

Comment partager l'eau en France ?

À l'ère de l'anthropocène

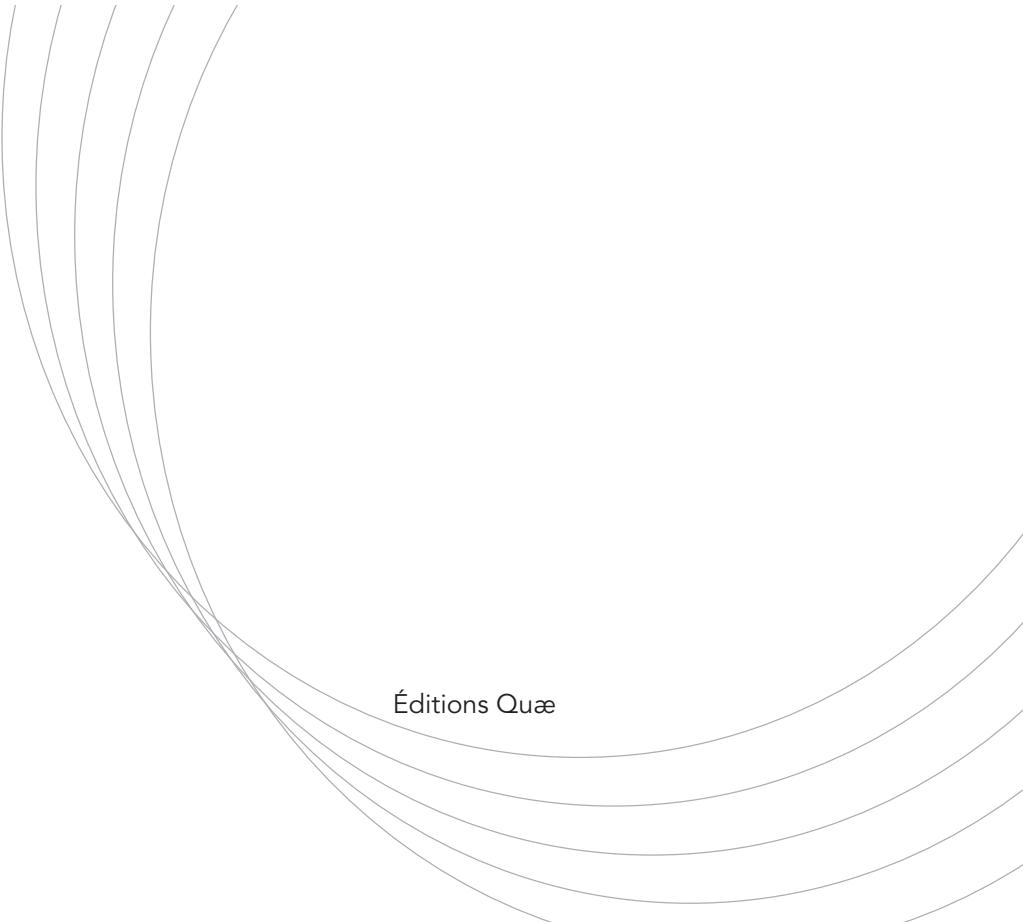
Sami Bouarfa, Marielle Montginoul,
Thomas Pelte, Éric Sauquet, coord.



Comment partager l'eau en France ?

À l'ère de l'anthropocène

Sami Bouarfa, Marielle Montginoul,
Thomas Pelte, Éric Sauquet, coord.



Éditions Quæ

Collection Matière à débattre et décider

Élevages et pâturages sous tension

Nouveaux regards sur les territoires méditerranéens et tropicaux

Alinon K., Duteurtre G., Lasseur J., Poccard-Chapuis R., coord.

2025, 262 p.

Des solutions fondées sur la nature

Une réponse aux défis environnementaux et sociétaux

Rey F.

2025, 120 p.

Vers une agriculture européenne sans pesticides

Trois scénarios à l'horizon 2050

Mora O., Berne J.-A., Drouet J.-L., Le Mouél C., Meunier C., coord.

2025, 342 p.

Pour citer cet ouvrage :

Bouarfa S., Montginoul M., Pelte T., Sauquet É. (coord.), 2025.

Comment partager l'eau en France ? À l'ère de l'anthropocène.

Versailles, éditions Quæ, 184 p.,

<https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4099-9>

Les éditions Quæ réalisent une évaluation scientifique des manuscrits avant publication (<https://www.quae.com/store/page/199/processus-d-evaluation>).

La procédure d'évaluation est décrite dans Prism (<https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/25780>).

Le processus éditorial s'appuie également sur un logiciel de détection des similitudes et des textes potentiellement générés par IA.

Cet ouvrage a bénéficié du soutien financier du département AQUA d'INRAE.

Les versions numériques de cet ouvrage sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex, France

www.quae.com – www.quae-open.com

© Éditions Quæ, 2025

ISBN papier : 978-2-7592-4098-2 – ISBN PDF : 978-2-7592-4099-9

ISBN epub : 978-2-7592-4100-2 – ISSN : 2115-1229

Sommaire

Préface	3
Introduction	9
1. Va-t-on réellement manquer d'eau ?	11
Études de stationnarité : des observations pour comprendre les évolutions passées	12
Études d'impact : des simulations pour anticiper le futur	16
Conclusion	26
Références bibliographiques	27
2. Quelle quantité d'eau utilisons-nous ?	31
État des lieux des prélèvements et des consommations	31
Une hétérogénéité spatiale et temporelle	44
Conclusion	48
Références bibliographiques	48
3. Choisir des débits écologiques : quels compromis entre usages et milieux ?	51
Pourquoi des débits écologiques ?	51
Altérations des débits : des impacts écologiques avérés	54
Les cadres réglementaires en France	56
La pratique française dans le contexte international	57
Les limites techniques des outils et les progrès	62
Le besoin d'une approche adaptative, dynamique, spatialisée et multifactorielle	63
Pistes d'évolution concernant la réglementation et la gouvernance	65
Références bibliographiques	67
4. Comment se partager l'eau comme bien commun ?	71
Pourquoi est-ce si difficile de poser la question du partage de l'eau ?	72
Comment gérer l'eau en bien commun ?	76
Principes et modalités opérationnelles	

Face aux incertitudes multiples, comment adapter le référentiel d'action publique ?	81
Conclusion	83
Références bibliographiques	84
5. Quel horizon normatif pour les politiques de l'eau ?	87
Des politiques plus écologiques	88
Des politiques plus équitables	91
Des politiques plus démocratiques	94
Conclusion	97
Références bibliographiques	97
6. Que fait l'État lorsque l'eau vient à manquer ?	99
La gestion de crise, anatomie d'un dispositif	101
Qualifier et prévoir les situations de crise	106
La gestion des crises au concret	111
Conclusion	117
Références bibliographiques	117
7. Quelle sobriété en eau ?	119
La sobriété, soluble dans l'efficacité ?	119
Leviers incitant à la sobriété	122
Stratégies et techniques moins consommatrices	127
Conclusion	131
Références bibliographiques	132
8. L'irrigation et l'agroécologie peuvent-elles faire bon ménage ?	
Vers une irrigation multiservice	135
La situation de l'irrigation en France et les évolutions récentes	136
Quest-ce que l'agroécologie ?	138
À quelles conditions l'irrigation peut-elle constituer un levier pour l'agroécologie ?	141
Quelles politiques publiques promouvoir pour favoriser une irrigation multiservice ?	144
Conclusion	146
Références bibliographiques	147

9. Quelle place pour les ouvrages de stockage de l'eau dans la trajectoire des territoires ?	149
Des retenues ayant toujours des effets sur le milieu aquatique	150
Des projets de retenues devant tenir compte de leur intérêt pour la collectivité et donc à inscrire dans les démarches de concertation à l'échelle du bassin-versant	154
Dans quelles conditions peut-on envisager de nouvelles retenues ?	160
Conclusion	163
Références bibliographiques	165
10. Les eaux usées traitées : réallouer ou laisser couler ?	167
Enjeux de répartition des eaux traitées entre milieux et usages anthropiques	169
Enjeux d'usages des eaux traitées à des fins agricoles : disponibilité et efficience	170
Répartition des coûts et intérêt collectif	172
Gestion des eaux traitées : partage et organisation collective	176
Mise en perspective au regard d'autres promesses technologiques	178
Conclusion	178
Références bibliographiques	179
Liste des auteurs	181

Préface

Mes fonctions passées d'élu local et national m'ont amené à me préoccuper du sujet de l'eau. Et j'ai vite acquis la conviction que l'eau était le marqueur du dérèglement climatique. Par ses excès, et l'actualité récente de notre pays le démontre assez, avec des inondations remarquables, notamment durant les années 2023 et 2024, et par ses manques avec les séquences de sécheresse répétées depuis le début du siècle.

Dans le cadre du Comité national de l'eau (CNE), que je préside depuis 2014, j'ai plaidé pour faire entrer le mot « anticipation » dans l'intitulé du comité de suivi hydrologique ; pas seulement comme un élément de sémantique, mais surtout comme un élément support de l'action publique (cf. chapitre 6). C'est ainsi que le Comité d'anticipation et de suivi hydrologique (Cash) a été créé par le décret du 14 mai 2021 pour que les acteurs publics de l'observation du climat et du suivi des eaux, qu'elles soient superficielles ou souterraines, renseignent les élus sur les potentielles évolutions à venir, en particulier sur les périodes de manques d'eau. L'harmonisation des décisions des préfets a ainsi été permise et les instructions concernant la gestion des sécheresses ont été clarifiées.

Le même travail restera à faire pour le risque du trop d'eau, avec un véritable rapprochement à opérer entre les deux directions du ministère de l'Écologie que sont la Direction de l'eau et de la biodiversité et la Direction générale de la prévention des risques.

C'est précisément l'intérêt du présent ouvrage dont le titre va droit au but : « Comment partager l'eau en France ? ». Cet ouvrage pose d'entrée la question de savoir si nous allons réellement avoir des manques d'eau dans notre pays (chapitre 1) et s'interroge sur la quantité d'eau que nous utilisons (chapitre 2).

Ce travail partagé d'experts qui nous est livré coïncide, et ce n'est pas un hasard, avec la fin d'une série de processus nationaux consacrés à l'eau : cette thématique a en effet été portée en haut de l'agenda politique dès 2018 avec les deux phases des assises de l'eau, le Varenne agricole de l'eau et du changement climatique (2021) et le chantier eau de la planification écologique (2022) concrétisé par le Plan eau dont les annonces ont été faites par le président de la République lui-même le 30 mars 2023 à Savines-le-Lac.

Le Plan eau met en avant la sobriété, concept développé au chapitre 7 de cet ouvrage collectif ; il l'applique de manière ambitieuse à tous les secteurs, et nos auteurs n'éludent pas le sujet sensible de l'irrigation, abordant l'agroécologie, le débat sur les réserves de substitution ainsi que sur le nécessaire multiusage de ces réserves d'eau (chapitres 8 et 9).

Cette question particulière de l'usage de l'eau (chapitre 3) a par ailleurs été habilement traitée sous l'angle des injonctions contradictoires, les milieux exigeant leur part d'eau ! et la réutilisation des eaux usées traitées (REUT, chapitre 10) ne devant pas gêner le maintien d'un débit minimum dans les cours d'eau. Curieusement, ce chapitre,

s'il montre l'étroitesse du chemin à suivre, n'évoque pas les grandes contraintes réglementaires et sanitaires qui pèsent sur un recours plus important à la REUT et qui nous laisseront loin de l'objectif de 10 % à l'horizon 2030 fixé dans le Plan eau.

L'ouvrage a aussi ce mérite de souligner la place de la notion de l'eau comme bien commun (chapitre 4) : « Si elle est investie, elle servira de terreau à un dialogue apaisé, pour un partage de l'eau qui investit le bénéfice collectif. Si elle est ignorée ou incomprise, l'exercice du partage de l'eau pourrait évoluer en bras de fer où les poids d'influence (économique ou politique) domineraient sur l'intérêt commun ».

En saluant cette contribution majeure, argumentée, structurée et objectivée sur le modèle français de la gestion de l'eau, je partage pleinement l'ambition de ce que doit être l'objectif commun de tous : « que la situation de crise ne devienne pas la règle ! ».

Jean Launay,
Président du Comité national de l'eau
Membre honoraire du Parlement

Introduction

Sami Bouarfa, Marielle Montginoul, Thomas Pelte, Éric Sauquet

La France a, de longue date, développé des politiques de l'eau avec l'ambition de gérer les équilibres quantitatifs liés à son partage et de préserver sa qualité. Elle a ainsi produit la loi de 1964, qui a posé le principe d'une gestion de l'eau par grands bassins-versants et créé les agences de l'eau, et celle de 1992, qui a organisé une planification de la gestion de l'eau par la mise en place des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (Sdage) et leur déclinaison locale, les schémas d'aménagement et de gestion des eaux (Sage). En 2006, la loi sur l'eau et les milieux aquatiques, fruit de la transposition en droit français de la directive-cadre européenne sur l'eau, vise à atteindre le « bon état » des eaux avec un principe d'obligation de résultat.

Aujourd'hui, cependant, le changement global (climatique et anthropique) s'impose comme une menace de plus en plus grande pour l'équilibre de nos ressources en eau et on constate une dégradation sans précédent de la biodiversité dans les milieux aquatiques. Les projections climatiques suggèrent des sécheresses et des étiages de plus en plus sévères et remettent en question les équilibres et les compromis sur le partage d'une eau qu'il s'agit de considérer plus que jamais comme un bien commun. Ainsi, la manière dont l'eau est gérée et l'organisation de son partage se pose maintenant avec un regain d'acuité.

Cet ouvrage est le fruit d'un travail collectif de scientifiques et d'experts travaillant dans le domaine de l'eau en France. Il a été conçu pour être lu par un public concerné par les questions de gestion de l'eau, en particulier les professionnels en charge de l'action publique dans ce domaine, mais aussi et plus largement par tout lecteur et toute lectrice intéressé(e) par ce sujet, aujourd'hui au cœur des débats de société.

Le livre est organisé en dix chapitres, présentés sous la forme de questions, pouvant être lus séparément les uns des autres. Les premiers relèvent de l'état des connaissances acquises par la science, puis traitent des stratégies mises en place. Les derniers se focalisent sur les solutions actuellement préconisées.

Les deux premiers chapitres interrogent ainsi la disponibilité en eau par le passé et les pressions auxquelles les hydrossystèmes sont soumis actuellement en France hexagonale. Le chapitre 1 mène un exercice rétrospectif, complété par une description des futurs possibles du climat et de l'hydrologie non influencée par les actions anthropiques. Le chapitre 2 s'appuie sur les prélèvements déclarés pour isoler des tendances récentes quant aux usages de l'eau par secteur hydrographique. Il distingue les notions de prélèvement et de consommation d'eau et apporte des recommandations pour une meilleure information sur la quantification des usages.

Dans un deuxième temps, l'ouvrage aborde la réponse stratégique, voire politique, du modèle de gestion de l'eau dans ce contexte évolutif. Il rappelle les principes et les modalités opérationnelles favorisant la gestion de l'eau en bien commun, pour permettre un partage équilibrant au mieux les besoins humains et ceux de la nature. Les tensions récurrentes sur la ressource en eau accroissent la difficulté de concilier les politiques au service des usages et les politiques environnementales. Historiquement basée sur une stratégie d'accroissement de l'offre en eau, c'est une politique d'aménagement qui a longtemps prévalu, assortie de règles encadrant l'accès à la ressource pour les usagers. Mais, depuis les années 1990, une dynamique d'écologisation des politiques de l'eau s'est développée, ainsi qu'une territorialisation et une coconstruction des stratégies d'action. Les chapitres 3 à 7 décrivent et analysent l'effet ciseaux qui se joue entre un environnement fragilisé et des usages aux besoins croissants : les leviers normatifs pour gérer les pénuries, l'enjeu d'une sobriété choisie pour éviter une sobriété subie et la place des besoins des écosystèmes dans ces arbitrages sont notamment abordés. L'ouvrage en propose une lecture détaillée et interroge les notions d'équité, de légitimité, mais aussi d'anticipation des politiques pour assurer une durabilité des équilibres entre les besoins en eau issus des usages humains et le bon fonctionnement des écosystèmes.

Les trois derniers chapitres analysent, avec une lecture critique, certaines des solutions envisagées par les parties prenantes pour accroître la ressource mobilisable sur un territoire ou préserver sa qualité. Le chapitre 8 souligne ainsi le rôle de l'irrigation qui peut être crucial dans la transition agroécologique des systèmes agricoles vers des systèmes « valorisant la diversité biologique et les processus naturels » comme alternative à l'agriculture intensive productiviste. Par là même, il met en exergue la difficulté à atteindre des objectifs variés (à la fois une agriculture respectueuse de l'environnement et une économie de l'eau). Les chapitres 9 et 10, quant à eux, étudient deux solutions censées permettre de dépasser la question du partage de l'eau par la mobilisation de « nouvelles » ressources : la création de retenues de substitution pour mobiliser l'eau disponible en périodes de hautes eaux et la réutilisation des eaux usées traitées. Dans les deux cas, ils montrent que ces propositions mériteraient de tenir davantage compte des effets induits sur le milieu aquatique. Les auteurs de ces deux chapitres préconisent ainsi d'y réfléchir en tenant compte de l'intérêt collectif et de s'appuyer sur une démarche de concertation, en particulier pour statuer sur la question du partage des coûts, dont l'importance est liée au caractère plus ou moins irréversible des investissements nécessaires. Le chapitre 10 met à l'épreuve du réel la solution de réutilisation des eaux usées traitées et montre la fragilité de ses promesses (coûts, potentiel des stations d'épuration, sécurisation de l'accès à l'eau, gestion des risques, etc.).

1. Va-t-on réellement manquer d'eau ?

Éric Sauquet, Guillaume Évin, Patrick Arnaud, Maud Berel, Sébastien Bernus, Jérémie Bonneau, Flora Branger, Yvan Caballero, François Colleoni, Lila Collet, Lola Corre, Agathe Drouin, Agnès Ducharme, Maïté Fournier, Joël Gailhard, Florence Habets, Frédéric Hendrickx, Louis Héraut, Benoît Hingray, Peng Huang, Tristan Jaouen, Alexis Jeantet, Sandra Lanini, Matthieu Le Lay, Sarah Loudin, Claire Magand, Paula Marson, Louise Mimeau, Céline Monteil, Simon Munier, Charles Perrin, Alix Reverdy, Olivier Robelin, Yoann Robin, Fabienne Rousset, Jean-Michel Soubeyroux, Laurent Strohmenger, Guillaume Thirel, Flore Tocquer, Yves Tramblay, Jean-Pierre Vergnes, Jean-Philippe Vidal, Mathieu Vrac

La France, hors territoires d'Outre-mer (dans la suite désignée abusivement sous le terme « France »), bénéficie d'un climat tempéré, mais varié : montagnard dans les massifs, océanique sur la façade atlantique, méditerranéen dans sa partie sud, etc. (Strohmenger *et al.*, 2023). Malgré des conditions climatiques favorables, la France n'est pas exempte d'événements de sécheresses hydrologiques, c'est-à-dire de périodes pendant lesquelles les débits et/ou niveaux piézométriques sont anormalement bas. Des étiages particulièrement sévères ont jalonné le xx^e siècle et le début du xxi^e siècle. Les étiages des années 1921, 1976 et 1989 ont été les plus marquants et font partie des dix événements extrêmes recensés par Caillouet *et al.* (2021) entre 1920 et 2012. L'étiage de l'année 1921 a été remarquable par sa sévérité et par sa durée sur les trois quarts du pays : des débits anormalement faibles ont été enregistrés pendant toute l'année. Ainsi, le seuil de débit de 1000 m³/s du Rhône à Beaucaire n'a été dépassé que 60 jours, alors qu'en moyenne, sur l'historique des données disponibles, il est franchi 280 jours par an¹. En France, la sécheresse estivale de 2022, suivie d'un hiver avec une faible recharge des aquifères, a eu des implications sociales fortes et a conduit à l'adoption du Plan eau en 2023. Des records de faibles débits ont été enregistrés pendant l'été : fin août 2022, 34 % des sites suivis par l'Observatoire national des étiages² (Onde) étaient en assec, soit le pourcentage le plus élevé depuis sa création en 2012, et 93 départements ont été concernés par des actions de sensibilisation aux économies d'eau (état de « vigilance » selon les arrêtés cadres sécheresse, cf. chapitre 6) ou des restrictions d'usage³.

1. Source : Hydroportail, <https://hydro.eaufrance.fr>.

2. Source : Onde, <https://onde.eaufrance.fr>.

3. Source : Vigieau, <https://vigieau.gouv.fr/donnees/carte-historique>.

La succession de plusieurs années de sécheresses et les perspectives d'un climat modifié questionnent la durabilité de la gestion actuelle de l'eau. Ce chapitre a pour objectif de résumer les dernières connaissances acquises sur l'impact du changement climatique sur les ressources en eau en France. Deux aspects sont considérés : une analyse statistique rétrospective sur des débits pour identifier les évolutions imputables au changement climatique, et une synthèse des projections hydrologiques pour anticiper les futurs possibles des ressources en eau superficielles et souterraines. Cette synthèse met également en comparaison les tendances observées ou projetées en France et celles observées ou projetées à une échelle plus globale.

Études de stationnarité : des observations pour comprendre les évolutions passées

■ À grande échelle

À l'échelle mondiale, le changement climatique est un des moteurs de l'évolution des débits des cours d'eau (Caretta *et al.*, 2022), en complément des actions anthropiques sur la ressource. Il n'y a cependant pas d'évolution homogène des débits observés de par le monde, tant sur le signe de la tendance que sur l'intensité (voir par exemple Harrigan *et al.* [2018] en Europe pour les débits annuels et d'étiage). Toutefois, des tendances climatiques émergent à l'échelle régionale. Ainsi, les résultats de Vicente-Serrano *et al.* (2019) montrent des changements organisés selon un gradient nord-sud avec une augmentation des débits annuels dans le nord et une diminution dans le sud de l'Europe ; des actions humaines y contribuent dans certaines régions. C'est encore dans le sud de l'Europe que sont détectées des tendances significatives⁴ à l'augmentation des jours d'assez sur les cours d'eau intermittents (Tramblay *et al.*, 2020). Ces deux études confirment la diminution de la ressource superficielle en eau en zone méditerranéenne, déjà soulignée dans d'autres publications (par exemple Gudmundsson *et al.*, 2021 ; Masseroni *et al.*, 2021). Dans les Alpes, Bard *et al.* (2015) ont identifié des évolutions structurées par type de régime : ceux étant influencés par les contributions des glaciers sont les plus sujets à des évolutions significatives, à la hausse pour les débits d'étiage hivernaux et pour le débit annuel. Notons que les résultats sur l'intensité des changements peuvent varier selon les études en fonction des méthodes appliquées, des jeux de données manipulés et surtout des périodes considérées.

■ En France

Les premières analyses de stationnarité sur des variables hydrologiques à l'échelle de la France sont celles de Renard *et al.* (2006) et de Lang et Renard (2007). D'autres études ont suivi, avec un cadre méthodologique similaire, à l'échelle nationale (Renard *et al.*,

4. Par significatif, on entend qu'il est statistiquement peu probable que la tendance soit due au hasard.

2008 ; Giuntoli *et al.*, 2012, 2013) ou régionale (Bard *et al.*, 2015 ; Héraut *et al.*, 2022). L'application de tests statistiques apporte les preuves objectives d'une évolution temporelle dans les séries. Ces tests examinent la vraisemblance d'une hypothèse étant donné les observations. Ici, ils conduisent à choisir entre l'hypothèse de stationnarité (absence d'évolution) et son alternative (présence d'une évolution). Les séries temporelles analysées doivent être sélectionnées avec un soin particulier. Il faut :

- une bonne qualité de mesure : en effet, des non-stationnarités peuvent apparaître dans le cas d'enregistrements biaisés par des dispositifs de mesure défaillants ;
- des données peu influencées par les actions anthropiques : dans le cas contraire, par exemple, une augmentation/diminution progressive des prélèvements/rejets dans ou en dehors du bassin-versant pourrait être à l'origine de tendances. Globalement les actions de gestion peuvent masquer ou accentuer les effets d'une dérive d'origine climatique. C'est typiquement le cas de l'évolution des régimes hydrologiques observée au siècle passé pour de nombreux bassins-versants alpins, cette évolution étant surtout imputable à la construction de divers grands barrages dans les années 1950 (Hingray *et al.*, 2010) ;
- des séries longues : le climat présente des variabilités à différentes échelles de temps (d'une année à l'autre, voire sur des périodes de 10 ans) qui se transmettent à l'hydrologie et il est conseillé de traiter des chroniques longues (de plus de 30 ans) pour s'en abstraire et identifier la tendance de fond.

La difficulté d'accès à de telles séries est réelle, en France comme ailleurs : la majorité des mesures de débits sont récentes, et les chroniques longues concernent bien souvent de grands bassins-versants avec de forts enjeux socio-économiques, ayant de fait subi des modifications notables du régime naturel.

Les études de stationnarité appliquées aux niveaux piézométriques sont moins nombreuses, car elles se heurtent à la faible couverture spatio-temporelle des réseaux de surveillance des eaux souterraines. Les chroniques les plus longues sont généralement liées à des prélèvements ou à des mines. C'est le cas en France : les séries répondant aux exigences d'une analyse de stationnarité (notamment de plus de 30 ans) sont quasi inexistantes dans le sud de la France (Baulon *et al.*, 2020).

Sur la base des précédentes études portant sur les débits, INRAE a mis en place la plate-forme MAKAHO⁵ (MAnn-Kendall Analysis of Hydrological Observations) ; ce système de visualisation cartographique interactif permet d'examiner les tendances présentes dans les données des stations hydrométriques aux débits peu influencés par les actions humaines directes. La figure 1.1 présente l'évolution du débit annuel QA⁶ et du débit d'étiage VCN30⁷ observés pour 232 stations hydrométriques du Réseau de référence pour la surveillance des étiages (RRSE, Giuntoli *et al.*, 2013). Les données traitées sont celles disponibles sur l'Hydroportail et ont été téléchargées en janvier 2025.

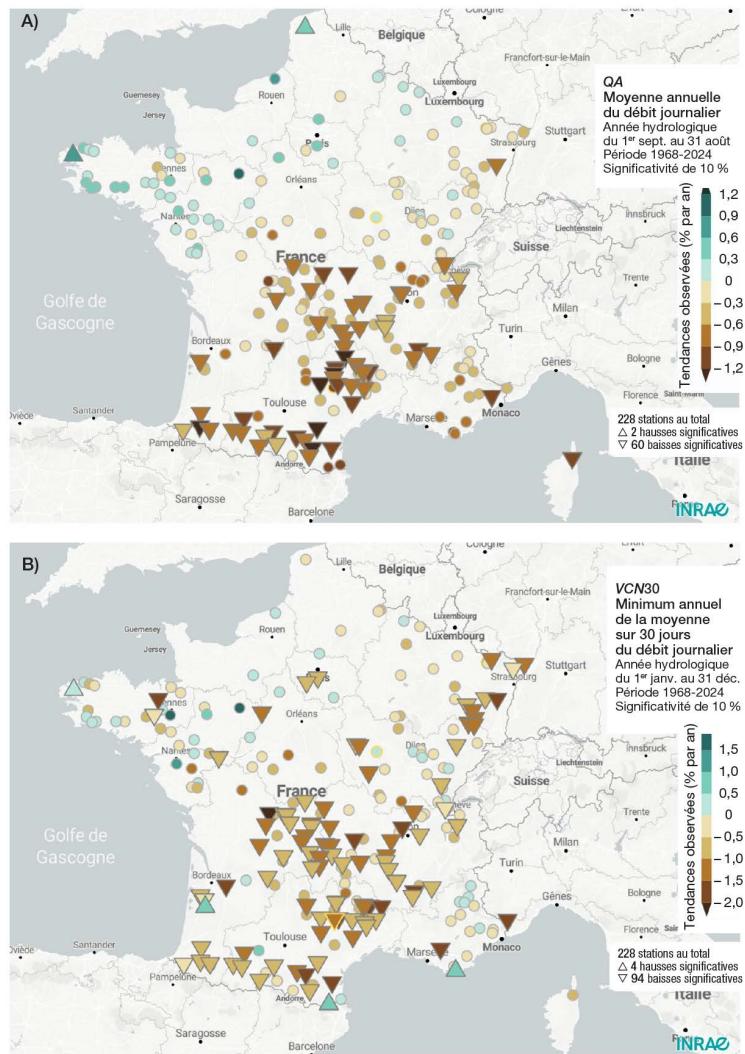
5. <https://makaho.sk8.inrae.fr>.

6. Le débit annuel QA est la moyenne des débits journaliers entre le 1^{er} septembre de l'année considérée et le 31 août de l'année suivante.

7. Le VCN30 est le débit moyen sur 30 jours minimum dans l'année hydrologique.

Figure 1.1. Tendance sur les débits annuels QA (A) et sur les débits d'étiage VCN30 (B) en France sur la période 1968-2024.

Source des données : <https://hydro.eaufrance.fr/>.



Le rond indique une tendance non significative. Le triangle pointant vers le haut indique une tendance significative à la hausse et inversement pour les triangles pointant vers le bas. La couleur renseigne sur l'importance de l'évolution à la hausse ou à la baisse au cours de la fenêtre temporelle.

Pour estimer la significativité de la tendance estimée, le test statistique le plus utilisé dans la communauté hydrologique est celui de Mann-Kendall. Il est jugé très efficace dans sa variante intégrant le traitement de l'auto-corrélation d'ordre 1 (Yue *et al.*, 2002). La tendance observée en chaque point (cf. légende à droite de chaque carte de la figure 1.1) est la valeur de la pente de Sen⁸ (1968) divisée par la moyenne de la variable considérée sur la période d'analyse, pour permettre une comparaison entre stations en pourcentage par an.

Un contraste nord-sud apparaît clairement sur la figure 1.1A associée au QA avec une baisse quasi généralisée des débits annuels dans la partie sud du pays sur la période 1968-2024. Les points colorés en vert sont présents dans la partie nord, mais si les tendances y sont à la hausse, elles ne sont pas statistiquement significatives. La structure sur la figure 1.1B est plus complexe : les tendances significatives concernent majoritairement des évolutions à la baisse du débit d'étiage VCN30 (quatre stations sur dix) ; quelques tendances significatives à la hausse sont isolées. Cette hétérogénéité provient en partie des temporalités différentes des étiages — en été pour les cours d'eau de plaine et en hiver pour les cours d'eau de montagne —, mais aussi de la présence résiduelle d'actions anthropiques auxquelles les débits d'étiage sont très sensibles. Néanmoins, notons que, comme pour le débit annuel, les tendances à la baisse dominent dans la partie sud. Une étude centrée sur les cours d'eau du bassin Adour-Garonne, concernant 56 stations hydrométriques appartenant majoritairement au RRSE, a détecté au cours de la période 1968-2020 des réductions des débits annuels QA entre -4 et -12 % par décennie, et entre -3,6 et -26,3 % par décennie pour les débits d'étiage VCN10⁹. En complément, la dynamique des étiages a évolué entre 1968-1988 et 2000-2020 vers une plus grande précocité (entre -10 et -50 jours) dans les stations pour lesquelles le test indique une tendance significative, même si la date du centre de l'étiage n'a pas sensiblement évolué (Héraut *et al.*, 2022).

Pour les bassins-versants au régime fortement influencé par la dynamique du manteau neigeux, ces changements sont très fortement liés au réchauffement climatique en cours : les débits d'étiage, principalement hivernaux pour le moment, tendent effectivement à augmenter avec le temps, car dans un climat régional plus chaud la proportion de précipitations liquides augmente et la fonte du manteau neigeux tend à démarrer plus tôt dans l'année.

Dans le cas général, les causes des changements observés sur un bassin-versant donné sont souvent difficiles à estimer. Elles nécessitent des analyses supplémentaires pour examiner les causes de ces changements et relèvent du domaine de l'attribution (Planton et Terray, 2007). Même si de telles analyses n'ont pas été engagées, le caractère quasi général ici suggère fortement un phénomène d'emprise régionale, conséquence du changement climatique.

8. Il s'agit de la médiane de toutes les pentes calculées entre chaque paire de points formant la série temporelle.

9. Le VCN10 est le débit moyen sur 10 jours minimum, ici échantillonné entre le 1^{er} mai et le 30 novembre de chaque année.

Ces analyses de stationnarité ne sont valables que sur la période étudiée, et l’imbrication des processus impliqués dans l’évolution des débits dans le contexte du changement climatique est telle que les résultats ne peuvent pas être extrapolés pour calculer des débits dans les prochaines décennies ; il faut alors s’appuyer sur les résultats des études d’impact exploitant des chaînes de modélisation hydro-climatiques et une scénarisation des émissions de gaz à effet de serre pour le xxi^e siècle.

Études d’impact : des simulations pour anticiper le futur

■ À l’échelle globale

Des projections hydrologiques sur des cours d’eau français ont bien évidemment été élaborées dans le cadre d’études de l’impact du changement climatique à de larges échelles (mondiale et continentale). On trouvera dans les différents supports du Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat (Giec) des informations sous forme de cartes¹⁰ ou des évolutions de variables hydrologiques sur une ou plusieurs stations hydrométriques françaises, données à titre d’illustration dans différentes publications. Les projections hydrologiques, élaborées à l’échelle européenne, permettent de mettre en perspective les changements estimés pour la France au regard de ceux estimés pour les pays voisins. Les travaux les plus récents sont présentés par niveau de réchauffement, sans placer ces niveaux dans une temporalité. Ainsi, pour trois niveaux de réchauffement global (+1,5 °C, +2 °C et +3 °C par rapport à 1981-2010), Bisselink *et al.* (2020) mettent en évidence une réponse hydrologique organisée par bandes de latitudes, avec des pays d’Europe du Sud vraisemblablement confrontés à une diminution de la disponibilité annuelle de l’eau et, à l’inverse, les pays d’Europe centrale et septentrionale bénéficiant d’une disponibilité annuelle en eau accrue, quel que soit le niveau de réchauffement. Cammalleri *et al.* (2020) concluent à une réduction des débits d’étiage dans le sud de l’Europe, d’autant plus forte que le réchauffement est élevé. L’Europe occidentale sera en grande partie confrontée à des conditions de sécheresse de plus en plus fréquentes et intenses. Cela contraste avec la Scandinavie et le nord-est de l’Europe, où les projections suggèrent une réduction du risque de sécheresse. Pour le scénario de réchauffement global +1,5 °C, la fréquence des sécheresses augmentera sur la moitié sud de la France, et cette augmentation concernera la quasi-intégralité des cours d’eau français avec un réchauffement de +3 °C.

■ En France

Les modèles hydrologiques sont appliqués dans les études paneuropéennes avec des forçages climatiques aux résolutions spatiales grossières. La paramétrisation de ces modèles est évaluée au mieux sur un nombre réduit de stations hydrométriques, associé à une grande extension spatiale de la zone d’étude. De ce fait, de telles études

10. <https://interactive-atlas.ipcc.ch>.

ne peuvent donner qu'un aperçu des tendances futures. Une modélisation et une analyse à une échelle plus fine, bénéficiant de données hydrologiques, de réanalyses météorologiques et d'expertises locales, sont indispensables pour rendre compte et comprendre pleinement tous les changements, en cours et à venir, à des échelles locales.

C'est ce qui a motivé, en France, l'émergence d'Explore2070, première étude prospective nationale achevée en 2014 sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau à l'horizon 2046-2065, sur la base du quatrième rapport du Giec. Les résultats obtenus en France alertent clairement sur les tensions à venir (Chauveau *et al.*, 2013). Ils indiquent notamment :

- une diminution significative globale des débits annuels moyens, de l'ordre de - 40 % à - 10 % selon les projections hydrologiques, particulièrement prononcée en Seine-Normandie et en Adour-Garonne ;
- pour une grande majorité des cours d'eau, une diminution des débits d'étiage encore plus prononcée que la diminution à l'échelle annuelle ;
- des évolutions plus hétérogènes des crues.

Le projet Explore2070 donne également à voir la piézométrie sur un ensemble morcelé d'aquifères ou de karsts. Dans la plaine alluviale d'Alsace, toutes les projections climatiques convergent à une baisse de la recharge qui se traduit par une baisse des niveaux piézométriques. En Poitou-Charentes, la situation est très contrastée selon les projections climatiques. À l'échelle du bassin de la Somme, la baisse de la recharge calculée à partir des résultats des sept projections climatiques d'Explore2070 est de l'ordre de - 19 % (Amraoui *et al.*, 2019). La recharge est la seule variable disponible à l'échelle nationale pour décrire le futur des aquifères : une baisse quasi générale comprise entre - 25 % et - 10 % est projetée en 2046-2065, comparativement à 1961-1990.

Depuis l'achèvement d'Explore2070, de nouvelles générations de projections planétaires ont émergé dans le cadre des exercices CMIP5 et CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project*¹¹) de la communauté internationale pour alimenter les rapports successifs du Giec. Des études ou projets à portée nationale ou régionale concernant l'hydrologie de surface ou souterraine ont émergé sous l'impulsion des services de l'Etat ou des agences de l'eau post-Explore2070. Un recensement complet a été réalisé par Sauquet *et al.* (2022).

Le projet Explore2, officiellement lancé en juillet 2021, est porté par INRAE et l'Office international de l'eau (OIEau) et est cofinancé par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires et l'Office français de la biodiversité (OFB), qui en sont partenaires. Achevé en 2024, il a mis à jour les connaissances de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la France et facilite l'appropriation par les acteurs de l'eau des données élaborées, des incertitudes inhérentes à l'exercice et des résultats.

La chaîne de modélisation mobilisée dans Explore2 reprend la structure classique d'une modélisation numérique de l'impact du changement climatique en hydrologie (figure 1.2). Elle s'inscrit dans une démarche multi-modèles et multi-scénarios pour apprécier au

11. <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>.

mieux la dispersion des futurs possibles. C'est également une approche « emboîtée » avec, en première entrée, une vision du climat à l'échelle planétaire. La chaîne de modélisation prend en charge le passage d'échelles du climat global au climat régional, pour aboutir finalement au climat local et aux échelles de gestion des hydro systèmes.

En amont de cette chaîne, des scénarios d'émissions définissent l'évolution de la composition de l'atmosphère en gaz à effet de serre et en aérosols au cours du xxi^e siècle. Ces scénarios, ici les trajectoires représentatives de concentration (RCP, *Representative Concentration Pathways*), sont ensuite traduits en projections climatiques, d'abord réalisées à l'échelle globale par des modèles de circulation générale (GCM, *General Circulation Models*) simulant le climat de la Terre entière à une résolution spatiale de 100 à 200 km.

Des modèles climatiques régionaux (RCM, *Regional Climate Models*), pilotés par les GCM simulent ensuite le climat à haute résolution sur des zones restreintes. Dans le projet Explore2, c'est l'ensemble Euro-CORDEX couvrant l'Europe (Coppola *et al.*, 2021) qui a été mobilisé (Marson *et al.*, 2023). Il contient plus d'une centaine de projections climatiques à la résolution de 12 km. Elles déclinent à haute résolution sur l'Europe les projections globales de l'exercice de simulation CMIP5, à la base du cinquième rapport du Giec. Les simulations climatiques utilisées sont un ensemble de 10 projections avec le scénario RCP2.6, 9 avec le scénario RCP4.5 et 17 avec le scénario RCP8.5. Le scénario RCP2.6 est compatible avec les accords de Paris. Le scénario RCP4.5 « d'émissions modérées » conduit à une stabilisation des émissions de gaz à effet de serre à un niveau faible avant la fin du xxi^e siècle, tandis que dans le scénario RCP8.5 « de fortes émissions », le plus pessimiste, les émissions continuent d'augmenter au rythme actuel. Les sorties des modèles climatiques présentent des biais lorsqu'on les compare aux observations des décennies récentes. Ces simulations climatiques ont été donc corrigées par deux méthodes statistiques, conduisant à un ensemble de 72 projections climatiques à une résolution $8 \times 8 \text{ km}^2$.

La dernière composante de la chaîne de modélisation est constituée des modèles hydrologiques. Cette étape capitale permet *in fine* de décliner les évolutions du climat en grandeurs pertinentes pour la gestion de la ressource en eau à l'échelle des territoires. Le projet Explore2 fournit une « hydrologie naturelle de référence » sur laquelle bâtir des exercices prospectifs. Les débits simulés sont ainsi considérés comme naturels, en absence d'action de gestion de l'eau. En revanche, il a été impossible de modéliser les niveaux des nappes sans intégrer les prélèvements ; ces prélèvements sont maintenus à leur niveau actuel déclaré sur le xxi^e siècle dans les simulations.

Les différents modèles hydrologiques viennent traduire les projections climatiques en projections hydrologiques descriptives de la ressource en eau : débit en rivière, recharge potentielle¹² des aquifères et niveau piézométrique. Les débits sont issus de

12. La recharge potentielle des aquifères correspond à la part de la pluie efficace qui s'infiltra, l'autre partie alimentant le réseau hydrographique de surface, par ruissellement ou écoulements de sub-surface. Cette variable est le résultat d'un modèle spécifique et n'est pas une donnée d'entrée pour les autres modèles hydrologiques.