



**HAL**  
open science

# Une cartographie réglementaire incohérente menace les rivières et les ruisseaux Français

Mathis Loïc Messenger, Hervé Pella, Thibault Datry

## ► To cite this version:

Mathis Loïc Messenger, Hervé Pella, Thibault Datry. Une cartographie réglementaire incohérente menace les rivières et les ruisseaux Français. 2024. hal-04699448

**HAL Id: hal-04699448**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04699448v1>**

Submitted on 16 Sep 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License



## Une cartographie réglementaire incohérente menace les rivières et les ruisseaux Français.

Mathis Loïc Messenger, Hervé Pella, Thibault Datry



## Auteurs

**Mathis Loïc Messenger\***, **Hervé Pella**, **Thibault Datry†**

Laboratoire EcoFlows, Unité de Recherche RiverLy, Département AQUA

Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation, et l'Environnement (INRAE)

Centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes

5 rue de la Doua, CS 20244

69625 Villeurbanne Cedex, France

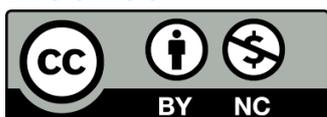
Contacts: \* [mathis.messenger@inrae.fr](mailto:mathis.messenger@inrae.fr), † [thibault.datry@inrae.fr](mailto:thibault.datry@inrae.fr)

## Citation

Ce rapport est une traduction d'un article scientifique publié dans la revue *Environmental Science & Technology* le 19 Septembre 2024. En cas d'utilisation, veuillez citer la version originale :

Messenger, M. L., Pella, H., & Datry, T. (2024). Inconsistent regulatory mapping quietly threatens rivers and streams. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c01859>

## License



Ce rapport est soumis à la licence CC-by-nc 4.0, ce qui permet toute exploitation (partager, copier, reproduire, distribuer, communiquer, réutiliser, adapter) par tous moyens, sous tous formats et sous toutes licences. Toutes les exploitations de l'œuvre ou des œuvres dérivées, sauf à des fins commerciales, sont possibles. Les obligations liées à la licence sont donc de créditer les auteurs, d'en indiquer les sources (voir citation ci-dessus) et d'indiquer si des modifications ont été effectuées (obligation d'attribution) ; ne pas tirer profit (gain direct ou plus-value commerciale) de l'œuvre ou des œuvres dérivées.

## Remerciements

Nous remercions tous les employés des Directions Départementales des Territoires (DDTs) et de l'Office Français de la Biodiversité (OFB), ainsi que toutes les parties prenantes qui ont collecté et partagé des données pour ce projet, ainsi que leurs nombreux commentaires dans nos communications. MLM a bénéficié d'une bourse d'études Vanier (du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada) et d'une bourse de doctorat de l'EUR H2O'Lyon (de l'Université de Lyon, subvention n° ANR-17-EURE-0018, dans le cadre du programme "Investissements d'Avenir " géré par l'Agence Nationale de la Recherche). Pendant la conduite de cette étude, MLM était également affilié à l'Université McGill.



**McGill**



**H<sub>2</sub>O'Lyon**  
Université de Lyon

# Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Résumé .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>Introduction.....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>Méthodologie .....</b>  | <b>8</b>  |
| 1.1. Contexte de l'étude de cas : cartographie réglementaire des cours d'eau en France.....      | 8         |
| 1.2. Assembler la première carte nationale des cours d'eau au titre de la Loi sur l'eau .....    | 9         |
| 1.3. Comparaison avec d'autres sources de données.....   | 10        |
| 1.4. Analyse des corrélats du ratio de densité de drainage.....                                  | 11        |
| 1.5. Évaluation des implications pour la structure du réseau fluvial .....                       | 13        |
| <b>Résultats et Discussion .....</b>   | <b>14</b> |
| 1.6. Une carte réglementaire complète mais incohérente des cours d'eau .....                     | 14        |
| 1.7. Les corrélats du ratio de densité de drainage mettent en lumière des critères inégaux ..... | 17        |
| 1.8. Une définition vague met les eaux vulnérables en danger.....                                | 20        |
| 1.9. L'hydrographie est sociale et politique .....   | 22        |
| 1.10. Limitations et incertitudes .....  | 25        |
| 1.11. Les leçons de la France et des Etats-Unis pour le reste du monde.....                      | 26        |
| <b>Informations supplémentaires.....</b>   | <b>28</b> |
| <b>References.....</b>   | <b>28</b> |

## Résumé

Même la législation environnementale la plus stricte ne peut protéger un cours d'eau si ses affluents restent exposés à la pollution et à d'autres menaces en amont. Exclure un sous-ensemble de cours d'eau de protection juridique menace donc d'altérer les écosystèmes d'eau douce de réseaux fluviaux entiers et les services qu'ils fournissent, tels que l'eau potable et la régulation des crues. Une attention considérable a été accordée à la définition du champ d'application des lois environnementales protégeant les cours d'eau. Cependant, la manière dont ces définitions sont mises en œuvre par le biais de la cartographie réglementaire, c'est-à-dire la cartographie des masses d'eau qui sont légalement considérées comme des cours d'eau et donc protégées, n'a pas été étudiée en dehors des États-Unis. Nous démontrons ici les conséquences de la cartographie réglementaire sur l'étendue des réseaux hydrographiques protégés, en utilisant la France comme étude de cas. En assemblant la première carte des cours d'eau français protégés au titre de la Loi sur l'eau, nous estimons qu'un quart des segments hydrographiques précédemment cartographiés ont été exclus, et constatons de fortes variations géographiques dans l'étendue des écosystèmes protégés. Les segments de tête de bassin et les segments non pérennes sont disproportionnellement exclus de 28% par rapport à leur prévalence (67 %) dans l'ensemble du réseau hydrographique, avec des implications potentiellement considérables pour la biodiversité et les populations humaines. Nous nous attendons à ce que les cadres réglementaires de la plupart des pays soient également sensibles à l'interprétation locale des définitions juridiques.

**Synopsis :** La mise en œuvre inégale des lois environnementales à travers la cartographie réglementaire des cours d'eau peut entraîner des lacunes critiques dans la protection des rivières et des ruisseaux, menaçant des écosystèmes vulnérables et leurs contributions au bien-être humain.

## Introduction

Les rivières et les ruisseaux constituent le tissu même des sociétés humaines, et vice versa. Les structures sociales ont évolué à partir des réseaux fluviaux et y sont toujours étroitement liées<sup>1-3</sup>. Encore aujourd'hui, les eaux courantes sont essentielles pour répondre aux besoins basiques et pour le bien-être, les moyens de subsistance et les cultures des populations humaines<sup>4-6</sup>. En même temps, les rivières et les ruisseaux sont des éléments hybrides du paysage, à la fois sociaux et naturels<sup>7,8</sup>. Aucun cours d'eau sur Terre n'échappe aux effets du changement climatique et des changements d'usage des terres, de la régulation des rivières, de la canalisation, de la pollution de l'eau ou des espèces non indigènes, parmi d'autres impacts humains<sup>9,10</sup>. Et ce que les gens perçoivent comme un cours d'eau n'est pas seulement le fruit du climat ou de la géologie, mais reflète également l'histoire locale, la culture et la politique<sup>8,11,12</sup>.

La nature complexe des rivières et des ruisseaux est bien illustrée par les longues disputes qui suivent les tentatives de les définir d'un point de vue juridique<sup>13-16</sup>. Aux États-Unis, par exemple, la question des masses d'eau protégées par le *Clean Water Act* (CWA, 1972), l'instrument fédéral principal pour la protection des écosystèmes d'eau douce dans le pays<sup>13</sup>, reste encore intensément débattue un demi-siècle après son adoption. Le CWA est la politique environnementale qui a conduit au plus grand nombre de cas devant la Cour suprême des États-Unis<sup>17</sup>, et les changements successifs apportés à son champ d'application juridictionnel (quatre au cours des 18 dernières années) ont occupé une place importante dans la littérature scientifique<sup>14,18,19</sup>. Des débats similaires sur la définition juridique des cours d'eau ont lieu dans le monde entier<sup>15,16</sup>, mais les implications de ces définitions et de leur interprétation sur l'efficacité des politiques environnementales n'ont pas été examinées en dehors des États-Unis.

Définir juridiquement ce qu'est un cours d'eau implique des compromis et peut avoir des conséquences de grande portée pour l'hydrologie, la physico-chimie et la biologie des écosystèmes d'eau douce, ainsi que pour les services essentiels qu'ils fournissent à la société, y compris l'eau potable et la régulation des inondations<sup>5</sup>. Dans la plupart des pays, une fois qu'une dépression linéaire est juridiquement qualifiée de cours d'eau, de nombreuses activités dans et autour de celle-ci deviennent soumises à réglementation (par exemple, la modification des berges nécessitant des autorisations) ou sont totalement interdites (par exemple, l'application de pesticides dans une zone tampon). À l'inverse, exclure un cours d'eau de la protection légale exonère les propriétaires riverains et d'autres utilisateurs de la plupart des réglementations. Soumettre même un sous-ensemble limité du réseau fluvial à la dégradation peut avoir un impact considérable sur la qualité de l'eau et les écosystèmes ailleurs dans le bassin<sup>20-22</sup>. En effet, presque tous les segments du réseau sont hydrologiquement connectés, soit longitudinalement avec l'écoulement en aval, soit verticalement avec les eaux souterraines<sup>23,24</sup>. Une définition étroite des cours d'eau risque donc d'exposer une grande partie des réseaux fluviaux à la dégradation, menaçant la résilience des bassins versants dans leur ensemble et les populations qui en dépendent<sup>23,25</sup>. Aux États-Unis, par exemple, un décret de la Maison Blanche de 2020 a déréglementé plus d'un million de kilomètres de ruisseaux et 30 % des masses d'eau douce autour des sources d'eau potable<sup>19</sup>. Être trop inclusif dans la définition des cours d'eau, en revanche, peut entraîner une lourde

charge administrative pour les régulateurs et la communauté réglementée, ainsi qu'une réduction contestée des terres adaptées à l'agriculture conventionnelle, au développement immobilier et à d'autres utilisations intensives des terres<sup>16,26</sup>. Pour alléger la charge associée à la Directive-Cadre sur l'Eau (DCE) de l'Union européenne, par exemple, les États membres ont été autorisés à exclure les ruisseaux en tête de bassin avec un bassin versant de moins de 10 km<sup>2</sup> de leurs plans de gestion des bassins hydrographiques<sup>27</sup>. Ce qui compte juridiquement comme un cours d'eau reflète donc à la fois les perceptions culturelles<sup>16</sup> et l'équilibre entre plusieurs valeurs sociétales parfois conflictuelles attribuées aux rivières et aux ruisseaux<sup>28</sup>.

Les définitions réglementaires des cours d'eau ont deux éléments principaux en commun à travers les juridictions du monde entier : (i) la présence d'un lit reconnaissable, généralement d'origine naturelle (même s'il a été modifié par la suite), et (ii) la présence d'eau courante au moins une partie de l'année (voir le *Tableau Supplémentaire 1*). À la connaissance des auteurs, aucune étude académique à ce jour n'a systématiquement comparé les définitions réglementaires des cours d'eau dans plusieurs pays (mais voir <sup>15</sup>). Cependant, un examen sommaire des définitions juridiques à travers les continents (voir le *Tableau Supplémentaire 1* pour un échantillon de transcriptions) suggère que les fossés, canaux et conduites d'origine humaine, ainsi que les ruisseaux éphémères qui ne coulent qu'après des précipitations, ne sont pas considérés comme des cours d'eau protégés par les politiques environnementales dans la plupart des pays<sup>14,16,18</sup>. Par exemple, la Queensland Water Act en Australie stipule qu'un "cours d'eau est une rivière, un ruisseau ou un autre cours d'eau, [...], dans lequel l'eau coule en permanence ou de manière intermittente, quelle que soit la fréquence des événements de débit (a) dans un chenal naturel, qu'il soit modifié ou non ; ou (b) dans un chenal artificiel qui a modifié le cours du cours d'eau [...]. Cependant, un cours d'eau n'inclut pas un élément de drainage"<sup>29</sup>, qui est "un élément naturel du paysage, y compris un ravin, un drain, une dépression de drainage ou un autre relief d'érosion qui (i) est formée par la concentration ou fonctionne pour confiner ou concentrer l'écoulement des eaux de surface pendant et immédiatement après les événements de précipitation ; et (ii) coule pendant une courte durée après un événement de précipitation, quelle que soit la fréquence des événements de débit ; et (iii) généralement, n'a pas un débit continu suffisant pour créer un environnement riverain"<sup>30</sup>.

Déterminer si une dépression constitue un lit et où se trouve sa limite amont peut être discutable<sup>31</sup>, mais les désaccords surviennent plus souvent quant à ce que signifie "naturel", et à la fréquence à laquelle l'eau doit être présente dans un lit pour qu'un écoulement ne soit pas considéré comme éphémère. Les humains ont modifié le drainage des eaux directement (par exemple, par dérivation, canalisation, tuyauterie, remblaiement) ou indirectement (par exemple, par changement d'utilisation des terres et changement climatique) pendant des centaines voire des milliers d'années dans de nombreuses régions, remodelant des paysages fluviaux entiers<sup>32</sup>. Par exemple, 100 000 moulins à eau avaient été construits le long des rivières françaises à la fin du XVIIIe siècle<sup>33</sup> ; 97,8 % de la longueur totale des ruisseaux au Danemark ont été canalisés<sup>34</sup>. Par conséquent, des cartes de l'hydrographie "naturelle", avant transformation, de la plupart des régions n'existent pas et, en tout cas, donneraient une vision erronée et statique des paysages en constante évolution<sup>32</sup>. En outre, chaque réseau fluvial comprend des segments intermittents et éphémères<sup>24</sup> qui fournissent des services écosystémiques

précieux, mais la plupart sont indifférenciés, mal catégorisés ou absents des cartes topographiques<sup>35-37</sup>. En conséquence, pour déterminer si un cours d'eau est intermittent ou éphémère, il est nécessaire d'effectuer des visites sur le terrain pour observer le débit plusieurs jours après la dernière pluie pendant une période humide de l'année<sup>38</sup> (bien que des proxys de la durée du débit soient couramment utilisés<sup>39</sup>). En résumé, les deux critères – de naturalité et de permanence du débit – laissent place à l'interprétation et nécessitent souvent une visite sur le terrain.

**L'objectif de cette étude était d'examiner les implications de la définition légale et de la cartographie réglementaire des cours d'eau sur l'étendue des réseaux fluviaux protégés par les lois environnementales, en utilisant la France comme étude de cas.** La cartographie réglementaire implique la création d'un inventaire cartographique qui identifie quelles masses d'eau, indépendamment de leur présence sur les cartes topographiques existantes, sont légalement qualifiées de cours d'eau et sont donc soumises à une protection juridique. Nous présentons la première carte réglementaire des cours d'eau relevant de la Loi sur l'eau en France, montrons quantitativement que la stratégie de cartographie associée a conduit à une protection incohérente des cours d'eau, et explorons les facteurs socio-environnementaux potentiels influençant ces différences géographiques dans les cartes réglementaires des cours d'eau. Nous montrons ensuite comment les cartes réglementaires des cours d'eau en France excluent de manière disproportionnée les ruisseaux non pérennes et les tronçons en tête de bassin, que nous désignons collectivement comme des eaux vulnérables en raison de leur sensibilité à la dégradation (selon <sup>25,40-42</sup>). À la lumière de la littérature scientifique, nous discutons de la manière dont l'exposition des eaux vulnérables à la dégradation peut altérer l'état écologique des écosystèmes d'eau douce (c'est-à-dire leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques et leurs processus) et leur contribution aux sociétés dans des réseaux fluviaux entiers. Enfin, nous comparons nos résultats à des analyses menées aux États-Unis, le seul autre pays où une évaluation similaire existe, et plaidons pour des recherches dans d'autres pays afin d'examiner la mise en œuvre des cadres réglementaires pour la protection des cours d'eau et ses implications pour la santé des écosystèmes et des populations.

# Méthodologie

## 1.1. Contexte de l'étude de cas : cartographie réglementaire des cours d'eau en France

La Loi sur l'eau est un pilier de la politique environnementale pour la protection des écosystèmes d'eau douce en France. Lorsqu'un cours d'eau est protégé par la Loi sur l'eau, toutes les installations, constructions, ouvrages ou activités sur ou à proximité de ce cours d'eau sont soumises à une autorisation environnementale s'ils peuvent présenter des risques pour la santé et la sécurité publiques, entraver le libre écoulement de l'eau, diminuer la ressource en eau, augmenter considérablement le risque d'inondation, ou porter gravement atteinte à la qualité ou à la diversité du milieu aquatique (article L.214-3 du Code de l'environnement). Pourtant, ce qui caractérise un cours d'eau au regard de la Loi sur l'eau n'était pas défini jusqu'à récemment. Ce n'est qu'en 2015 qu'une instruction du gouvernement a fourni une définition formelle (traduite en anglais dans *Méthodes Supplémentaires Section 1*), désormais inscrite légalement dans le Code de l'environnement français ; un cours d'eau se définit légalement par trois critères cumulatifs : 1. posséder un lit d'origine naturelle (c'est-à-dire même s'il a été modifié par la suite), 2. être alimenté par une source autre que les précipitations seules, et 3. avoir un "débit suffisant une majeure partie de l'année" – l'écoulement peut être intermittent, compte tenu des conditions hydroclimatiques locales (article L.215-7-1 du Code de l'environnement ; *Tableau Supplémentaire 1*).

Cette codification visait à apaiser les tensions croissantes entre la police de l'eau, les agriculteurs, les municipalités et les organisations environnementales, qui conduisaient fréquemment à des litiges<sup>38,43,44</sup>. En plus de définir les cours d'eau, la directive de 2015 a chargé les services déconcentrés de l'État à l'échelon départemental (directions départementales des Territoires, DDTs) de créer des cartes exhaustives des cours d'eau sur leur territoire. Chaque département devait élaborer et mettre en œuvre en collaboration avec les parties prenantes un protocole de cartographie locales pour différencier les cours d'eau des fossés, canaux et ruisseaux éphémères. L'objectif de ce processus décentralisé était de promouvoir une approche locale "pragmatique" assurant l'adhésion des parties prenantes et tenant compte des variations de géographie, de climat et d'usages de l'eau entre les régions<sup>43</sup>. Depuis lors, plusieurs rapports gouvernementaux et journalistiques ont mentionné anecdotiquement que de grandes portions du réseau hydrographique étaient disqualifiées en tant que "non-cours d'eau" dans certains départements<sup>45,46</sup>. Cependant, les cartes réglementaires départementales des cours d'eau n'ont jamais été compilées, y compris par l'Etat, de sorte qu'aucune carte nationale n'existe et qu'une évaluation complète des implications de cette cartographie fait toujours défaut.

L'instruction gouvernementale de 2015 a établi des lignes directrices générales pour encadrer les protocoles de cartographie des départements (traduites en anglais dans *Méthodes Supplémentaires Section 1*), et plusieurs régions administratives (par exemple, la région Occitanie ou Nouvelle-Aquitaine) ont affiné ces lignes directrices pour rechercher une cohérence dans leur application au contexte régional. À travers la France, les départements ont d'abord compilé les sources existantes de données hydrographiques et identifié les cours d'eau dont le statut était soit évident (par exemple, les

grandes rivières et leurs affluents), soit consensuel (par exemple, établi par d'autres réglementations). Ensuite, ils ont déterminé quels segments hydrographiques non catégorisés pouvaient qualifier de cours d'eau – ce processus est encore en cours dans de nombreux départements. Les départements ont utilisé des méthodes cartographiques et des visites sur le terrain pour évaluer les critères juridiques définissant les cours d'eau, souvent en collaboration avec des agences gouvernementales comme l'Office Français de la Biodiversité (OFB) et des parties prenantes tels que des agriculteurs ou des représentants de syndicats agricoles. Nous avons compilé toutes les informations officielles et publiquement disponibles sur ce processus pour chaque département, mais la quantité de documentation diffère considérablement entre les départements, et le degré d'implication des divers acteurs est rarement détaillé. La cartographie progressait généralement en consultation régulière avec les parties prenantes pour valider et publier des cartes intermédiaires. Aucune action légale ne peut être intentée contre les cartes résultantes, mais des demandes peuvent être faites pour les vérifier ou les modifier.

En langage courant, le terme "cours d'eau" désigne généralement tous les corps d'eau courante. Cependant, pour plus de clarté, nous différencions ici les termes "rivières et ruisseaux", "segment hydrographique" et "cours d'eau" : "rivières et ruisseaux" se réfère à tous les corps d'eau courante d'origine naturelle, quel que soit leur statut juridique ; "segment hydrographique" inclut tous les corps d'eau courante représentés sur les cartes topographiques, quel que soit leur statut juridique et leur naturalité (c'est-à-dire y compris les rivières et ruisseaux ainsi que les canaux, fossés, etc.) ; "cours d'eau" se réfère exclusivement aux rivières et ruisseaux déterminés comme étant protégés par la Loi sur l'eau en France. "Cours d'eau" est le terme utilisé dans la Loi sur l'eau, mais aussi un terme juridique courant utilisé dans les politiques environnementales de nombreux pays anglophones (*watercourse* au Canada, en Australie, et en Afrique du Sud par exemple; *Tableau Supplémentaire 1*). Le champ d'application de la Loi sur l'eau diffère de celui de plusieurs autres lois régissant les eaux courantes en France, comme les règles de bonnes conditions agricoles et environnementales du code rural et de la pêche maritime (article D615-46; *Tableau Supplémentaire 1*). Néanmoins, cette nouvelle cartographie remplace ou complète les cartes utilisées pour faire appliquer plusieurs autres lois. Tout au long, nous utilisons le terme "département" pour désigner à la fois l'entité administrative et l'étendue géographique d'un département.

## 1.2. Assembler la première carte nationale des cours d'eau au titre de la Loi sur l'eau

Pour assembler une carte nationale des cours d'eau relevant de la Loi sur l'eau, nous avons d'abord compilé 91 cartes réglementaires individuelles de cours d'eau sous forme de couches vectorielles SIG produites par le service cartographique de chaque département à travers la France métropolitaine (**Figure 1**). En novembre 2023, tous les départements sauf un ont fourni une carte réglementaire des cours d'eau en ligne, et 74 (79%) ont fourni un accès en ligne aux données sous-jacentes ; 20 ont entièrement exclu les non-cours d'eau des cartes. Par conséquent, nous avons individuellement contacté les départements pour demander soit l'ensemble du jeu de données (s'il n'était pas disponible en ligne), soit seulement les segments exclus, soit pour confirmer la mise à jour du jeu de

données (voir *Méthodes Supplémentaires Section 2* pour plus d'information sur cette compilation).

Les jeux de données départementaux des cours d'eau protégés par la Loi sur l'eau étaient disponibles dans des formats très différents, avec des niveaux de détail variés dans les métadonnées et le contenu, nous avons donc individuellement inspecté, contrôlé la qualité et harmonisé tous les jeux de données avant de les fusionner. Les jeux de données qui différaient par leur type géométrique (certains incluaient des cours d'eau sous forme de polygones représentant des zones tampons autour de chaque segment), leur système de coordonnées projetées, leur encodage de caractères, leur nommage de fichiers et leur format de fichier (par exemple, .TAB, .shp) ont tous été harmonisés. Les entités géométriques corrompus et invalides ont été identifiés et supprimés. Si deux tronçons se chevauchaient complètement géographiquement, nous avons conservé celui avec le plus d'attributs (c'est-à-dire les informations auxiliaires associées à chaque tronçon dans les cartes numériques), et l'autre a été supprimé. Les attributs associés aux données variaient également, avec un total de 733 noms d'attributs uniques parmi tous les jeux de données. Nous avons harmonisé les noms des attributs pour un ensemble limité d'attributs essentiels pour l'analyse ultérieure, comme le statut attribué au segment hydrographique sous la Loi sur l'eau, le statut de permanence de l'écoulement du segment (c'est-à-dire pérenne ou intermittent) et la méthode de caractérisation du segment (par exemple, cartographie, expertise de terrain). Enfin, comme les différentes catégories au sein de chaque attribut n'étaient pas cohérentes d'un jeu de données à l'autre, nous avons créé un ensemble harmonisé de valeurs possibles pour chaque attribut en suivant les directives de formatage fournies aux départements par l'Office National de la Biodiversité (OFB) et l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN)<sup>47</sup>. Pour l'attribut décrivant le statut des segments hydrographiques au nom de la Loi sur l'eau, par exemple, un total de 139 noms de catégories uniques existait parmi les cartes départementales, que nous avons convertis en 5 catégories possibles : cours d'eau, non-cours d'eau (c'est-à-dire ne se qualifiant pas comme cours d'eau au titre de la police de l'eau), non catégorisé, inexistant et hors du département. Après avoir supprimé toutes les lignes situées en dehors du département auquel elles étaient associées, nous avons fusionné toutes les cartes départementales pour produire une seule carte nationale. Nous n'avons pas inclus la région parisienne (0,1% de la superficie de la France métropolitaine) dans les analyses ultérieures car elle représente une anomalie avec plus de 90% de couverture imperméable et un drainage de surface minimal.

### 1.3. Comparaison avec d'autres sources de données

Nous avons évalué la cohérence des cartes réglementaires des cours d'eau entre et au sein des départements en comparant la longueur des cours d'eau par unité de surface (c'est-à-dire la densité de drainage) dans ces cartes avec les principales bases hydrographiques utilisées par les départements pour la cartographie des cours d'eau. Avant la cartographie des cours d'eau par les départements aux fins de la Loi sur l'eau, deux principaux jeux de données hydrographiques existaient déjà en France : BD TOPO et BD Carthage. Aucun des deux n'était officiellement considéré comme une référence nationale à des fins juridiques car ils n'étaient pas suffisamment exhaustifs (omettant environ 10-30% du réseau de drainage selon la zone)<sup>47</sup>. Ils ne permettaient pas non plus une évaluation complète des

critères d'identification des cours d'eau par analyse cartographique. Notamment, aucun jeu de données ne différencie systématiquement les cours d'eau des fossés ou des canaux, ou si leur régime d'écoulement est intermittent ou éphémère (ce dernier régime étant disqualifiant). Néanmoins, BD TOPO a été utilisé par les départements comme point de départ pour la cartographie des cours d'eau, à compléter par BD Carthage et une analyse au cas par cas avec d'autres sources cartographiques (c'est-à-dire des cartes topographiques scannées, des cartes cadastrales actuelles et historiques) et des expertises de terrain. Nous fournissons une description des caractéristiques et des limites de ces jeux de données dans *Méthodes Supplémentaires Section 3* et dans la section *Discussion Limitations et Incertitudes*.

Nous avons quantifié la différence de densité de drainage entre les cartes départementales des cours d'eau et BD TOPO (version 151 de 2015)<sup>48</sup> en calculant le ratio de densité de drainage entre les deux (en excluant les sous-bassins avec des données manquantes, représentant 3,4 % de la superficie du pays ; voir *Méthodes Supplémentaires Section 4* pour les détails sur l'identification de ces sous-bassins). Nous nous sommes concentrés sur ce ratio de densité de drainage (RDD) parce que 36 (40 %) départements n'ont pas fourni de données sur les non-cours d'eau ou ont fourni des données partielles (c'est-à-dire que certains ou tous les segments hydrographiques présents sur les cartes sources jugés non qualifiés comme cours d'eau ont été retirés de la carte réglementaire résultante plutôt que marqués comme « non-cours d'eau ») et parce que la densité de drainage varie naturellement selon les régions<sup>49</sup>. Nous ne nous attendions donc pas à des densités de drainage constantes entre et au sein des départements. Le RDD fournit également une mesure indépendante de l'échelle pour comparer les départements ou les sous-bassins, indépendamment des différences de longueur totale du réseau – représentant ainsi une mesure de déviation plutôt qu'une longueur absolue du réseau. Nous avons conservativement supposé dans nos résultats principaux que les segments classifiés comme non catégorisés par les départements seraient considérés comme des cours d'eau. Pour comprendre les variations de RDD à plusieurs échelles, nous avons analysé le RDD à la fois entre les départements (superficie moyenne :  $6 \times 10^3$  km<sup>2</sup>) et parmi les sous-bassins de taille homogène au sein des départements (superficie moyenne : 67 km<sup>2</sup>). Par conséquent, le RDD pour un sous-bassin ou un département donné (excluant les sous-bassins cartographiés de manière incomplète) était simplement calculé comme suit :

$$RDD = \frac{\sum \text{longueur du tronçon}_{\text{cours d'eau}} + \sum \text{longueur du tronçon}_{\text{non-catégorisé}}}{\sum \text{longueur du tronçon}_{BD\ TOPO}}$$

## 1.4. Analyse des corrélats du ratio de densité de drainage

Nous avons quantifié les relations entre le RDD et divers facteurs socio-environnementaux à l'aide de modèles de régression à nos deux échelles d'analyse : entre les départements et parmi les sous-bassins au sein des départements (voir les *Sections 5 à 7 des Méthodes Supplémentaires* pour une description complète de la méthodologie). Notre objectif était de comprendre les mécanismes potentiels à l'origine des différences observées de RDD entre les départements, et les différentes manières dont les critères

d'identification étaient appliqués pour identifier les cours d'eau à travers les départements. Par exemple, une forte relation négative entre l'aridité et le RDD parmi les sous-bassins d'un département indiquerait une importance particulière accordée dans ce département au critère de permanence de l'écoulement pour différencier les cours d'eau des non-cours d'eau (et probablement un gradient prononcé d'aridité à travers le département). Des relations fortement contrastées entre les départements suggèrent une différence potentielle dans l'application de ce critère.

Pour réaliser cette analyse, nous avons d'abord extrait 20 variables pour chaque sous-bassin, décrivant les couvertures terrestres anthropiques (c'est-à-dire agriculture, zone imperméable), l'irrigation, la densité de population, la densité des obstacles à l'écoulement, la texture du sol, la pente et l'aridité. Le *Tableau Supplémentaire 2* détaille la source de chaque jeu de données et la *Section 5 des Méthodes Supplémentaires* décrit chaque jeu de données et comment il a été préformaté pour calculer les statistiques récapitulatives pour chaque sous-bassin. Ces jeux de données ont été sélectionnés pour deux raisons. Premièrement, parce que nous avons émis l'hypothèse que les variables associées pourraient influencer la proportion de tronçons hydrographiques considérées comme des non-cours d'eau, et deuxièmement en raison de leur disponibilité à une résolution et une cohérence suffisantes à travers la France. Nous avons utilisé des variables socio-environnementales spécifiques plutôt que toutes les variables potentiellement expliquant la densité absolue de drainage à travers le paysage, car notre focus était sur les déviations de la densité de drainage par rapport au jeu de données hydrographiques de référence BD TOPO. Nous nous sommes particulièrement concentrés sur les facteurs susceptibles d'affecter les critères utilisés pour identifier les cours d'eau : la naturalité du lit et la permanence de l'écoulement. Nous avons donc sélectionné des variables reflétant le degré d'altération du paysage fluvial (couverture terrestre, irrigation, densité des obstacles et de la population) ainsi que la prévalence relative des rivières et ruisseaux non pérennes (aridité, pente, prévalence prévue de l'intermittence de l'écoulement, capacité de stockage d'eau dans le sol, irrigation et prélèvements d'eau ; *Tableau Supplémentaire 2*).

Pour examiner la relation entre le RDD et les facteurs socio-environnementaux entre les départements, nous avons développé un modèle de régression unique. Pour analyser le RDD parmi les sous-bassins au sein des départements, nous avons développé des modèles de régression pour des groupes de départements. Nous avons d'abord examiné les coefficients de corrélation de rang de Spearman entre chaque variable socio-environnementale et les ratios de densité de drainage parmi les sous-bassins dans chacun des 90 départements (**Figure 3**). Nous avons ensuite identifié statistiquement les groupes de départements affichant des valeurs de coefficient de corrélation similaires entre toutes les variables prédictives. Enfin, nous avons développé un modèle de régression pour chacun de ces groupes. Cette catégorisation visait à obtenir une compréhension générale des différents ensembles de relations présentes dans le jeu de données, compte tenu du grand nombre de départements (90), de sous-bassins (6523) et de variables (20), et à rechercher d'éventuels motifs géographiques dans ces relations. Elle nous a également permis de ne pas développer 90 modèles individuels (un pour chaque département) ni de construire un modèle unique pour tous les départements (voir la *Section 7 des Méthodes Supplémentaires* pour plus de détail sur cette approche de modélisation). Pour chaque modèle, nous avons testé les intercepts spécifiques aux départements ainsi que les interactions à effets fixes

entre départements et prédicteurs pour permettre des coefficients spécifiques aux départements. Les modèles de régression ont été développés par sélection manuelle des modèles et diagnostics standard<sup>50,51</sup> (*Sections 6 et 7 des Méthodes Supplémentaires*).

## 1.5. Évaluation des implications pour la structure du réseau fluvial

Nous avons analysé les impacts potentiels de l'exclusion de segments des cartes des cours d'eau sur la structure des réseaux fluviaux de deux manières.

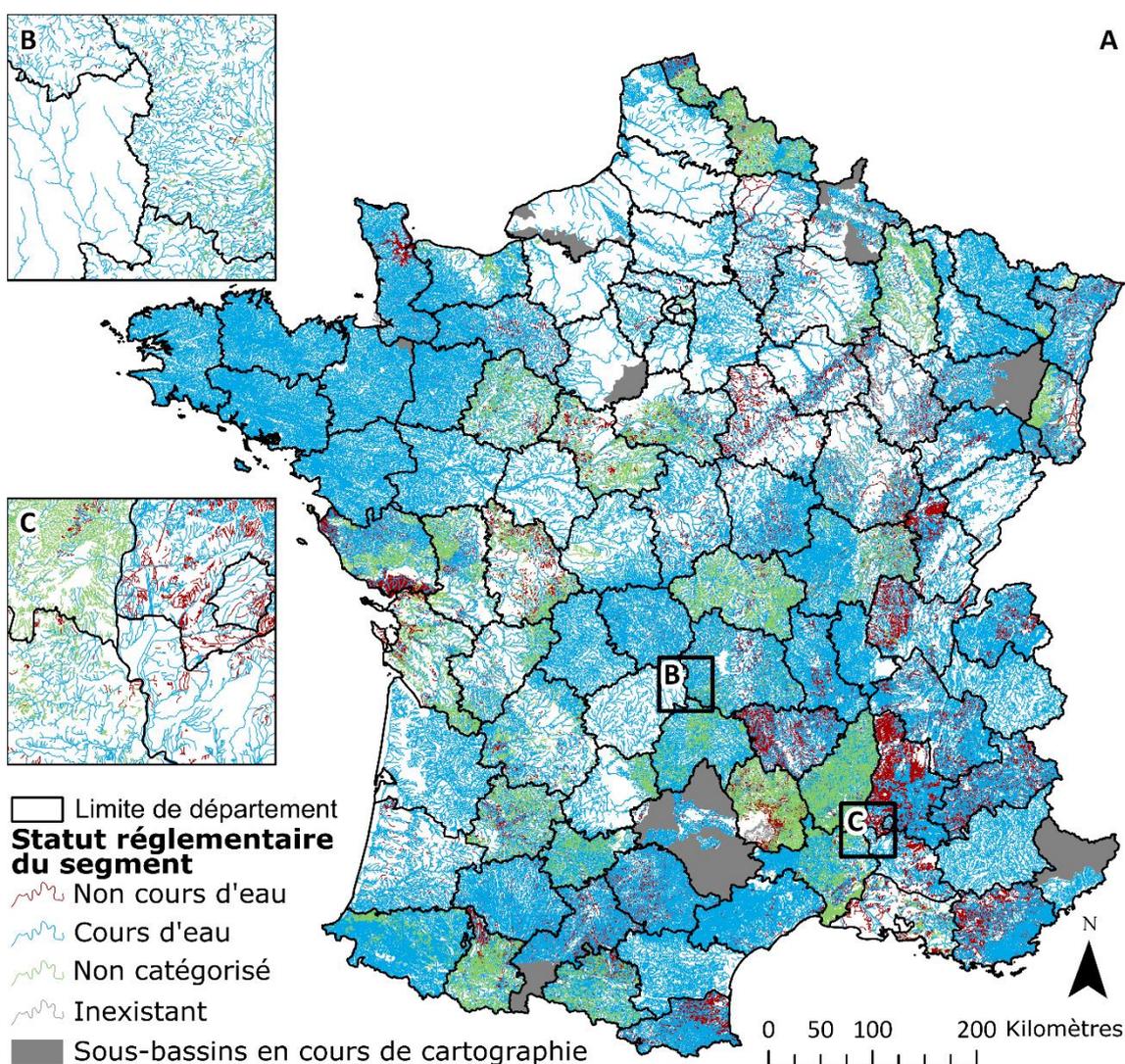
Tout d'abord, nous avons estimé la proportion de segments de tête de bassin et non pérennes exclus des cartes. Nous définissons les segments de tête de bassin comme des segments hydrographiques d'ordre de Strahler un (c'est-à-dire des tronçons de premier ordre). Les segments non pérennes ont été identifiés à partir des attributs associés aux tronçons dans les cartes départementales des cours d'eau, BD TOPO et BD Carthage. Un traitement de données substantiel a été nécessaire pour effectuer ces analyses et une certaine incertitude persiste quant à ces résultats ; voir les *Sections 3, 8 et 9 des Méthodes Supplémentaires* pour la description détaillée de cette analyse. Nous avons ensuite calculé la représentativité comme une mesure de la sur- ou sous-représentation de certains types de segments parmi les non-cours d'eau. La représentativité des segments de premier ordre parmi les non-cours d'eau a été calculée comme le ratio entre le pourcentage de longueur de non-cours d'eau d'ordre premier et le pourcentage de la longueur totale du réseau d'ordre premier. La représentativité des segments non pérennes parmi les non-cours d'eau a été calculée comme le ratio entre le pourcentage de longueur de non-cours d'eau qui est intermittent par rapport au pourcentage total de longueur du réseau intermittent. Enfin, la représentativité des eaux vulnérables parmi les non-cours d'eau a été calculée comme le ratio entre le pourcentage de longueur de non-cours d'eau qui est soit intermittent soit de premier ordre (ou les deux) par rapport au pourcentage total de longueur du réseau qui est soit intermittent soit de premier ordre (ou les deux).

Deuxièmement, nous avons analysé la fragmentation potentielle du réseau résultant des non-cours d'eau et des segments non catégorisés en identifiant les segments individuels entourés d'autres segments d'une catégorie différente – par exemple, les cours d'eau entourés de non-cours d'eau (c'est-à-dire des segments isolés), ou les non-cours d'eau entourés de cours d'eau (c'est-à-dire des segments fragmentants). En raison des limites des réseaux géométriques en termes de topologie et de données manquantes sur les non cours d'eau (voir la *Section 8 des Méthodes Supplémentaires*), cette analyse n'a été possible que pour un sous-ensemble des segments. De plus, nous avons exclu tous les segments isolés ou fragmentants situés à moins de 10 m d'un plan d'eau. En effet, de nombreuses cartes départementales ont attribué la même catégorie à tous les segments traversant ou se trouvant à proximité d'un plan d'eau (certains départements les ont tous classifiés comme non catégorisés ou tous comme cours d'eau, etc.) indépendamment des segments environnants, même si ces segments hydrographiques ne correspondent pas à un véritable tronçon sur le terrain et que les cartes réglementaires des plans d'eau sont distinctes des cartes des cours d'eau.

## Résultats et Discussion

### 1.6. Une carte réglementaire complète mais incohérente des cours d'eau

La cartographie réglementaire des cours d'eau en France représente un effort monumental par les départements. En 2023, la carte nationale des cours d'eau couvre 93 % de la France métropolitaine et comprend 2,2 millions de segments totalisant 680 000 kilomètres (**Figure 1**). En comparaison, le réseau mondial des rivières HydroRIVERS<sup>52</sup> comprend 6,2 millions de segments. Bien que la plupart des segments hydrographiques aient été classifiés par analyse cartographique, la quantité d'expertise de terrain requise pour suivre les directives gouvernementales était considérable (*Section 1 des Méthodes Supplémentaires*) – dans un seul département, plus de 55 000 segments ont été expertisés lors de visites sur le terrain.



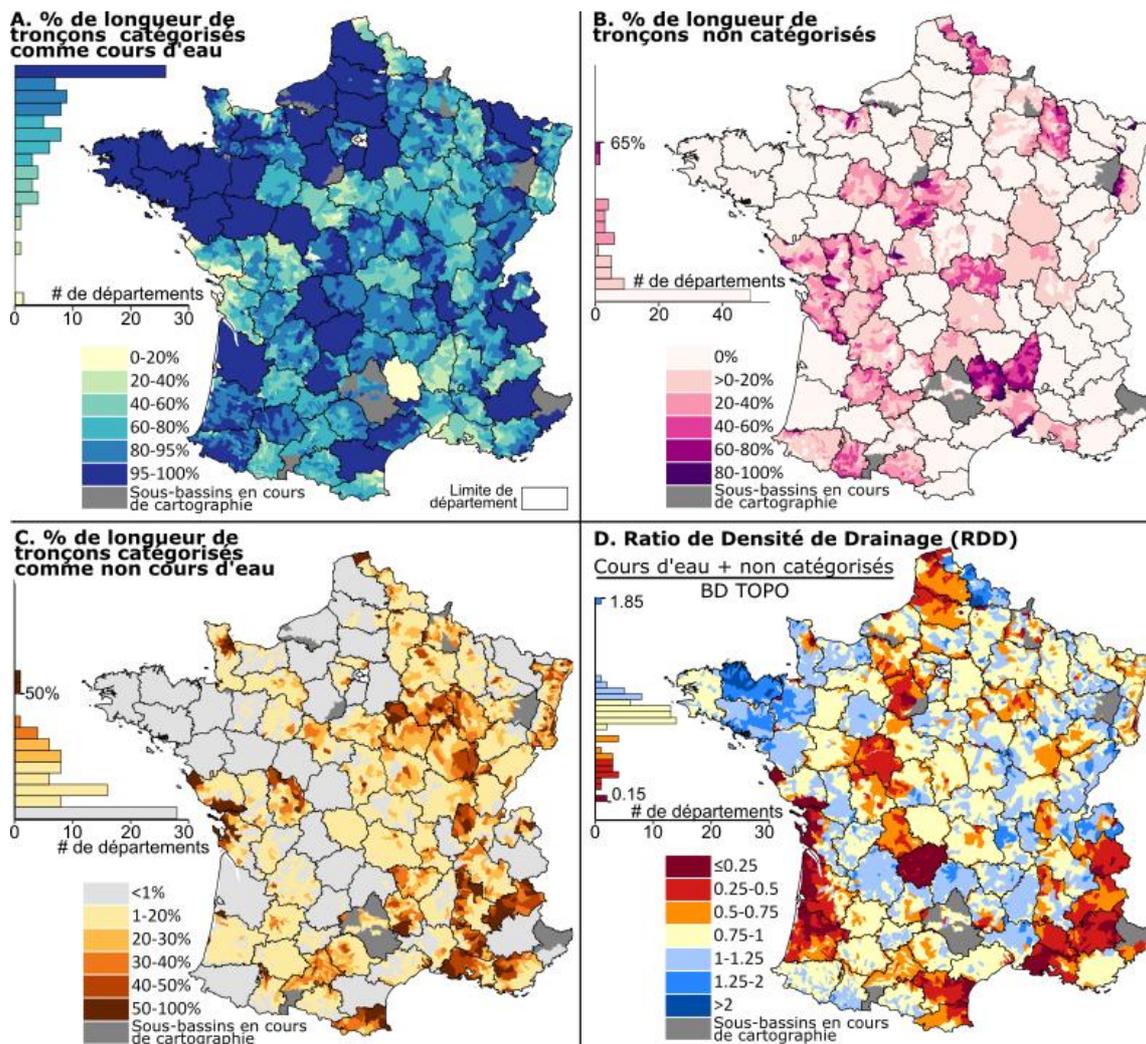
**Figure 1. Carte nationale des cours d'eau protégés par la Loi sur l'eau en France métropolitaine en 2023.** Les encadrés (B et C) illustrent des cas de discontinuités dans la densité de drainage ou la répartition du statut des cours d'eau entre départements voisins. Les zones grises indiquent les sous-bassins où le statut des segments hydrographiques est soit encore en cours d'évaluation active par les départements, soit déterminé individuellement sur demande d'une partie prenante.

Malgré l'apparente exhaustivité de la carte, notre évaluation révèle des interprétations diverses et incohérentes à travers la France de la même définition des cours d'eau (**Figure 2**). Nous estimons qu'environ un quart des segments hydrographiques précédemment cartographiés, en longueur, ont été disqualifiés comme non-cours d'eau (c'est-à-dire exclus de protection au titre de la police de l'eau ; sur la base d'une évaluation couvrant 84 % de la superficie du pays ; **Tableau 1** ; *Section 9 des Méthodes Supplémentaires*). La Densité de Drainage Relative (DDR) varie considérablement, tant entre départements (DDR départementale moyenne  $\pm$  écart type =  $0,82 \pm 0,26$ ) que dans un même département (plage moyenne de DDR parmi les sous-bassins dans un département  $\pm$  écart type de la plage =  $1,24 \pm 1,54$  ; à l'exclusion des sous-bassins de moins de 10 km<sup>2</sup> ; **Figure 2**). Les cartes de départements voisins peuvent présenter des densités de drainage très différentes (**Figure 1B-C**). Dix-huit départements sont particulièrement inclusifs et ont complété BD TOPO avec des sources alternatives de données hydrographiques dans la cartographie des cours d'eau, de sorte que leur densité de drainage départementale dépasse celle de BD TOPO. En revanche, 15 cartes départementales affichent une DDR inférieure à 0,5, indiquant que de vastes portions du réseau hydrographique ont été disqualifiées comme non-cours d'eau.

**Tableau 1. Statistiques Résumées des Cartes Réglementaires des Cours d'Eau par Ordre de Strahler (OS) Basées sur un Sous-ensemble de 68 Départements avec des Données Suffisantes<sup>1</sup>.**

| OS           | Longueur (10 <sup>3</sup> km   %) |                  |                  | % avec régime d'écoulement défini | Représentativité parmi les non cours d'eau |             |
|--------------|-----------------------------------|------------------|------------------|-----------------------------------|--|-------------|
|              | Totale analysée                   | Non cours d'eau  | Non pérenne      |                                   | Ordre de Strahler                          | Non pérenne |
| 1            | 270                               | 83.0   31%       | 188   80%        | 87%                               | 1.3  | 1.1         |
| 2            | 113                               | 21.0   19%       | 69   65%         | 94%                               | 0.8  | 1.3         |
| 3            | 47                                | 4.5   10%        | 20   43%         | 97%                               | 0.4  | 1.8         |
| 4            | 17                                | 0.8   5%         | 4   25%          | 98%                               | 0.2  | 2.3         |
| 5            | 3                                 | 0.1   4%         | 0.5   16%        | 99%                               | 0.2  | 3.2         |
| NA           | 190                               | 38.0   20%       | 62   35%         | 94%                               | 0.9  | 1.5         |
| <b>Total</b> | <b>639</b>                        | <b>147   23%</b> | <b>344   59%</b> | <b>91%</b>                        | <b>1.0</b>                                 | <b>1.3</b>  |

<sup>1</sup> sur 84 % de la surface cartographiée de France métropolitaine; voir la *Section 9 des Méthodes Complémentaires* pour les détails sur l'identification des départements disposant de données suffisantes.



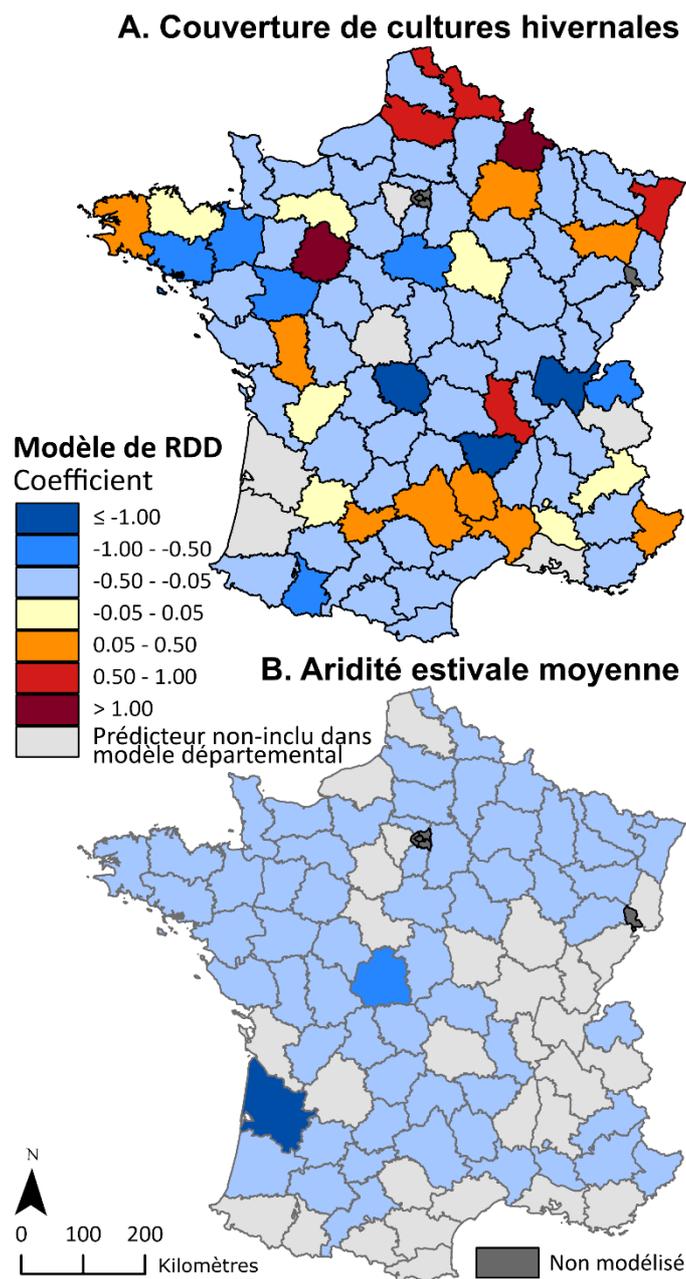
**Figure 2. Prévalence relative des catégories dans les cartes départementales des cours d'eau au titre de la Loi sur l'Eau en France (A-C) et ratio de densité de drainage (RDD ; D) entre les cartes réglementaires des cours d'eau et les données hydrographiques de référence de BD TOPO.**

Les cartes montrent les statistiques par sous-bassin, tandis que les histogrammes montrent la répartition des statistiques par département. La surface moyenne des sous-bassins (après intersection avec les départements) est de 67 km<sup>2</sup>. Le RDD a été calculé en supposant que les segments non classifiés dans les cartes de cours d'eau seraient par défaut considérés comme des cours d'eau sauf expertise contraire.

## 1.7. Les corrélats du ratio de densité de drainage mettent en lumière des critères de cartographie inégaux

Tandis que les différences de RDD entre départements étaient faiblement corrélées ( $|\rho$  de Spearman  $\leq 0,4$ ) aux variables socio-environnementales (voir *Tableau Supplémentaire 3*), les différences de RDD au sein des départements (c'est-à-dire entre sous-bassins) étaient modérément à fortement corrélées à plusieurs facteurs socio-environnementaux (voir **Figure 3**). Le RDD est souvent plus faible dans les bassins plus secs avec une surface cultivée plus importante (voir **Figures 3 et 4**, *Tableau Supplémentaire 4*). L'étendue des cultures d'hiver (céréales à paille et oléagineux d'hiver et de printemps), en particulier, est couramment associée à un RDD plus bas. Cependant, ces relations varient considérablement entre départements, démontrant encore une fois que les critères officiels définissant les cours d'eau ont été appliqués de manière inégale à travers le pays. De plus, il y a une faible concentration géographique des facteurs associés aux variations du RDD à travers la France (voir *Figure Supplémentaire 1*).





**Figure 4. Distribution des coefficients des modèles de régression du ratio de densité de drainage (RDD) parmi les sous-bassins au sein des départements pour deux variables socio-environnementales.** L'aridité estivale a été calculée comme le ratio à long terme entre l'évapotranspiration potentielle et les précipitations de juin à août. L'étendue des cultures d'hiver (en pourcentage de la superficie du sous-bassin) a été transformée par racine carrée. Pour B, un coefficient de -0,5 pour un département donné signifie, toutes choses étant égales par ailleurs, qu'une augmentation de 10 % de l'aridité estivale d'un sous-bassin à l'autre est associée à une diminution moyenne de 5 % de la longueur des cours d'eau par rapport à BD TOPO (c'est-à-dire une diminution de 0,05 du RDD). Les départements avec cinq sous-bassins ou moins ont été exclus de l'analyse. Voir le *Tableau Supplémentaire 2* pour les sources de données, le *Tableau Supplémentaire 4* pour les spécifications des modèles et la *Section 7 des Méthodes Supplémentaires* pour les détails sur l'approche de modélisation.

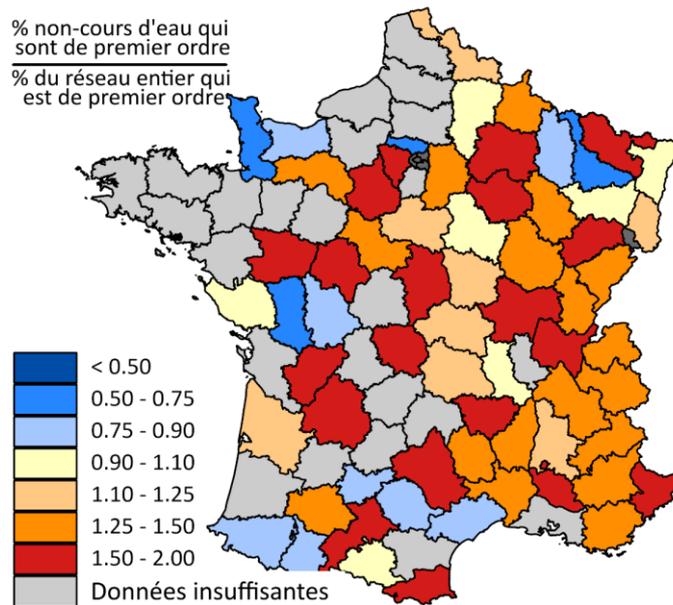
## 1.8. Une définition vague met les eaux vulnérables en danger

La définition des cours d'eau dans le cadre de la Loi sur l'eau expose de manière disproportionnée les segments de tête de bassin et non pérennes – des écosystèmes déjà vulnérables<sup>42,53</sup> – aux altérations humaines. Nous estimons que les segments non pérennes représentent près de 60 % de la longueur du réseau hydrographique cartographié, mais constituent environ 80 % des segments hydrographiques disqualifiés comme non-cours d'eau (**Tableau 1**). De même, les segments de premier ordre représentent au moins 42 % de la longueur totale du réseau hydrographique national mais 56 % des segments disqualifiés dans les cartes des cours d'eau. Pris ensemble, les segments non pérennes et de premier ordre sont sur-représentés dans les non-cours d'eau de 28 % par rapport à leur prévalence (67 %) dans l'ensemble du réseau hydrographique (**Tableau 1, Figure 5**).

Le rejet apparent des cours d'eau de tête de bassin et non pérennes dans cette cartographie n'est pas surprenant compte tenu de la stipulation ambiguë dans la nouvelle définition selon laquelle un cours d'eau doit avoir un débit « suffisant » provenant d'une source pendant la majeure partie de l'année pour être qualifié de cours d'eau<sup>43</sup>. La définition précise également que « l'écoulement peut ne pas être permanent compte tenu des conditions hydrologiques et géologiques locales »<sup>43</sup>, laissant une large marge d'interprétation. Dans une enquête auprès de 25 fonctionnaires responsables de la cartographie des cours d'eau dans 12 départements de la région Auvergne-Rhône-Alpes, les répondants ont considéré la permanence du débit comme le critère le plus courant pour disqualifier les segments en tant que non-cours d'eau, ainsi que le plus difficile à évaluer<sup>54</sup>. Compte tenu des changements en cours et futurs de l'intermittence du débit dus aux changements climatiques en France<sup>55,56</sup>, ce critère risque de devenir de plus en plus difficile à évaluer. Notre objectif n'est pas d'évaluer quels segments classifiés nous considérerions nous-mêmes comme non-cours d'eau ou de critiquer des cartes départementales spécifiques. Néanmoins, compte tenu des différences entre départements en termes de représentativité des eaux vulnérables (**Figure 5**) et de la variabilité géographique des corrélats socio-environnementaux du RDD (**Figures 3 et 4, Tableau Supplémentaire 4**), il est probable que de nombreux cours d'eau écologiquement précieux, mais sensibles, manquent désormais de protection au titre de la Loi sur l'eau.

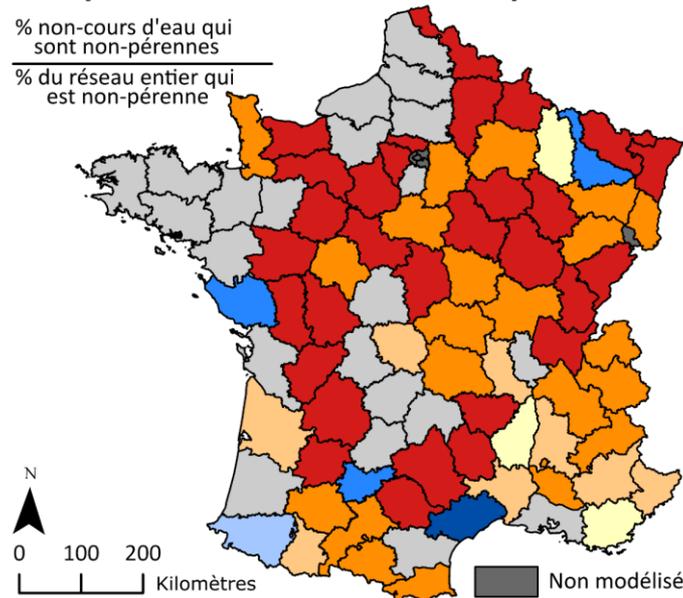
### A. Représentativité cours d'eau de premier ordre

$\frac{\% \text{ non-cours d'eau qui sont de premier ordre}}{\% \text{ du réseau entier qui est de premier ordre}}$



### B. Représentativité cours d'eau non-pérennes

$\frac{\% \text{ non-cours d'eau qui sont non-pérennes}}{\% \text{ du réseau entier qui est non-pérenne}}$



**Figure 5. Représentativité des segments de premier ordre et non pérennes parmi les non-cours d'eau dans les cartes départementales.** Les valeurs positives indiquent les départements où les segments de tête de bassin et non pérennes sont disproportionnellement classifiés comme non-cours d'eau (c'est-à-dire, sur-représentés) par rapport à leur prévalence dans le réseau hydrographique d'origine. Pour A, dans un département où les segments de premier ordre représentent 60 % de la longueur du réseau, une valeur de 1,5 signifie que 90 % des non-cours d'eau sont de premier ordre. Les départements pour lesquels les données sur les non-cours d'eau étaient incomplètes et où moins de 90 % du réseau pouvait être mis en correspondance avec les segments BD TOPO n'ont pas été analysés (voir *Méthodes Supplémentaires Section 9* pour des détails sur l'approche analytique).

La disqualification généralisée des cours d'eau de tête de bassin et des tronçons non pérennes menace les écosystèmes d'eau douce déjà sous pression. Le réseau capillaire des cours d'eau à l'interface entre les écosystèmes terrestres et aquatiques est à la fois fondamental pour la qualité de l'eau, la biodiversité et les conditions écologiques de l'ensemble du réseau fluvial, et particulièrement vulnérable<sup>25,57,58</sup>. Les cours d'eau de tête de bassin sont le principal point d'entrée de l'eau, des solutés, des sédiments minéraux et des matières organiques particulières dans l'environnement aquatique, fournissent un

habitat et un refuge à diverses espèces riveraines, et soutiennent des services écosystémiques essentiels<sup>58,59</sup>. La dynamique spatiale et temporelle de l'assèchement et de la remise en haut des tronçons non pérennes, dont la plupart sont des petits cours d'eau mais pas tous, est également un facteur déterminant pour les communautés biotiques locales, les processus écosystémiques et les services écosystémiques<sup>24</sup>. En raison de leur abondance et de leur connectivité avec le reste du paysage, les cours d'eau de tête de bassin et les tronçons non pérennes sont particulièrement vulnérables à la dégradation<sup>53</sup>. Et si la perte fonctionnelle d'un seul cours d'eau peut avoir un impact marginal sur les eaux en aval (mais pas toujours<sup>60</sup>), l'altération généralisée de ces eaux vulnérables peut avoir des conséquences cumulatives à l'échelle du réseau sur l'hydrologie, la biogéochimie et l'écologie des écosystèmes aquatiques et terrestres<sup>23,25</sup>. Les modifications de l'occupation des sols le long des cours d'eau d'amont, par exemple, peuvent avoir un impact sur la qualité de l'eau loin en aval<sup>20,61,62</sup>. Dans une analyse de 68 bassins versants de l'est du Kansas (États-Unis), la chimie de l'eau dans les segments en aval étaient plus étroitement corrélés à la couverture des terres riveraines le long des cours d'eau de premier ordre qu'à la couverture des terres riveraines à proximité (deux et quatre kilomètres en amont) ou dans l'ensemble du bassin versant<sup>20</sup>. Cette connectivité longitudinale a également une incidence sur les services écosystémiques : la prise d'eau domestique d'Albuquerque, une ville de plus de 500 milliers d'habitants au Nouveau-Mexique (États-Unis), a été interrompu pendant 66 jours à la suite d'un incendie de forêt couvrant moins de 2 % de la superficie totale du bassin versant, dans les bassins versants des affluents situés à environ 50 km en amont<sup>22</sup>.

Les cours d'eau de tête de bassin et les cours d'eau non pérennes ont été historiquement sous-estimés et sous-protégés dans le monde entier, et nombre d'entre eux sont déjà absents des cartes hydrographiques, bien qu'ils constituent la majorité du réseau fluvial<sup>24,40,42</sup>. En tant que telle, leur exclusion disproportionnée de nombreuses cartes départementales des cours d'eau en France n'est que la continuation d'un manque de reconnaissance et de protection de longue date qui risque de détériorer davantage la qualité écologique de réseaux fluviaux entiers.

La disqualification de segments hydrographiques en tant que non cours d'eau dans les segments d'ordre supérieur peut également menacer les conditions écologiques des réseaux hydrographiques par la fragmentation. Si un tronçon classé comme non cours d'eau est entouré de cours d'eau ou relié à des eaux souterraines, ce segment non protégé peut entraîner une déconnexion fonctionnelle ou physique du réseau en raison d'un prélèvement d'eau non réglementé ou d'une altération physique. Inversement, un cours d'eau entouré de non cours d'eau n'est pas protégé sur le plan fonctionnel. Nous avons identifié plus de 1500 cas de ce type en France sur la base d'une analyse préliminaire, mais nous pensons qu'il en existe beaucoup plus.

## 1.9. L'hydrographie est sociale et politique

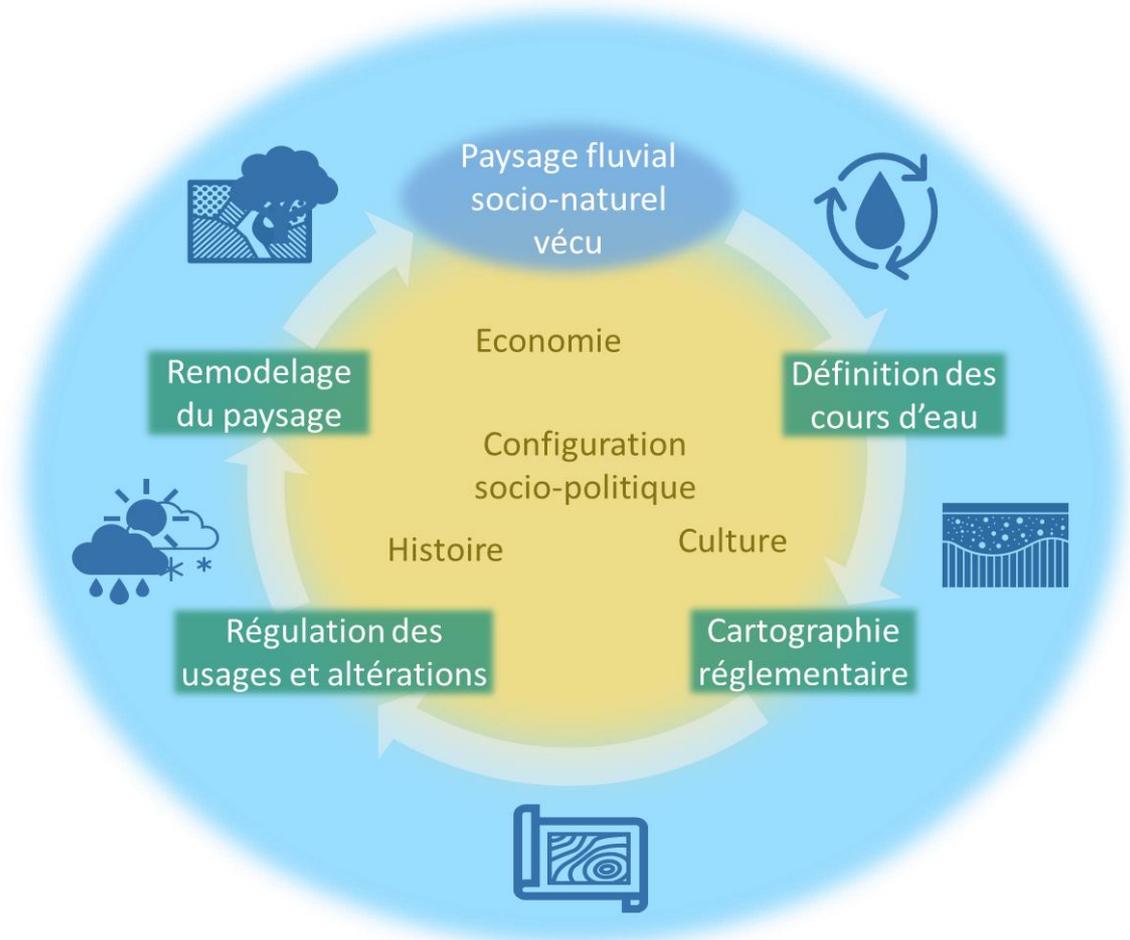
La cartographie des cours d'eau réalisée au cours de la dernière décennie en France est remarquable pour son caractère décentralisé et consultatif, du moins en théorie. Cette approche visait à faciliter les relations entre les agences gouvernementales et les parties prenantes en incluant l'expertise locale et en établissant une base de connaissances commune sur les masses d'eau courantes soumises à la

réglementation<sup>43</sup>. Dans la plupart des départements, les cartes qui en résultent reflètent un effort massif de cartographie et de recherche de consensus de la part de multiples acteurs. Cependant, le processus de consultation a été tendu et polarisé dans d'autres départements<sup>44,45</sup>, et la quantité de travail sur le terrain nécessaire pour évaluer avec diligence les critères d'identification des cours d'eau n'était pas réaliste de la même manière dans tous les départements, compte tenu de leurs ressources respectives. Malheureusement, le résultat national manque donc de cohérence, reflétant des différences marquées dans la mise en œuvre de la définition des cours d'eau, avec des conséquences potentiellement néfastes.

La tendance à qualifier moins de segments hydrographiques comme des cours d'eau dans les bassins à plus forte couverture agricole peut être en partie le résultat d'asymétries de pouvoir dans les comités de consultation, compte tenu de la forte mobilisation documentée des syndicats agricoles dans ce processus de cartographie<sup>44-46</sup>. La promulgation de la directive gouvernementale définissant les cours d'eau en 2015 a été reçue comme un succès par la plupart des syndicats agricoles, après des années de plaidoyer de leur part, et a été suivie d'appels à la mobilisation de leurs membres<sup>63</sup> ; par exemple, le plus grand syndicat agricole français a publié un « Guide d'accompagnement pour l'identification des cours d'eau »<sup>63</sup> un mois après le décret, exhortant ses membres à s'impliquer dans le processus de cartographie, à conduire et à accélérer le processus cartographique et de consultation, à limiter et à accompagner les visites sur le terrain pour minimiser l'utilisation de critères auxiliaires (par exemple, la présence d'organismes aquatiques), et de demander aux autorités départementales de rendre la cartographie résultante juridiquement contraignante par décret préfectoral. En Seine-et-Marne par exemple, où les zones cultivées couvrent près de 60% du département, les ONG environnementales n'ont pas été initialement incluses dans le processus de cartographie, le département a reçu près de 500 demandes de classement d'un segment hydrographique en tant que non cours d'eau, et les conflits entre les parties prenantes ont finalement conduit l'agence gouvernementale chargée de superviser la cartographie à se retirer complètement du processus d'expertise sur le terrain, afin qu'elle ne soit plus «tenu pour responsable à l'avenir d'une décision de déclassement»<sup>64</sup>.

Les dernières décennies ont été marquées par une reconnaissance croissante des relations complexes entre les humains et l'eau<sup>2,8,11,12,65</sup> et, plus largement, par une prise de conscience du cycle hydro-social, le «processus socio-naturel par lequel l'eau et la société se font et refont les uns les autres dans l'espace et le temps»<sup>12</sup>. Sur la base de notre analyse, nous soutenons que la définition réglementaire et la cartographie des cours d'eau, en France et ailleurs (*Tableau Supplémentaire 1*), est une illustration frappante de cette cyclicité des relations entre les humains et l'eau (**Figure 6**). D'une part, les rivières, ruisseaux et autres éléments hydrographiques représentés sur les cartes topographiques constituent une réalité physique qui résulte de l'interaction historique entre le climat, la géologie, la biogéographie et le contexte socio-politique et culturel local, formant ainsi une hydrographie hybride. Une ligne bleue sur une carte topographique peut ne correspondre à aucun élément remarquable du paysage aujourd'hui parce que le cours d'eau qui s'y trouvait a été détourné ou enterré depuis longtemps ; un ruisseau historiquement pérenne peut être devenu intermittent ou éphémère en raison des prélèvements d'eau et du changement climatique. D'autre part, nous avançons que la cartographie des cours d'eau cristallise une perception sélective du paysage fluvial ; cette perception est le résultat de

relations sociales spécifiques et d'asymétries de pouvoir<sup>8,12,64</sup>. Les cartes qui en résultent légitiment à leur tour cette perception<sup>66</sup>. Elles façonnent les relations entre les personnes et le paysage fluvial (par exemple, en déterminant ce que les personnes peuvent ou ne peuvent pas faire), les interactions sociales médiatisées par ces relations et, en fin de compte, le paysage fluvial lui-même. L'effacement d'un cours d'eau sur une carte réglementaire peut se traduire par son effacement réel du paysage en le rendant vulnérable au remblaiement, au creusement de fossés, à la construction de barrages ou aux prélèvements d'eau.



**Figure 6. La cartographie des cours d'eau fait partie d'un cycle hydro-social plus large.**

Les paysages fluviaux actuels résultent de l'interaction de facteurs naturels et sociétaux. La frontière entre ces facteurs est poreuse : les sociétés sont façonnées par leur environnement et le façonnent. La définition juridique des cours d'eau découle de l'expérience que les gens ont de ce paysage fluvial hybride. Par exemple, le fait que les cours d'eau éphémères ne soient pas des cours d'eau à part entière d'un point de vue réglementaire dans de nombreux États d'Australie provient d'un héritage juridique eurocentrique et ne correspond pas à la réalité des écosystèmes locaux<sup>16,67</sup>. Une fois les cours d'eau définis et les critères établis pour les différencier des masses d'eau courante, notre étude démontre que le processus d'application de ces critères lors de la cartographie ne peut pas non plus être considéré comme purement technique ou abstrait du contexte naturel et sociopolitique local. Ces cartes définissent les éléments hydrographiques du paysage qui sont soumis à la réglementation, qui à son tour régit les humains en façonnant ou en remodelant le paysage, recommençant ainsi le cycle. Crédit pour le logo de la pédologie/lithologie : Andy Miranda.

## 1.10. Limitations et incertitudes

Nos analyses du RDD, des corrélats socio-environnementaux du RDD et de la représentativité des tronçons de tête de bassins et des tronçons non pérennes s'accompagnent de plusieurs limites et incertitudes.

Tout d'abord, bien que la BD TOPO soit la base cartographique officielle utilisée par les départements pour cartographier les cours d'eau, elle n'est pas uniforme à l'échelle nationale, ce qui peut expliquer en partie la variabilité observée du RDD. Par exemple, la densité de drainage dans la BD TOPO est connue pour être sous-estimée dans les zones forestières puisqu'elle provient largement d'imagerie aérienne<sup>47</sup>, et de nombreux segments artificiels et cours d'eau de tête de bassin sont manquants car les cartes topographiques sous-jacentes ont été historiquement dessinées pour le renseignement militaire<sup>47,68</sup>.

Deuxièmement, les non cours d'eau ont été omis dans près d'un tiers des cartes départementales, tous les segments n'ont pas pu être mis en correspondance entre les cartes des cours d'eau et d'autres ensembles de données hydrographiques, et il y avait de nombreux artefacts géométriques (par exemple, des segments déconnectés ou bouclés par erreur, une direction d'écoulement inexacte) et des complexités (par exemple, des tronçons avec multiples bras ou dérivations) dans les réseaux fluviaux numérisés. Ces limitations entraînent une incertitude dans nos résultats (par exemple, dans l'analyse des cours d'eau de premier ordre ; *Méthodes Supplémentaires Section 8*), limitent notre analyse à l'échelle des sous-bassins plutôt qu'à celle des segments individuels, et empêchent le calcul des propriétés de l'ensemble du réseau telles que la connectivité.

Troisièmement, le régime d'écoulement de nombreux segments hydrographiques n'a pas été déterminé (**Tableau 1**) et est notoirement incertain sur les cartes topographiques<sup>37</sup>. Les efforts actuellement déployés par les agences gouvernementales nationales pour contrôler la qualité et intégrer les cartes départementales des cours d'eau dans un nouveau jeu de données hydrographiques national avec une meilleure intégrité topologique et une plus grande précision des attributs permettront de réaliser ces analyses à l'avenir.

Enfin, la structure précise et les valeurs des coefficients des modèles de régression présentés ici ont été sélectionnées dans le cadre d'une approche structurée, mais chacun représente l'un des multiples modèles alternatifs valides pour représenter ces relations, en raison de la colinéarité entre les corrélats socio-environnementaux. En outre, la direction de la causalité entre les corrélats socio-environnementaux et le RDD ne peut être présumée de manière concluante. Par exemple, des RDD plus faibles dans les sous-bassins où la prévalence des cultures d'hiver est plus élevée peuvent être attribués simultanément à deux mécanismes principaux : d'une part, la pression exercée par les acteurs du secteur agricole pour que les segments hydrographiques ne soient pas considérés comme des cours d'eau artificiels dans les zones d'agriculture intensive et, d'autre part, l'empreinte plus forte de l'homme sur ces paysages, qui se manifeste par une proportion plus élevée de lignes de drainage véritablement artificielles (et donc une proportion plus faible de cours d'eau réels).

## 1.1. Les leçons de la France et des États-Unis pour le reste du monde

Bien que nous utilisions la France comme étude de cas, la cartographie réglementaire incohérente et l'exclusion associée des segments non pérennes et de tête de bassin sont probablement répandues au-delà de la France et des États-Unis (le seul autre pays dans lequel des évaluations à grande échelle de l'étendue des cours d'eau protégés ont été menées<sup>18,19,35</sup>), comme le suggère notre examen rapide des définitions juridiques à travers les continents (*Tableau Supplémentaire 1*). Dans le cas des États-Unis, la décision de la Cour suprême dans l'affaire *Rapanos v. United States*, en 2006, a été déterminante pour la clarification de la définition des « *waters of the United States* » protégées par la loi sur l'eau (*Clean Water Act*). Cette jurisprudence de portée nationale a temporairement conduit à l'inclusion des ressources en eau ayant un lien significatif (« *a significant nexus* ») avec les eaux navigables (impliquant un lien biologique, chimique ou physique)<sup>13</sup> par les agences de régulation. Ce critère du lien significatif, qui a été écarté par la dernière décision de la Cour suprême dans l'affaire *Sackett v. Environmental Protection Agency* en 2023, était une rare reconnaissance de l'interconnexion des eaux douces et a déplacé le cœur de la définition des masses d'eau depuis leurs caractéristiques individuelles vers leur rôle en tant que partie intégrante d'un réseau fluvial<sup>23,40</sup>. Bien que représentant une avancée significative à l'époque, ce concept a néanmoins été instrumentalisé pour exclure de larges pans des réseaux fluviaux du pays, avec des mises en œuvre incohérentes entre les régions administratives<sup>19,35</sup>. En effet, des modèles prédictifs du statut juridictionnel des masses d'eau calibrés sur la base des classifications par l'US Army Corps of Engineers sont plus performants lorsque les frontières politiques sont incluses comme facteur prédictif<sup>19</sup>. En conséquence, nous soutenons ici que les forces sociales, culturelles et politiques n'influencent pas seulement les définitions des cours d'eau, mais qu'elles façonnent également la mise en œuvre de ces définitions d'une manière qui n'a pas été appréciée jusqu'à présent (**Figure 3**). Un modèle prédictif pourrait également être développé pour estimer quels cours d'eau entrent dans le champ d'application de la loi sur l'eau en France, mais nous pensons qu'une telle approche n'obtiendrait pas l'adhésion des parties prenantes. Nous proposons plutôt que les méthodes quantitatives aillent de pair avec l'écologie politique pour examiner les relations complexes au cœur de la gouvernance de l'eau et rechercher des structures décisionnelles capables de soutenir de manière transparente la mise en œuvre des définitions juridiques des cours d'eau en France et au-delà.

La cartographie réglementaire peut sembler technique et peu controversée par rapport à d'autres questions litigieuses de la gouvernance de l'eau, telles que l'attribution de l'eau à différentes utilisations, l'élimination des obstacles pour la continuité écologique et la restauration<sup>8,33</sup>. Cependant, la définition des éléments du paysage fluvial qui sont protégées par les réglementations environnementales a des implications majeures pour la santé globale des bassins hydrographiques et des personnes qui en dépendent<sup>14,25</sup>. Les prélèvements excessifs d'eau, la pollution et les modifications directes des cours d'eau compromettent la qualité de l'eau potable, la diversité des espèces, le cycle des nutriments, la régulation des inondations et les activités récréatives, entre autres services essentiels au bien-être humain<sup>5</sup>.

La cartographie des cours d'eau en France nous a offert une expérience naturelle pour évaluer quantitativement une expression cartographique du cycle hydro-social qui se déroule dans plus de 90 départements. Cette étude de cas, qui fait écho à des évaluations similaires aux États-Unis<sup>18,19,35</sup>, est d'une grande pertinence et d'une grande nouveauté. Elle se distingue des conflits de définition aux États-Unis<sup>13</sup> et en Australie<sup>16</sup> parce que les critères physiques permettant de différencier les cours d'eau des autres cours d'eau sont fermement établis au niveau national. En France, nous soutenons que l'absence d'un cadre cohérent régissant la mise en œuvre décentralisée de ces critères a largement contribué aux incohérences observées. Nous émettons l'hypothèse que ce manque de structure de gouvernance a permis aux dynamiques de pouvoir locales entre les parties prenantes de se traduire par une perception sélective de ce qui est considéré comme un cours d'eau dans certains départements. Nous avons adopté une approche innovante pour mettre en lumière les implications de ce processus spécifique, qui peut informer la cartographie réglementaire dans d'autres pays. Nous pensons que les cadres réglementaires pour la protection des cours d'eau sont également vulnérables à l'interprétation locale, mais qu'ils ne sont pas examinés dans la plupart des pays, ce qui met en danger les écosystèmes d'eau douce et leur contribution essentielle au bien-être de la population.

## Informations supplémentaires

Les résultats et méthodes supplémentaires, y compris des exemples de législation sur les cours d'eau à travers les continents, les sources de données détaillées, des résultats de modèles statistiques et des informations techniques supplémentaires sur les méthodes sont disponibles en anglais à l'adresse suivante : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.4c01859>.

## References

- (1) Fang, Y.; Ceola, S.; Paik, K.; McGrath, G.; Rao, P. S. C.; Montanari, A.; Jawitz, J. W. Globally Universal Fractal Pattern of Human Settlements in River Networks. *Earth's Future* **2018**, *6* (8), 1134–1145. <https://doi.org/10.1029/2017EF000746>.
- (2) Hein, T.; Hauer, C.; Schmid, M.; Stöglehner, G.; Stumpp, C.; Ertl, T.; Graf, W.; Habersack, H.; Haidvogel, G.; Hood-Novotny, R.; Laaha, G.; Langergraber, G.; Muhar, S.; Schmid, E.; Schmidt-Kloiber, A.; Schmutz, S.; Schulz, K.; Weigelhofer, G.; Winiwarter, V.; Baldan, D.; Canet-Marti, A.; Eder, M.; Flödl, P.; Kearney, K.; Ondiek, R.; Pucher, B.; Pucher, M.; Simperler, L.; Tschikof, M.; Wang, C. The Coupled Socio-Ecohydrological Evolution of River Systems: Towards an Integrative Perspective of River Systems in the 21st Century. *Science of The Total Environment* **2021**, *801*, 149619. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149619>.
- (3) Wantzen, K. M. River Culture: How Socio-Ecological Linkages to the Rhythm of the Waters Develop, How They Are Lost, and How They Can Be Regained. *The Geographical Journal* **2024**, *190* (e12476). <https://doi.org/10.1111/geoj.12476>.
- (4) Martin-Ortega, J., Ferrier, R. C., Gordon, I. J., Khan, S. Water Ecosystem Services: A Global Perspective. Cambridge University Press, 2015. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316178904>.
- (5) Lynch, A. J.; Cooke, S. J.; Arthington, A. H.; Baigun, C.; Bossenbroek, L.; Dickens, C.; Harrison, I.; Kimirei, I.; Langhans, S. D.; Murchie, K. J.; Olden, J. D.; Ormerod, S. J.; Owuor, M.; Raghavan, R.; Samways, M. J.; Schinegger, R.; Sharma, S.; Tachamo-Shah, R.-D.; Tickner, D.; Tweddle, D.; You'ng, N.; Jähnig, S. C. People Need Freshwater Biodiversity. *WIREs Water* **2023**, *10*(3), e1633. <https://doi.org/10.1002/wat2.1633>.
- (6) Wantzen, K. M.; Ballouche, A.; Longuet, I.; Bao, I.; Bocoum, H.; Cissé, L.; Chauhan, M.; Girard, P.; Gopal, B.; Kane, A.; Marchese, M. R.; Nautiyal, P.; Teixeira, P.; Zalewski, M. River Culture: An Eco-Social Approach to Mitigate the Biological and Cultural Diversity Crisis in Riverscapes. *Ecohydrology & Hydrobiology* **2016**, *16* (1), 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2015.12.003>.
- (7) Latour, B. *Nous n'avons Jamais Été Modernes: Essai d'anthropologie Symétrique*; La découverte, 1991.
- (8) Linton, J. Political Ecology and River Restoration. In *River Restoration*; John Wiley & Sons, Ltd, 2021; pp 89–105. <https://doi.org/10.1002/9781119410010.ch4>.
- (9) Grill, G.; Lehner, B.; Thieme, M.; Geenen, B.; Tickner, D.; Antonelli, F.; Babu, S.; Borrelli, P.; Cheng, L.; Crochetiere, H.; Ehalt Macedo, H.; Figueiras, R.; Goichot, M.; Higgins, J.; Hogan, Z.; Lip, B.; McClain, M. E.; Meng, J.; Mulligan, M.; Nilsson, C.; Olden, J. D.; Opperman, J. J.; Petry, P.; Reidy Liermann, C.; Sáenz, L.; Salinas-Rodríguez, S.; Schelle, P.; Schmitt, R. J. P.; Snider, J.; Tan, F.; Tockner, K.; Valdujo, P. H.; van Soesbergen, A.; Zarfl, C. Mapping the World's Free-Flowing Rivers. *Nature* **2019**, *569*, 215–221. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1111-9>.
- (10) Reid, A. J.; Carlson, A. K.; Creed, I. F.; Eliason, E. J.; Gell, P. A.; Johnson, P. T. J.; Kidd, K. A.; MacCormack, T. J.; Olden, J. D.; Ormerod, S. J.; Smol, J. P.; Taylor, W. W.; Tockner, K.; Vermaire, J. C.; Dudgeon, D.; Cooke, S. J. Emerging Threats and Persistent Conservation Challenges for

- Freshwater Biodiversity. *Biological Reviews* **2019**, *94* (3), 849–873. <https://doi.org/10.1111/brv.12480>.
- (11) Anderson, E. P.; Jackson, S.; Tharme, R. E.; Douglas, M.; Flotemersch, J. E.; Zwarteveen, M.; Lokgariwar, C.; Montoya, M.; Wali, A.; Tipa, G. T.; Jardine, T. D.; Olden, J. D.; Cheng, L.; Conallin, J.; Cosens, B.; Dickens, C.; Garrick, D.; Groenfeldt, D.; Kabogo, J.; Roux, D. J.; Ruhi, A.; Arthington, A. H. Understanding Rivers and Their Social Relations: A Critical Step to Advance Environmental Water Management. *WIREs Water* **2019**, *6* (6), e1381. <https://doi.org/10.1002/wat2.1381>.
- (12) Linton, J.; Budds, J. The Hydrosocial Cycle: Defining and Mobilizing a Relational-Dialectical Approach to Water. *Geoforum* **2014**, *57*, 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.10.008>.
- (13) Walsh, R.; Ward, A. S. An Overview of the Evolving Jurisdictional Scope of the U.S. Clean Water Act for Hydrologists. *WIREs Water* **2022**, *9* (5), e1603. <https://doi.org/10.1002/wat2.1603>.
- (14) Doyle, M. W.; Bernhardt, E. S. What Is a Stream? *Environ. Sci. Technol.* **2011**, *45* (2), 354–359. <https://doi.org/10.1021/es101273f>.
- (15) Harding, W. R. The Definition of a “Watercourse”: Towards an Interpretive Understanding. **2015**. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3898.4807>.
- (16) Taylor, M. P.; Stokes, R. When Is a River Not a River? Consideration of the Legal Definition of a River for Geomorphologists Practising in New South Wales, Australia. *Australian Geographer* **2005**, *36* (2), 183–200. <https://doi.org/10.1080/00049180500153450>.
- (17) Zellmer, S. Treading Water While Congress Ignores the Nation’s Environment. *Notre Dame Law Review* **2013**, *88* (5), 2323.
- (18) Sullivan, S. M. P.; Rains, M. C.; Rodewald, A. D.; Buzbee, W. W.; Rosemond, A. D. Distorting Science, Putting Water at Risk. *Science* **2020**, *369*, 766–768. <https://doi.org/10.1126/science.abb6899>.
- (19) Greenhill, S.; Druckenmiller, H.; Wang, S.; Keiser, D. A.; Giroto, M.; Moore, J. K.; Yamaguchi, N.; Todeschini, A.; Shapiro, J. S. Machine Learning Predicts Which Rivers, Streams, and Wetlands the Clean Water Act Regulates. *Science* **2024**, *383*, 406–412. <https://doi.org/10.1126/science.adi3794>.
- (20) Dodds, W. K.; Oakes, R. M. Headwater Influences on Downstream Water Quality. *Environmental Management* **2008**, *41* (3), 367–377. <https://doi.org/10.1007/s00267-007-9033-y>.
- (21) Freeman, M. C.; Pringle, C. M.; Jackson, C. R. Hydrologic Connectivity and the Contribution of Stream Headwaters to Ecological Integrity at Regional Scales. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* **2007**, *43* (1), 5–14. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00002.x>.
- (22) Dahm, C. N.; Candelaria-Ley, R. I.; Reale, C. S.; Reale, J. K.; Van Horn, D. J. Extreme Water Quality Degradation Following a Catastrophic Forest Fire. *Freshwater Biology* **2015**, *60* (12), 2584–2599. <https://doi.org/10.1111/fwb.12548>.
- (23) Leibowitz, S. G.; Wigington Jr., P. J.; Schofield, K. A.; Alexander, L. C.; Vanderhoof, M. K.; Golden, H. E. Connectivity of Streams and Wetlands to Downstream Waters: An Integrated Systems Framework. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* **2018**, *54* (2), 298–322. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12631>.
- (24) Datry, T.; Boulton, A. J.; Fritz, K.; Stubbington, R.; Cid, N.; Crabot, J.; Tockner, K. Non-Perennial Segments in River Networks. *Nature Reviews Earth & Environment* **2023**, *4* (12), 815–830. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00495-w>.
- (25) Lane, C. R.; Creed, I. F.; Golden, H. E.; Leibowitz, S. G.; Mushet, D. M.; Rains, M. C.; Wu, Q.; D’Amico, E.; Alexander, L. C.; Ali, G. A.; Basu, N. B.; Bennett, M. G.; Christensen, J. R.; Cohen, M. J.; Covino, T. P.; DeVries, B.; Hill, R. A.; Jencso, K.; Lang, M. W.; McLaughlin, D. L.; Rosenberry, D. O.; Rover, J.; Vanderhoof, M. K. Vulnerable Waters Are Essential to Watershed Resilience.

- Ecosystems* **2023**, *26*(1), 1–28. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00737-2>.
- (26) Sunding, D.; Zilberman, D. The Economics of Environmental Regulation by Licensing: An Assessment of Recent Changes to the Wetland Permitting Process. *Natural Resources Journal* **2002**, *42*(1), 59–90.
- (27) Kristensen, P.; Globevnik, L. European Small Water Bodies. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy* **2014**, *114B*(3), 281–287. <https://doi.org/10.3318/bioe.2014.13>.
- (28) Pascual, U.; Balvanera, P.; Anderson, C. B.; Chaplin-Kramer, R.; Christie, M.; González-Jiménez, D.; Martin, A.; Raymond, C. M.; Termansen, M.; Vatn, A.; Athayde, S.; Baptiste, B.; Barton, D. N.; Jacobs, S.; Kelemen, E.; Kumar, R.; Lazos, E.; Mwampamba, T. H.; Nakangu, B.; O'Farrell, P.; Subramanian, S. M.; van Noordwijk, M.; Ahn, S.; Amaruzaman, S.; Amin, A. M.; Arias-Arévalo, P.; Arroyo-Robles, G.; Cantú-Fernández, M.; Castro, A. J.; Contreras, V.; De Vos, A.; Dendoncker, N.; Engel, S.; Eser, U.; Faith, D. P.; Filyushkina, A.; Ghazi, H.; Gómez-Baggethun, E.; Gould, R. K.; Guibrunet, L.; Gundimeda, H.; Hahn, T.; Harmáčková, Z. V.; Hernández-Blanco, M.; Horcea-Milcu, A.-I.; Huambachano, M.; Wicher, N. L. H.; Aydın, C. İ.; Islar, M.; Koessler, A.-K.; Kenter, J. O.; Kosmus, M.; Lee, H.; Leimona, B.; Lele, S.; Lenzi, D.; Lliso, B.; Mannetti, L. M.; Merçon, J.; Monroy-Sais, A. S.; Mukherjee, N.; Muraca, B.; Muradian, R.; Murali, R.; Nelson, S. H.; Nemogá-Soto, G. R.; Ngouhouo-Poufoun, J.; Niamir, A.; Nuesiri, E.; Nyumba, T. O.; Özkaynak, B.; Palomo, I.; Pandit, R.; Pawłowska-Mainville, A.; Porter-Bolland, L.; Quaas, M.; Rode, J.; Rozzi, R.; Sachdeva, S.; Samakov, A.; Schaafsma, M.; Sitas, N.; Ungar, P.; Yiu, E.; Yoshida, Y.; Zent, E. Diverse Values of Nature for Sustainability. *Nature* **2023**, *620*, 813–823. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06406-9>.
- (29) Queensland Government. *Water Act 2000. Chapter 1, Part 2, Section 5*; 2000. <https://www.legislation.qld.gov.au/view/html/inforce/2024-01-07/act-2000-034#sec.5> (accessed 2024-05-23).
- (30) Queensland Government. *Water Act 2000. Schedule 4 Dictionary*; 2000. [https://www.legislation.qld.gov.au/view/html/inforce/current/act-2000-034?query=VersionDesclD%3D%222787a4b5-58e2-4235-8d8e-a774c4042d48%22%20AND%20VersionSeriesId%3D%22e70e5508-125c-4cf6-a85e-c31ed22b7104%22%20AND%20PrintType%3D%22act.reprint%22%20AND%20Content%3D\(%22drainage%22%20AND%20%22feature%22\)&q-collection%5B%5D=inforceActs&q-collection%5B%5D=inforceSLs&q-documentTitle=Water%20Act%202000&q-prefixCcl=VersionDesclD%3D%222787a4b5-58e2-4235-8d8e-a774c4042d48%22%20AND%20VersionSeriesId%3D%22e70e5508-125c-4cf6-a85e-c31ed22b7104%22%20AND%20PrintType%3D%22act.reprint%22&q-searchfor=drainage%20feature&q-searchin=Content&q-searchusing=allwords&q-year=&q-no=&q-point-in-time=23%2F05%2F2024&q-searchform=basic#sch.4](https://www.legislation.qld.gov.au/view/html/inforce/current/act-2000-034?query=VersionDesclD%3D%222787a4b5-58e2-4235-8d8e-a774c4042d48%22%20AND%20VersionSeriesId%3D%22e70e5508-125c-4cf6-a85e-c31ed22b7104%22%20AND%20PrintType%3D%22act.reprint%22%20AND%20Content%3D(%22drainage%22%20AND%20%22feature%22)&q-collection%5B%5D=inforceActs&q-collection%5B%5D=inforceSLs&q-documentTitle=Water%20Act%202000&q-prefixCcl=VersionDesclD%3D%222787a4b5-58e2-4235-8d8e-a774c4042d48%22%20AND%20VersionSeriesId%3D%22e70e5508-125c-4cf6-a85e-c31ed22b7104%22%20AND%20PrintType%3D%22act.reprint%22&q-searchfor=drainage%20feature&q-searchin=Content&q-searchusing=allwords&q-year=&q-no=&q-point-in-time=23%2F05%2F2024&q-searchform=basic#sch.4) (accessed 2024-05-23).
- (31) Wohl, E. The Challenges of Channel Heads. *Earth-Science Reviews* **2018**, *185*, 649–664. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.07.008>.
- (32) Brown, A. G.; Lespez, L.; Sear, D. A.; Macaire, J.-J.; Houben, P.; Klimek, K.; Brazier, R. E.; Van Oost, K.; Pears, B. Natural vs Anthropogenic Streams in Europe: History, Ecology and Implications for Restoration, River-Rewilding and Riverine Ecosystem Services. *Earth-Science Reviews* **2018**, *180*, 185–205. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.001>.
- (33) Barraud, R. Removing Mill Weirs in France: The Structure and Dynamics of an Environmental Controversy. *Water Alternatives* **2017**, *10*(3), 796–818.
- (34) Brookes, A. The Distribution and Management of Channelized Streams in Denmark. *Regulated Rivers: Research & Management* **1987**, *1*(1), 3–16. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450010103>.
- (35) Fesenmyer, K. A.; Wenger, S. J.; Leigh, D. S.; Neville, H. M. Large Portion of USA Streams Lose Protection with New Interpretation of Clean Water Act. *Freshwater Science* **2021**, *40*(1), 252–258.

<https://doi.org/10.1086/713084>.

- (36) Drummond, R. R. When Is a Stream a Stream? *The Professional Geographer* **1974**, 26 (1), 34–37. <https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1974.00034.x>.
- (37) Fritz, K. M.; Hagenbuch, E.; D'Amico, E.; Reif, M.; Wigington, P. J.; Leibowitz, S. G.; Comeleo, R. L.; Ebersole, J. L.; Nadeau, T. L. Comparing the Extent and Permanence of Headwater Streams from Two Field Surveys to Values from Hydrographic Databases and Maps. *Journal of the American Water Resources Association* **2013**, 49(4), 867–882. <https://doi.org/10.1111/jawr.12040>.
- (38) Ducasse, J.-J.; Figueras, C.; Barbe, L. *Guide d'identification des cours d'eau au titre de la police des eaux en Occitanie*; Département Eau et Milieux Aquatiques (DEMA), Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) d'Occitanie, 2017. [https://www.tarn-et-garonne.gouv.fr/contenu/telechargement/10703/72266/file/Guide\\_Occitanie\\_Carto\\_CE\\_2017\\_1010.pdf](https://www.tarn-et-garonne.gouv.fr/contenu/telechargement/10703/72266/file/Guide_Occitanie_Carto_CE_2017_1010.pdf) (accessed 2024-08-13).
- (39) Fritz, K. M.; Johnson, B. R.; Walters, D. M. Physical Indicators of Hydrologic Permanence in Forested Headwater Streams. *Journal of the North American Benthological Society* **2008**, 27 (3), 690–704. <https://doi.org/10.1899/07-117.1>.
- (40) Creed, I. F.; Lane, C. R.; Serran, J. N.; Alexander, L. C.; Basu, N. B.; Calhoun, A. J. K.; Christensen, J. R.; Cohen, M. J.; Craft, C.; D'Amico, E.; DeKeyser, E.; Fowler, L.; Golden, H. E.; Jawitz, J. W.; Kalla, P.; Kirkman, L. K.; Lang, M.; Leibowitz, S. G.; Lewis, D. B.; Marton, J.; McLaughlin, D. L.; Raanan-Kiperwas, H.; Rains, M. C.; Rains, K. C.; Smith, L. Enhancing Protection for Vulnerable Waters. *Nature Geosci* **2017**, 10(11), 809–815. <https://doi.org/10.1038/ngeo3041>.
- (41) Acuña, V.; Hunter, M.; Ruhí, A. Managing Temporary Streams and Rivers as Unique Rather than Second-Class Ecosystems. *Biological Conservation* **2017**, 211, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.12.025>.
- (42) Acuña, V.; Datry, T.; Marshall, J.; Barceló, D.; Dahm, C. N.; Ginebreda, A.; McGregor, G.; Sabater, S.; Tockner, K.; Palmer, M. A. Why Should We Care about Temporary Waterways? *Science* **2014**, 343, 1080–1081. <https://doi.org/10.1126/science.1246666>.
- (43) Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. *Instruction Du Gouvernement Du 3 Juin 2015 Relative à La Cartographie et l'identification Des Cours d'eau et à Leur Entretien*; 2015; Vol. NOR : DEVL1506776J. <https://www.legifrance.gouv.fr/circulaire/id/39701> (accessed 2024-08-13).
- (44) de La Croix, K.; Germaine, M.-A.; Verhaeghe, N. Cartographier Une Nature "Hybride". Les Enjeux de La Nouvelle Cartographie Des Cours d'eau En France. *Métropolitiques* **2020**.
- (45) Cinotti, B.; Dufour, A. *Protection Des Points d'eau. Évaluation de La Mise En Oeuvre de l'arrêté Du 4 Mai 2017*; 2019. <https://www.vie-publique.fr/rapport/269190-protection-des-points-deau-arrete-du-4-mai-2017> (accessed 2024-08-13).
- (46) Morenas; Prud'homme. *Rapport d'information par la mission d'information sur la ressource en eau (M. Adrien Morenas et M. Loïc Prud'homme)*. [https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/mieau/l15b1101\\_rapport-information](https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/mieau/l15b1101_rapport-information) (accessed 2023-01-20).
- (47) ONEMA; IGN. *Appui Onema et IGN à l'inventaire Des Cours d'eau Police de l'eau -Volet Information Géographique; V8 (révision n°24 modifiée); 2015. [https://www.geoinformations.developpement-durable.gouv.fr/fichier/pdf/1507NoteAppui\\_Onema\\_IGN\\_inventaire\\_CE\\_cle2c1465.pdf?arg=177834023&cle=3e379d8859e053cf32bd336133839a4ba3a47bf4&file=pdf%2F1507NoteAppui\\_Onema\\_IGN\\_inventaire\\_CE\\_cle2c1465.pdf](https://www.geoinformations.developpement-durable.gouv.fr/fichier/pdf/1507NoteAppui_Onema_IGN_inventaire_CE_cle2c1465.pdf?arg=177834023&cle=3e379d8859e053cf32bd336133839a4ba3a47bf4&file=pdf%2F1507NoteAppui_Onema_IGN_inventaire_CE_cle2c1465.pdf)* (accessed 2024-08-13).
- (48) Institut national de l'information géographique et forestière. BD TOPO®, 2015. <https://geoservices.ign.fr/bdtopo#telechargement2015> (accessed 2024-08-13).
- (49) Luo, W.; Jasiewicz, J.; Stepinski, T.; Wang, J.; Xu, C.; Cang, X. Spatial Association between

- Dissection Density and Environmental Factors over the Entire Conterminous United States. *Geophysical Research Letters* **2016**, *43* (2), 692–700. <https://doi.org/10.1002/2015GL066941>.
- (50) Kuhn, M.; Johnson, K. *Applied Predictive Modeling*; Springer New York, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6849-3>.
- (51) Faraway, J. J. *Linear Models with R*. Chapman and Hall/CRC, 2004.
- (52) Linke, S.; Lehner, B.; Ouellet Dallaire, C.; Ariwi, J.; Grill, G.; Anand, M.; Beames, P.; Burchard-Levine, V.; Maxwell, S.; Moidu, H.; Tan, F.; Thieme, M. Global Hydro-Environmental Sub-Basin and River Reach Characteristics at High Spatial Resolution. *Scientific data* **2019**, *6* (1), 283. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0300-6>.
- (53) Meyer, J. L.; Wallace, J. B. Lost Linkages and Lotic Ecology: Rediscovering Small Streams. In *Ecology: achievement and challenge: the 41st Symposium of the British Ecological Society sponsored by the Ecological Society of America held at Orlando, Florida, USA, 10-13 April 2000*; Blackwell Science, 2001; pp 295–317.
- (54) Mars, C.; Pella, H.; Datry, T. Cartographie Des Cours d'eau En Région Auvergne- Rhône-Alpes : États Des Lieux et Effets Potentiels Sur La Biodiversité. MSc thesis, Université Claude Bernard Lyon 1, 2020.
- (55) Sauquet, E.; Beaufort, A.; Sarremejane, R.; Thirel, G. Predicting Flow Intermittence in France under Climate Change. *Hydrological Sciences Journal* **2021**, *66* (14), 2046–2059. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1963444>.
- (56) Trambly, Y.; Rutkowska, A.; Sauquet, E.; Sefton, C.; Laaha, G.; Osuch, M.; Albuquerque, T.; Alves, M. H.; Banasik, K.; Beaufort, A.; Brocca, L.; Camici, S.; Csabai, Z.; Dakhlaoui, H.; DeGirolamo, A. M.; Dörflinger, G.; Gallart, F.; Gauster, T.; Hanich, L.; Kohnová, S.; Mediero, L.; Plamen, N.; Parry, S.; Quintana-Seguí, P.; Tzoraki, O.; Datry, T. Trends in Flow Intermittence for European Rivers. *Hydrological Sciences Journal* **2021**, *66* (1), 37–49. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1849708>.
- (57) Meyer, J. L.; Strayer, D. L.; Wallace, J. B.; Eggert, S. L.; Helfman, G. S.; Leonard, N. E. The Contribution of Headwater Streams to Biodiversity in River Networks. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* **2007**, *43* (1), 86–103. <https://doi.org/10.1111/J.1752-1688.2007.00008.X>.
- (58) Wohl, E. The Significance of Small Streams. *Front. Earth Sci.* **2017**, *11* (3), 447–456. <https://doi.org/10.1007/s11707-017-0647-y>.
- (59) Ferreira, V.; Albariño, R.; Larrañaga, A.; LeRoy, C. J.; Masese, F. O.; Moretti, M. S. Ecosystem Services Provided by Small Streams: An Overview. *Hydrobiologia* **2023**, *850* (12), 2501–2535. <https://doi.org/10.1007/s10750-022-05095-1>.
- (60) Cooke, C. A.; Emmerton, C. A.; Drevnick, P. E. Legacy Coal Mining Impacts Downstream Ecosystems for Decades in the Canadian Rockies. *Environmental Pollution* **2024**, *344*, 123328. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123328>.
- (61) Alexander, R. B.; Boyer, E. W.; Smith, R. A.; Schwarz, G. E.; Moore, R. B. The Role of Headwater Streams in Downstream Water Quality. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* **2007**, *43* (1), 41–59. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00005.x>.
- (62) Fritz, K. M.; Schofield, K. A.; Alexander, L. C.; McManus, M. G.; Golden, H. E.; Lane, C. R.; Kepner, W. G.; LeDuc, S. D.; DeMeester, J. E.; Pollard, A. I. Physical and Chemical Connectivity of Streams and Riparian Wetlands to Downstream Waters: A Synthesis. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* **2018**, *54* (2), 323–345. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12632>.
- (63) FNSEA. *Guide d'appui Identification Des Cours d'eau*; Fédération nationale des syndicats d'exploitants agricoles, Service Environnement, 2015. [https://web.archive.org/web/20200730091749/http://www.fdsea61.fr/sites/d61/actu/nat/2015/07/identification\\_des\\_cours\\_d\\_eau.pdf](https://web.archive.org/web/20200730091749/http://www.fdsea61.fr/sites/d61/actu/nat/2015/07/identification_des_cours_d_eau.pdf) (accessed 2020-07-30).

- (64) de la Croix, K.; Verhaeghe, N. Chapitre 11. Enjeux et Contestations de La Cartographie Départementale Des Cours d'eau. L'exemple de La Seine-et-Marne et Du Bassin-Versant de La Beuvronne. In *Les cartes de l'action publique: pouvoirs, territoires, résistances*; Presses Univ. Septentrion, 2021; pp 255–280.
- (65) Dunham, J. B.; Angermeier, P. L.; Crausbay, S. D.; Cravens, A. E.; Gosnell, H.; McEvoy, J.; Moritz, M. A.; Raheem, N.; Sanford, T. Rivers Are Social–Ecological Systems: Time to Integrate Human Dimensions into Riverscape Ecology and Management. *WIREs Water* **2018**, 5 (4), e1291. <https://doi.org/10.1002/wat2.1291>.
- (66) Harley, J. B. Deconstructing the Map. *Cartographica* **1989**, 26 (2), 1–20. <https://doi.org/10.3138/E635-7827-1757-9T53>.
- (67) Fritz, K. M.; Cid, N.; Autrey, B. Chapter 5.3 - Governance, Legislation, and Protection of Intermittent Rivers and Ephemeral Streams. In *Intermittent Rivers and Ephemeral Streams*; Datry, T., Bonada, N., Boulton, A., Eds.; Academic Press, 2017; pp 477–507. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803835-2.00019-X>.
- (68) Levavasseur, F.; Lagacherie, P.; Bailly, J. S.; Biarnès, A.; Colin, F. Spatial Modeling of Man-Made Drainage Density of Agricultural Landscapes. *Journal of Land Use Science* **2015**, 10 (3), 256–276. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2014.884644>.



**Centre Center Lyon-Grenoble - Auvergne-Rhône-Alpes**

5 rue de la Doua, CS 20244  
69625 Villeurbanne Cedex, France

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/centres/lyon-grenoble-auvergne-rhone-alpes>