale d'action pour les rivières** – 14 mars, chaque année

**Journée mondiale de l'eau** – 22 mars, chaque année

**Journée internationale de la diversité biologique** – 22 mai, chaque année

**Journée mondiale des poissons migrants** – 23 mai, chaque année

**Agir pour l'eau et les fleuves** – en juin (chaque année ou presque), à Namur

**Big Jump** – deuxième dimanche de juillet, chaque année

**Festival de la pluie** – en juillet (chaque année ou presque), à Saint-Amand-en-Puisaye

**Festival Les Résistantes** – en août (tous les deux ans), quelque part en France

**La Grande Remontée de Loire** – en septembre, tous les deux ans (selon le vent !)

**Les Escales ligériennes** – chaque année, quelque part en bord de Loire

# 🔗 Ressources en interne

## → Documentaires



« **La marche de l'eau** »  
documentaire sonore de Laure Bourru, mis en image par Jean-Félix Fayolle (2023)



« **Là où remonte le fleuve** »  
documentaire sonore de Laure Bourru (2025)



« **Sentinelles de Loire** »  
documentaire audiovisuel de Laure Bourru (2026, en cours de réalisation)

## → Podcast



« **Le goût de l'eau** »  
podcast écrit et réalisé par Laure Bourru et Sébastien Rochard – 4 épisodes : Grandir, Habiter, Voyager, Lutter (2024)

## → Exposition



L'haleine de la rivière  
Parcours et exposition  
des Ursulines à la Loire

Le MAT  
Ancenis-Saint-Géron  
Chapelle des Ursulines

« **L'haleine de la rivière** »  
exposition collective à laquelle participent Amélie Patry, Clément Vuillier, Barbara Réthoré et Julien Chapuis (2025)

## → Écrits



« **Loire Sentinelle, remonter aux sources** »  
numéro spécial de la Ga(r)zette, journal édité par la Mission Val de Loire (2024)



« **L'appel du fleuve: la Loire en bande dessinée** »  
hors-série de la revue 303, avec des contributions de Tiphaine Crézé et Sébastien Rochard (2025)

Comme on le dit familièrement: « il y a de la ressource » dans le collectif Loire Sentinelle. De la ressource ou plutôt des histoires glanées et partagées au fil du fleuve, en images, en sons, en mots...

## → Médiation



« **(En)quête de Loire** »  
jeu de plateau imaginé et conçu par Barbara Réthoré et Julien Chapuis (2023 →)



« **Le labo des (micro) plastiques** »  
malle pédagogique imaginée par Barbara Réthoré et Julien Chapuis, conçue par l'atelier TACT (2023 →)



« **Radio Loire** »  
émission radio *in situ* et en antenne libre, imaginée et animée par Tiphaine Crézé, Sébastien Rochard et Laure Bourru (2022 →)

## → Formations



« **ADN environnemental, vers un nouvel indicateur de la santé des cours d'eau** »  
à partir de 2026



« **Microplastiques, vers un nouvel indicateur de la santé des cours d'eau** »  
à partir de 2026

## → Publications scientifiques

**Le Guernic & Croiset, et al. (2025).**

« First assessment of microplastic particles contamination using two complementary analysis methods from the source to the estuary of the Loire River, France. » *Environmental Science and Pollution Research*, article soumis pour publication.

**Croiset (2025).**

« Microplastiques dans le continuum terre-mer: que nous disent les sédiments sur la Loire? Apport d'une approche intégrée des processus hydro-sédimentaires d'une rivière. » Thèse de doctorat (Laboratoire Eau Environnement, Université Gustave Eiffel).

**Chapuis & Réthoré.**

« Loire Sentinelle: étude pilote de la biodiversité par l'analyse de l'ADN environnemental aquatique à l'échelle d'un continuum fluvial » *Naturae*, article en préparation.

Ressources disponibles ici



[natexplorers.fr/loire-sentinelle](https://natexplorers.fr/loire-sentinelle)

# Ours

## Loire Sentinelle un fleuve, une santé

– septembre 2025

→ **DIRECTION DE LA PUBLICATION,  
COORDINATION ÉDITORIALE ET RÉDACTION**  
Julien Chapuis et Barbara Réthoré

→ **DIRECTION ARTISTIQUE, DESIGN  
ET ILLUSTRATION**  
Violaine Avez assistée par Léa Pradine

→ **RELECTURE**  
Clara Arnaud, Tiphaine Crézé, Andreas Lemaire,  
Sébastien Rochard

→ **TYPOGRAPHIES**  
*Faune*, Alice Savoie / Cnap  
Matter, Martin Vácha

→ **ICONOGRAPHIE**  
**Illustrations :** couverture, p. 12-13, p. 32-33, p. 50-51  
et 3<sup>e</sup> de couverture © Clément Vuillier ;  
**Photographies :** p. 2 © Josselin Clair ;  
p. 11, p. 62 - 1 et 4, p. 63 © Jean-Félix Fayolle ;  
p. 18-19, p. 38-39, p. 53, p. 62 - 3 © Quentin Hulo ;  
p. 57 © Pierre-Yves Brunaud ;  
p. 62 - 2 © Laure Bourru

→ **IMPRESSION**  
Imprimé par Setig Abelia (Beaucouzé, 49, France)  
sur papier Nautilus SuperWhite 100 % recyclé  
blanc, 100 g/m<sup>2</sup>

→ **CITATION**  
Julien Chapuis et Barbara Réthoré. « Loire Sentinelle :  
un fleuve, une santé. Bilan de trois années  
d'enquête au fil de la Loire ». Natexplorers, 2025.

Pour toute demande, merci de nous écrire à :  
[loiresentinelle@natexplorers.fr](mailto:loiresentinelle@natexplorers.fr)

© 2025, [Natexplorers](https://natexplorers.fr). Tous droits réservés.

Ce rapport a reçu le soutien de l'État et de  
la préfète coordinatrice du bassin Loire-Bretagne



CONTRAT DE PLAN  
INTERRÉGIONAL  
ÉTAT-RÉGIONS

La réalisation et la diffusion de ce rapport  
n'auraient été possibles sans le soutien de la  
Fondation François Bel et de la Mission Val de Loire



FONDATION  
FRANÇOIS BEL  
INSTITUT DE FRANCE



### → REMERCIEMENTS

Depuis 2022, de nombreuses personnes  
et structures ont participé, de près ou de loin,  
à l'aventure Loire Sentinelle. Merci à elles !

**Partenaires institutionnels :** Agence de l'eau  
Loire-Bretagne, Mission Val de Loire, Département  
de Maine-et-Loire, Angers Loire métropole,  
Maison de l'environnement d'Angers, Ville  
de Chalonnes-sur-Loire, Ville des Ponts-de-Cé,  
Ville de Tours.

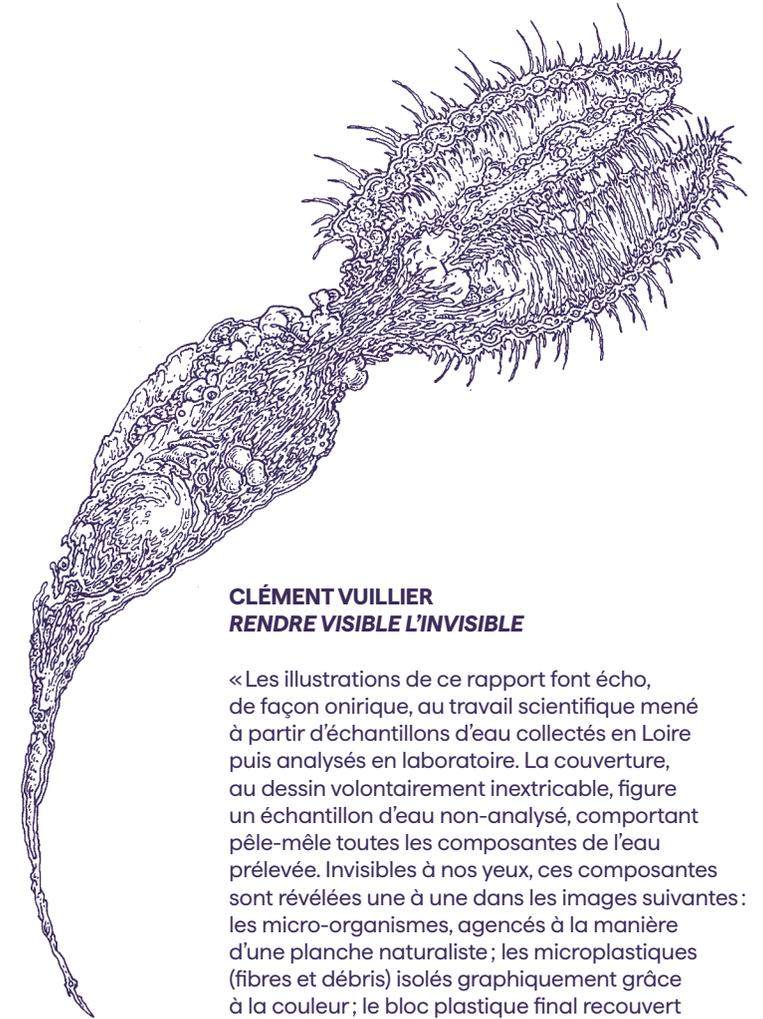
**Fondations, associations et collectifs :** Fondation  
François Bel, Fondation Danielle Mitterrand,  
Conserv-Action, SOS Loire Vivante, Bretagne  
Vivante, FNE Pays de la Loire, Sauvegarde de  
la Loire angevine, Surfrider France, Maison Julien  
Gracq, Loire Odyssée, clubs Rotary d'Angers,  
Polau, Voiles de Loire, La Rabouilleuse – École  
de Loire, collectif vers un parlement de Loire,  
La Bourse des Possibles du festival Les Rendez-  
vous de l'Aventure.

**Partenaires logistiques et matériels :** Patagonia,  
Nautiraid, Goal Zero, Petzl, Mekong, Kaloire,  
Canoe Company, Cap Aventure, Mondial Relay,  
Louet évasion, Reflex RSE, Biotyfood, Réthoré  
& Associés, Welko.

**Partenaires éducatifs :** Report'Cité, Passeurs  
d'images, Premiers plans.

**Partenaires médias :** Éditions 303, Agence  
Zeppelin.

**Partenaires nutrition :** Biocoop Symbiose,  
Biocoop Echo Nature, Tiboom, L'Chanvre.



### CLÉMENT VUILLIER RENDRE VISIBLE L'INVISIBLE

« Les illustrations de ce rapport font écho,  
de façon onirique, au travail scientifique mené  
à partir d'échantillons d'eau collectés en Loire  
puis analysés en laboratoire. La couverture,  
au dessin volontairement inextricable, figure  
un échantillon d'eau non-analysé, comportant  
pêle-mêle toutes les composantes de l'eau  
prélevée. Invisibles à nos yeux, ces composantes  
sont révélées une à une dans les images suivantes :  
les micro-organismes, agencés à la manière  
d'une planche naturaliste ; les microplastiques  
(fibres et débris) isolés graphiquement grâce  
à la couleur ; le bloc plastique final recouvert  
de microbes, formant ainsi un biofilm. »

Voir couverture, p. 12-13, p. 32-33 et p. 50-51

[natexplorers.fr/loire-sentinelle](https://natexplorers.fr/loire-sentinelle)



